

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. p. 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

$\approx (1,1 - 1,2)P_z$. [1,2,4].

По данным Г.И. и В.Г. Грановских, величина усилия резания при свободном течении и аналогичных процессах резания может быть представлена в виде:

$$P = e\tau f_H, \quad (1)$$

где τ - касательные напряжения, возникающие в плоскости скалывания по всей площади в тонком слое пластически деформируемого металла;

$f_H = ab = st$ — площадь поперечного сечения срезаемого слоя;

e — коэффициент, учитывающий влияние безразмерных величин, входящих в известное уравнение К.А. Зворыкина [1];

$$e = \frac{(1 - f_1)^2 \cos \gamma + 2f_1 \sin \gamma}{\sin \theta [(1 - f_1 f_2) \cos(\gamma - \theta) + (f_1 + f_2) \sin(\gamma - \theta)]}, \quad (2)$$

здесь γ - передний угол;

θ - угол сдвига;

f_1 - коэффициент внешнего трения скольжения обрабатываемого и инструментального материалов;

f_2 — коэффициент внутреннего трения в пластически деформируемом металле.

Выражения (1,2) имеют явный физический смысл, т.к. несут в своём составе основные параметры и факторы теории резания в простейшем математическом представлении [1,2]. Близкие по составу формулы были предложены также С.С. Рудником [1], Н.Н. Зоревым [2], В.Ф. Бобровым [4], М.Е. Мерчантом, И.Дж.А. Армарего и Р.Х. Брауном [3], и др. Следует заметить, что в соответствии с современными представлениями для определения сил P_x , P_y , P_z , например, при свободном прямоугольном течении, могут быть использованы уточнённые зависимости, требующие проведения сложных экспериментов и расчётов, например, предложенные в работе С.А. Васина, А.С. Верещаки и В.С. Кушнера [5]:

$$P_x = (R_v + N_1) \sin \varphi = \left(K_v S_b St + \sigma_b h_3 \frac{t}{\sin \varphi} \right) \sin \varphi$$

$$P_y = (R_v + N_1) \cos \varphi = \left(K_v S_b St + \sigma_b h_3 \frac{t}{\sin \varphi} \right) \cos \varphi$$

$$P_z = R_\xi + F_1 = K_\xi S_b St + (\mu_1 \sigma_b h_3 + 0,7 S_b H_0) \left(\frac{t}{\sin \varphi} \right),$$

где: R_v , R_ξ - проекции силы на передней поверхности на оси v и ξ ; N_1 - нормальная сила на задней поверхности; K_v , K_ξ - удельные силы резания в плоскостях μ , ξ и μ , v ; S_b - действительный предел прочности при растяжении; σ_b - условный предел прочности при растяжении; h_3 - высота фаски износа инструмента по задней поверхности; F_1 - касательная сила на задней поверхности; μ_1 - коэффициент трения на задней поверхности; H_0 - высота застойной зоны.

Известно, что все прочностные и силовые расчеты ведутся по максимально достигаемым значениям составляющих силы резания [1,2,4]. Наибольшей из них является вертикальная составляющая P_z , и, соответственно, именно она определяет ход процессов, протекающих в зоне стружкообразования [1,2,4]. Соотношение между составляющими силы резания не постоянно из-за влияния множества факторов, в том числе и износа, особенно задней поверхности лезвия, существенно влияющего на значения горизонтальных составляющих P_x и P_y [1,2]. Установлено, что за период стойкости эти составляющие постепенно возрастают, а перед переточкой практически устанавливается равенство всех трех составляющих силы резания, т. е. $P_x \approx P_y \approx P_z$ [1,6]. Потому при проектировании станков предлагается считать все составляющие равными P_z [1,6].

Произведение $e\tau$ из формулы (1) было заменено Г.И. и В.Г. Грановскими эквивалентным произведением [1]:

$$K_p \sigma_b, \quad (3)$$

где σ_b — предел прочности обрабатываемого металла на растяжение. При такой замене

на в уравнении (1) был получен основной вариант упрощенного уравнения силы резания [1]:

$$P = K_p \sigma_b f_n. \quad (4)$$

В уравнении (4) произведение $K_p \sigma_b$ выражает удельное сопротивление резанию металла обрабатываемой заготовки при фиксированных параметрах резания (геометрии резца, параметрах среза, коэффициенте трения по поверхности резца, угле сдвига и др.) и называется коэффициентом резания [1]. Коэффициент резания — величина постоянная для конкретного обрабатываемого материала [1,6]. К сожалению, в работе Г.И. и В.Г. Грановских [1] не содержится сведений о конкретных величинах угла сдвига θ и переднего угла γ , а также коэффициентов трения, заложенных в расчёт безразмерного коэффициента K_p , что не позволяет воспроизвести полученные ими результаты (в работе даны лишь экспериментальные данные, согласно которым при резании конструкционных сталей в зависимости от их химического состава, структурного состояния и механических свойств безразмерный коэффициент $K_p = 2,3 \dots 2,8$).

Следует иметь в виду, что коэффициент резания — величина не стандартизованная. Это приводило к определению различными авторами близких коэффициентов несколько по-иному. По А.М. Даниеляну [7] способность обрабатываемого материала оказывать сопротивление резанию характеризуется коэффициентом резания $K = P/ts$, которым выражается давление на резец, отнесенное на 1 мм^2 площади сечения стружки при следующих условиях резания: глубина резания $t = 5 \text{ мм}$, подача $s = 1 \text{ мм/об}$, угол резания $\delta = 75^\circ$, угол в плане $\varphi = 45^\circ$, режущая кромка резца прямолинейная, горизонтальная, радиус закругления вершины $r = 1 \text{ мм}$, работа всухую. Коллектив авторов во главе с П.Г. Петрухой [8] в качестве аналогичного коэффициента рекомендует использование понятия удельной силы резания k , измеренной при конкретных условиях, в основном, аналогичных, приведённым [6,8]. В этих случаях можно констатировать близость коэффициентов $K_p \sigma_b$, K и k [1,7,8].

Известно, что до настоящего времени точная математическая зависимость коэффициента резания от механических свойств обрабатываемого металла установлена не для всех случаев. Вероятно, потому современные отечественные справочники по режимам резания не содержат непосредственно величин коэффициента резания и отличаются, к сожалению, отсутствием сведений о точности формул для определения усилий резания [13-16]. Аналогичные немецкие справочники, например Г. Шпура [9], для представления данных по усилию резания широко используют коэффициент, звучащий в переводе как «основное значение удельной силы резания», близкий по смыслу коэффициенту резания. Коэффициент «основное значение удельной силы резания» в справочниках Г. Шпура [9] и «Гарант» [10] в табличном виде приводится для конкретных обрабатываемых материалов при различной толщине стружки, но нормирован при несколько отличных от российских исходных характеристиках: режимах резания, материале и геометрии резца.

А.М. Даниеляном были сделаны важные замечания о зависимости коэффициента резания от механических свойств обрабатываемого металла [7]. Основной его вывод: чем выше качество обрабатываемого материала, тем больше величина коэффициента резания. Он объясняет это тем, что работа резания расходуется на пластическую деформацию, упругую деформацию металла и трение, а величина первых двух работ зависит от физико-механических свойств материала, определяющих его прочность. В свою очередь, прочность металла зависит от его упругих и пластических свойств, которыми определяется и величина усилия резания. Потому в процессе резания, когда стружка подвергается пластической деформации со значительной скоростью, усилие резания будет тем больше, чем пластичнее металл и его способность к наклепу [7]. Таким образом, с увеличением предела прочности σ_b и относительного удлинения коэффициент резания будет возрастать, причем предел прочности σ_b оказывает большее влияние на коэффициент резания, чем относительное удлинение [7].

В таблице 1 даны механические свойства конструкционных сталей, испытанных Г.И. и В.Г. Грановскими с целью проведения расчётов сил резания [1].

При отсутствии сведений о прочности стали, но возможности оперативного определения её твердости по Бринеллю, Г.И. и В.Г. Грановскими предлагается определять предел

прочности по выражению $\sigma_b \approx 0,31 \text{ НВ}$, что расширяет возможности использования формулы (4) на хрупкие материалы, например, чугуны [1]. Т.е., упрощенное уравнение силы резания (4) позволяет в первом приближении оценить значение силы, действующей в процессе резания, для основных групп конструкционных металлов [1].

Таблица 1

Механические свойства конструкционных сталей [1].

Группа сталей	Марка	Твёрдость НВ	Предел текучести σ_t , ГПа	Предел прочности σ_b , ГПа
Углеродистые	40	187	0,34	0,58
	45	197	0,36	0,61
	50	207	0,38	0,64
Хромистые	20Х	179	0,65	0,80
	40Х	217	0,80	1,00
	45Х	229	0,85	1,05
	50Х	229	0,90	1,10
Хромоникелевые	20ХН	197	0,60	0,80
	30ХН	217	0,80	1,00
	45ХН	207	0,85	1,05
	50ХН	207	0,90	1,10
Группа сталей	Марка	Твёрдость НВ	Предел текучести σ_t , ГПа	Предел прочности σ_b , ГПа
Хромокремне-марганцовистые	20ХГСА	207	0,65	0,80
	30ХГСА	229	0,85	1,10
Хромоникеле-вольфрамовые	30ХНВА	241	0,80	1,00
	40ХНВА	269	0,95	1,10
Хромоникеле-молибденовые	40ХНМА	269	0,95	1,10

Известны и иные варианты упрощённого уравнения силы резания [6]. А.М. Вульф сообщил об использовании на практике вместо нормированного коэффициента резания постоянной величины C_p как силы резания при $t = 1 \text{ мм}$, $s = 1 \text{ мм/об}$ «и при оптимальной для данного материала геометрии инструмента» [6]. При этом величина C_p рассчитывалась им по формулам, выражающим закономерность изменения силы резания в зависимости от глубины резания и подачи [6]. При практических расчётах это может расширить возможности сравнения усилий резания при обработке широкого спектра материалов между собой при некоторой, однако, потере формальной корректности сравнения. А.М. Вульфом получены значения C_p для широкого ряда металлов при малой скорости резания (0,2 мм/мин) [6]. Он отмечал, что при использовании коэффициента C_p удалось максимально приблизить форму экспериментальных зависимостей к теоретически рассчитанным Н.Н. Зоревым [2,5,6,11]. Исходя из анализа работы [6] А.М. Вульф, предположительно, пользовался формулой вида:

$$P = C_p t s, \quad (5)$$

расчёты в соответствии с которой были сведены им в таблицу 2.

Вероятно, А.М. Вульфу не полностью удовлетворяли решения, полученные в рамках простейшей формулы вида (5), что, может быть, связано с её недостаточной точностью [2-4]. Потому для практических расчётов сил резания им были рекомендованы формулы (6-8) [6], см. также таблицу 3:

$$P_z = C_{P_z} \cdot t \cdot s^{0,75} \quad (6)$$

$$P_x = C_{P_x} \cdot t^{1,2} \cdot s^{0,55} \quad (7)$$

$$P_y = C_{P_y} \cdot t^{0,9} \cdot s^{0,75} \quad (8)$$

где C_{P_z} , C_{P_x} , C_{P_y} – постоянные, зависящие от обрабатываемого материала.

Механические свойства металлов и постоянная C_p [6]

Обрабатываемый материал	σ_B	σ_p	σ_T	δ	ψ	НВ	C_p
	в кгс/мм ²			в %		в кгс/мм ²	
Сталь: конструкционная	37,6	20,1	20,1	36,5	68,8	100	140
Обрабатываемый материал	σ_B	σ_p	σ_T	δ	ψ	НВ	C_p
	в кгс/мм ²			в %		в кгс/мм ²	
Сталь: конструкционная	51,5	20,3	24,8	23,0	54,0	156	180
ОХМ	74,0	56,0	60,0	15,0	61,5	226	240
аустенитная	80,0	38,6	45,0	31,0	66,0	178	310
жаропрочная ХН70ВМТ	120	-	-	-	-	-	350- 400
Медь	21,4	-	5,1	43,4	65,4	535	52
Бронза	60,0	28,0	37,0	17,0	19,0	120	102
Сплав В-93	50,0	-	-	-	-	-	71
Чугун НВ 190	-	-	-	-	-	-	92

Таблица 3

Значения C_{Pz} , C_{Px} , C_{Py} в кгс/мм² [6]

Обрабатываемый материал	C_{Pz}	C_{Px}	C_{Py}
Сталь и стальное литьё:			
$\sigma_B = 35$ кгс/мм ²	140	19	27
$\sigma_B = 50$ кгс/мм ²	165	42	67
$\sigma_B = 75$ кгс/мм ²	200	67	125
Чугун ковкий:			
НВ 110	80	28	59
НВ 150	100	40	88
НВ 200	115	52	120
Чугун серый:			
НВ 150	100	39	88
НВ 190	115	51	119
НВ 270	140	66	188

Примечание: Указанные значения рассчитаны по Справочнику режимов резания Бюро технических нормативов (БТН) МС СССР

Анализируя уравнения (6-8) и примечание к таблице 3, можно заметить, что рекомендуемые уравнения соответствуют формулам из справочников по режимам резания, полученным чисто экспериментальным путём, и имеют степенные коэффициенты при t и s [4,6,12].

В.Ф. Бобровым [4] для анализа также использовались экспериментальные уравнения вида (6-8). По данным А.В. Панкина, В.Ф. Боброва и др. значительное влияние на силу резания оказывают следующие факторы: режимы резания, обрабатываемый материал K_1 ; геометрия резца K_2 ; охлаждающе-смазывающие жидкости K_3 ; износ и вибрации K_4 , а также физико-механические свойства режущего сплава K_5 [4,11].

Общее выражение для силы резания по экспериментальным формулам, например, может выражаться следующим образом [11]:

$$P = C t^x s^y = K_1 K_2 K_3 K_4 K_5 t^x s^y. \quad (9)$$

Для узких групп сталей и чугунов при расчете силы P_z в зависимости от σ_B и НВ П.И. Ящерицын, М.Л. Еременко и Е.Э. Фельдштейн рекомендуют к использованию на практике следующие эмпирические формулы [17]:

$$P_z = C_M \sigma_B^q; \quad (10)$$

$$P_z = C_M \text{НВ}^q; \quad (11)$$

где $q \approx 0,5$ - показатель степени (для металлов всегда меньше единицы).

О конкретных величинах коэффициента C_m сведений не приводится. Однако, имея значения усилия резания для близкой марки стали или чугуна, становится возможным по отношению формул (10,11) определять усилие резания для требуемой марки, взятой из узкого диапазона марок в пределах группы [17].

Использование чисто экспериментальных зависимостей ведёт к существенным последствиям. А.М. Даниелян, а вместе с ним и многие другие авторы [1,5,7], отмечали существенные недостатки эмпирических формул: их структура в виде степенных функций не отражает внутренней сущности процесса резания и представляет лишь более или менее удачно подобранную математическую зависимость, удобную для практического пользования; они действительны только в тех узких пределах, в которых были произведены опыты для их определения, пользование же этими формулами за указанными пределами очень часто приводит к значительным ошибкам. А.В. Панкин [11] указывал, что при выводе формулы вида $P = C t^x s^y$ исходили из допущения о постоянстве и независимости друг от друга показателей над t и s . Однако эти показатели изменяются в зависимости от пластических свойств обрабатываемых материалов и от соотношений t и s , что принимается во внимание при обработке особо вязких материалов (жаропрочные сплавы) или особо хрупких металлов (чугуны) [11]. Кроме того, формула силы резания с дробными показателями t и s теряет свою размерность, т.к. коэффициент C в этом случае уже не является ни удельным давлением, ни единичной силой резания [11]. При обращении к экспериментальным формулам также появляется необходимость учёта влияния на силу резания различных факторов. Эти факторы включаются в коэффициент C - произведение различных коэффициентов, количественно выражающее их влияние [11,13]. При этом считается, что факторы не зависят друг от друга, а это не соответствует действительности [11].

Однако эмпирические формулы представляют значительную ценность, т.к. на основе их составлялись необходимые для металлообрабатывающей промышленности нормативы, и они же часто используются при расчете станков и металлорежущих инструментов [1,3,7].

По мнению И.Дж.А. Армарега и Р.Х. Брауна, эмпирические методы определения сил резания в большей степени пригодны для специфических операций процесса резания, в то время как аналитический подход может быть использован в том случае, когда известно значение основных параметров процесса [3].

Заметим, что здесь мы рассматриваем простейшие уравнения усилия резания, полученные, по возможности, аналитически и с использованием коэффициента резания, имеющего определённый физический смысл, потому не рассматриваем весь спектр широко распространённых чисто экспериментальных формул узкоконкретного назначения, включающих значительное количество перечисленных и иных опытных коэффициентов [4,11,13].

Ю.М. Ермаков считает силу резания, непосредственно связанную со стойкостью инструмента и энергетической напряженностью процесса резания, наиболее общим показателем, отражающим многофакторность процесса формообразования [22]. Потому удельная сила резания как конечный результат преобразований удельной работы резания для него является истинным выражением сущности широко распространённого энергетического критерия $p = F/(ab)$, впервые введенного Ф. Тейлором как давление резания [22]. Удельной силой резания p принято считать давление, приходящееся на 1 мм^2 поперечного сечения снимаемого слоя металла при любых размерах последнего, любых режимах резания и геометрии резца. Чем меньше толщина среза, тем больше удельная сила и работа резания, причем в степенной зависимости, что подтверждается экспериментальными данными по силам резания с пересчетом на удельную по площади среза силу [22], поэтому удельную силу резания нельзя путать с коэффициентом резания, т.е. с нормированным удельным давлением, измеряемым в жёстко заданных условиях [6].

По данным П.И. Ящерицына, М.Л. Еременко, Е.Э. Фельдштейна [17], а также С.Н. Филоненко [12], для весьма приблизительного определения силы резания P_z исходя из площади поперечного сечения среза иногда используется и непосредственно удельная сила резания (авторами дано без указания об ограничениях):

$$p = P_z/f, \quad (12)$$

где f — площадь поперечного сечения среза, мм^2 : $f = ab$. Тогда, зная для конкретного обрабатываемого металла и данных условий резания удельную силу p , можно определить $P_z = pf$ [12,17].

П.И. Ящерицын, М.Л. Еременко и Е.Э. Фельдштейн отмечали, что при снятии стружки металл не только срезается, но и претерпевает сильную пластическую деформацию. При этом большое влияние на силы резания оказывают силы трения стружки и обрабатываемого материала о переднюю и заднюю поверхности лезвия инструмента соответственно. Из-за сильного разогрева свойства металла в зоне резания могут отличаться от свойств, которые характерны для него при статических испытаниях [17]. Многие исследователи считают, что до настоящего времени не установлена точная и однозначная зависимость между силой P_z и временным сопротивлением обрабатываемого материала, а также его твердостью и другими механическими характеристиками [2,5,17]. Однако замечено, что силы резания растут при увеличении σ_b , твердости, пластичности и вязкости обрабатываемого материала [2,5,17].

А.М. Даниелян считал, что критерием оценки обрабатываемости металлов по усилию должно служить не удельное давление, которое даже для данного металла величина переменная, а именно коэффициент резания [7]. Он показал, что легче поддается резанию тот материал, у которого коэффициент резания меньше [7]. А.М. Вульф обращал внимание на то, что в отличие от постоянной силы резания, удельная сила резания — величина переменная для данного обрабатываемого материала и зависит от размера снимаемой стружки и ряда других условий, что затрудняло использование формулы (10) при оценочном определении сил резания [6]. По данным А.М. Вульфа удельная сила резания возрастала с уменьшением толщины среза, особенно при очень тонких стружках ($a = 40...60$ мкм) [6], причём при точении, в зависимости от изменения толщины среза, удельная сила резания колебалась в пределах 200... 1500 МПа [6]. Следует заметить, что А.М. Вульф считал недостатком коэффициента резания определение его величины при избыточно жёстких постоянных условиях [6], а мы заметим, что и при не всегда идентичных условиях (см. выше).

Следует заметить, что по представлениям современных исследователей условия резания, а вместе с тем и показатели усилия резания, реально определяются весьма значительным количеством характеристик, т.е.:

- а) параметров, к которым, например, по мнению В.С. Кушнера, обычно относятся [5]:
- прочностные и теплофизические характеристики обрабатываемого материала,
 - наличие и свойства литейной корки,
 - жесткость технологической системы, прочность ее элементов,
 - размеры обрабатываемых поверхностей заготовок и деталей,
 - требования к шероховатости и качеству обработанных поверхностей,
 - характеристики металлорежущего оборудования (имеющиеся на станке подачи, значения частоты вращения шпинделя, допускаемые прочностью элементов станка технологические составляющие силы резания, крутящий момент, эффективная мощность электропривода главного движения);
 - характеристики жесткости, прочности и износостойкости инструмента, размеры режущих пластин, характеристики износостойкости инструмента (заданный период стойкости или площадь обработанной поверхности инструмента до его затупления);

б) факторов, к которым, например, по мнению В.С. Кушнера, следует отнести [5] геометрические параметры режущего лезвия (передний угол γ , углы в плане ϕ , ϕ_n , ϕ_1 главной, переходной и зачищающей кромок и радиус закругления вершины R , размеры упрочняющей и стабилизирующей фасок f_1 , f_2 на передней поверхности, задние углы α и α_1 , углы наклона λ , λ_1 главной и зачищающей режущих кромок), а также марки инструментального материала, износостойких покрытий и смазочно-охлаждающих жидкостей.

К числу факторов могут относиться также глубина резания t , подача s и скорость резания v [5].

Некоторые из факторов являются взаимозависимыми. По мнению В.С. Кушнера, формулирование и математическая запись этих связей (ограничений) представляет собой главную проблему, определяющую успех оптимизации режимов резания и геометрических параметров режущих инструментов [5].

С целью ориентировочной оценки результатов различных авторов нами проведены сравнительные расчёты по формулам (4-9) сил резания для различных сталей при использовании коэффициентов $K_{p\sigma_b}$, C_p и C_{pz} , C_{px} , C_{py} , а также - C , для постоянных режимов резания: $t = 3$ мм, $S = 0,5$ мм/об при $f_n = 1,5$ мм². Полученные результаты приведены в таблице 4:

Расчёты по формулам (4,5) показали, что при использовании коэффициентов $K_{p\sigma_b}$ и C_p получены близкие величины усилий резания (см. таблицу 4).

Расчёты усилий резания для сталей и стального литья по рекомендациям А.М. Вульфа и А.В. Панкина (формулы (6-9)) дали несколько завышенные результаты, однако более высокий уровень полученных усилий резания не мешает использовать их как ориентировочные. Точность результатов предварительного определения усилий резания по нашей оценке составляет примерно 10-30%.

Сравнение основных видов аналитических формул для примерного определения силы резания P показывает, что практически каждый из предложенных Г.И. и В.Г. Грановскими, А.М. Вульфом, П.И. Ящерицыным, М.Л. Еременко, и Е.Э. Фельдштейном, а также Г. Шпуром вариантов обладает как преимуществами, так и недостатками, рассмотренными выше, но в то же время позволяет ориентировочно судить об уровне усилия резания при точении в производственных условиях [1,6, 9,17]. При этом в работах А.М. Вульфа [6] и Г. Шпура [9] представлены возможности определения усилий резания для более широкого перечня материалов. Имея в виду особенности каждой из рассмотренных формул, а также – невысокую их точность, на практике можно пользоваться любой из рассмотренных, естественно, при наличии в распоряжении первичных сведений о величинах $K_{p\sigma_b}$ (k , K), C_p (C_{pz} , C_{py} , C_{px}), либо – C_m (при наличии данных об усилении резания для обработки близкой по свойствам марки стали, либо чугуна) [1,6,17]. Следует отметить, что использование коэффициента резания и его аналогов как постоянных параметров, имеющих физический смысл и определяемых расчётным путём по упрощённым формулам, несколько затруднено их некоторыми колебаниями для обрабатываемого материала, размера снимаемой стружки и ряда других условий, а потому может быть рекомендовано лишь для ориентировочных расчётов, в основном производственного плана, дающих, тем не менее, в основе адекватные представления о физической сущности процесса резания, что весьма важно [1,5,7,11,17].

Коэффициент резания $K_{p\sigma_b}$ [1], удельная сила резания k [10], коэффициент K [7], и иные аналогичные коэффициенты, являющиеся по смыслу удельной силой резания в жёстких, приблизительно постоянных условиях определения, - это не стандартизованные параметры резания с различными обозначениями, но весьма близким содержанием. Классический коэффициент резания $K_{p\sigma_b}$ - это далеко не единственный показатель удельного сопротивления резанию металла обрабатываемой заготовки, но вошедший в практический инструментарий обработчиков резанием и позволяющий упрощённо определять величины усилий в производственных условиях.

Следует заметить, что полнофункциональные объективные сравнительные расчёты с привлечением коэффициента резания и использованием сведений авторов рассмотренных работ иногда не представляются возможными, т.к. исходные данные для расчётов (конкретные величины коэффициентов трения, углов резания и т.п.) в некоторых работах не приводятся [1,2,6]. Т.е. при необходимости углублённого сравнения формул различных авторов каждый исследователь в ряде случаев фактически вынужден вносить в исходные данные сведения, полученные им на основании личного опыта и частных экспериментов.

Что касается справочной литературы по режимам резания, то в силу чисто опытного характера она эффективно используется для получения данных в узких пределах, фактически заданных авторами конкретных экспериментов, и в этих рамках может дать точный результат величины усилия резания [4,11-13].

Результаты сравнительных расчётов сил резания при точении сталей и стального литья

Обрабатываемый материал	Расчётная формула	Исходные данные	Результат расчёта	Примечания
Стали углеродистые конструкционные	$P = K_p \sigma_b f_n$ (4)	$K_p \approx 2,5$. Для стали 45 предел прочности - $\sigma_b = 0,61$ ГПа (см. таблицу 1)	$P = 2,3$ кН	См. пример [1]
То-же	То-же	$K_p \approx 2,5$. Для углеродистых сталей 40-50 предел прочности - $\sigma_b = 0,58 - 0,64$ ГПа (см. таблицу 1)	$P \approx 2,2 - 2,4$ кН	Оценка по данным [1]
Стали иные конструкционные: хромистые, хромоникелевые...	То-же	Предел прочности - $\sigma_b = 0,80 - 1,10$ ГПа $K_p \approx 2,3...2,8$ в зависимости от химического состава, структурного состояния и механических свойств (см. таблицу 1)	Для $K_p \approx 2,3$ и стали марки 20X $P \approx 2,8$ кН. Для $K_p \approx 2,8$ и стали марки 50X $P \approx 4,6$ кН.	Оценка по данным [1]
Сталь конструкционная $\sigma_b = 0,37$ ГПа	$P = C_p t s$ (5)	$C_p = 140$. Для металлов в условиях оптимальной для данного материала геометрии инструмента (см. таблицу 2)	$P = 2,1$ кН	Расчёт по данным табл. 2 [6]
Сталь конструкционная $\sigma_b = 0,51$ ГПа	То-же	$C_p = 180$. Для металлов в условиях оптимальной для данного материала геометрии инструмента (см. таблицу 2)	$P = 2,7$ кН	Расчёт по данным табл. 2 [6]
Обрабатываемый материал	Расчётная формула	Исходные данные	Результат расчёта	Примечания
Сталь и стальное литьё $\sigma_b = 0,34$ ГПа	$P_z = C_{P_z} \cdot t \cdot s^{0,75}$ $P_x = C_{P_x} \cdot t^{1,2} \cdot s^{0,55}$ $P_y = C_{P_y} \cdot t^{0,9} \cdot s^{0,75}$ (6, 7, 8)	Для резания стали и стального литья. Предел прочности $\sigma_b = 0,34$ ГПа; $C_{P_z} = 140$; $C_{P_y} = 27$; $C_{P_x} = 19$. (см. таблицу 3)	$\sigma_b = 0,34$ ГПа $P_z = 2,5$ кН $P_x = 0,47$ кН $P_y = 0,43$ кН $P_p = 2,6$ кН	Расчёт по рекомендации - см. табл. 3 [6]
Сталь и стальное литьё $\sigma_b = 0,74$ ГПа	То-же	Для резания стали и стального литья. Предел прочности $\sigma_b = 0,74$ ГПа; $C_{P_z} = 200$; $C_{P_y} = 125$; $C_{P_x} = 67$ (см. таблицу 3)	$\sigma_b = 0,74$ ГПа $P_z = 3,5$ кН $P_x = 1,7$ кН $P_y = 2,0$ кН $P_p = 4,4$ кН	То-же
Сталь с $\sigma_b = 0,74$ ГПа, твердостью НВ 215.	$P_z = 190 t s^{0,75}$ (9)	Обработка резцами с твердосплавными пластинками Т15К6.	$P_z = 3,4$ кН	См. пример [11]

Отсутствие в современных отечественных справочниках по режимам резания сведений о точности формул и таблиц в части усилий резания ограничивает их применение, особенно

в качестве основы расчётных модулей современных CAD/CAM/CAE/PDM – систем.

Коэффициент резания как «основное значение удельной силы резания» в современной немецкими учёными форме широко и успешно используется в Германии для оценки усилия резания и обрабатываемости резанием в производственных условиях. Результаты обзора показывают, что оценка усилия резания и обрабатываемости металлов по усовершенствованному коэффициенту резания вполне целесообразна, что подтверждается также использованием справочных сведений об «основном значении удельной силы резания» в современных немецких справочниках по обработке материалов резанием. А в связи с возрастающим применением импортного инструмента целесообразно обратить внимание на использование в производственных условиях современных немецких справочников по назначению режимов резания с переводными сравнительными таблицами марок обрабатываемых и инструментальных материалов.

Таким образом, в литературных источниках имеется значительное количество разнообразных вариантов предварительного расчёта сил резания как аналитических, так и чисто экспериментальных, пригодных для использования и в конкретных случаях, и для априорных оценок. При этом их конкретное использование связано с наличием или отсутствием тех либо иных исходных данных и их конкретного воплощения.

Анализ вышеприведённых источников свидетельствует, что применение в экспериментальных зависимостях при расчётах усилий резания допущения о постоянстве и независимости друг от друга показателей над t и s , - допущения о независимости поправочных коэффициентов, а также потеря размерности в расчётных формулах с дробными показателями над t и s не позволяют корректно использовать экспериментальные формулы при строгих аналитических расчётах.

Сведения, полученные по результатам обзора, а также факты повсеместного широкого использования до настоящего времени чисто опытных данных для определения усилий и режимов резания материалов и наличия огромного количества факторов, влияющих на процесс резания, подтверждают весьма высокую сложность системы резания и её составляющих [5,18,21,22], что, вероятно, препятствует созданию простой фундаментальной теории в рамках исключительно механики резания. И в этом контексте важным представляется мнение автора работы [18] обо всё ещё недостаточном развитии теории резания как фундаментальной науки по сравнению, например, с теорией обработки давлением.

Именно поэтому современные усилия теоретиков в области обработки материалов резанием сосредоточены на изысканиях частных и универсальных аналитических закономерностей изменения сил резания при повышенной точности их определения (например, до 5%), имея в виду зависимость от весьма значительного числа постоянных (или условно постоянных) параметров, а также переменных факторов, что делает задачу весьма сложной, требующей использования объёмных математических вычислений [2,3,5,18-22].

Выводы

Коэффициент резания как нестандартизованная величина удельной силы резания при постоянных условиях определения имеет некоторые недостатки: определение его величины при избыточно жёстких постоянных, но не всегда идентичных условиях. Но, вероятно, после некоторой доработки по уточнению его исходных параметров коэффициент резания может быть вполне пригоден для производственных оценочных расчётов усилия резания, а также - оценки обрабатываемости материалов резанием. К сожалению, в отечественной практике коэффициент резания в настоящее время почти не используется, а при назначении режимов резания в основном подменён экспериментальными сведениями из справочников, не содержащих точностных показателей.

Отсутствие в современной отечественной справочной литературе по режимам резания сведений о точности формул и таблиц, в том числе и в части усилий резания, весьма ограничивает их применение, особенно в качестве основы расчётных модулей современных CAD/CAM/CAE/PDM – систем. Потому весьма целесообразно провести работу по совершенствованию отечественных справочников по режимам резания в части нормирования точно-

сти справочных данных.

Коэффициент резания как «основное значение удельной силы резания» в современной немецкими учёными форме в связи с возрастающим применением импортного инструмента целесообразно использовать, черпая его величины из современных немецких справочных изданий по назначению режимов резания, но обязательно в комплекте с переводными сравнительными таблицами отечественных марок обрабатываемых и инструментальных материалов.

Используемую иногда при оценочных расчётах удельную силу резания не следует путать с коэффициентом резания (нормированным удельным давлением, измеряемым в жёстко заданных условиях) и не рекомендуется использовать для примерных расчётов из-за существенных колебаний её величины.

Перечисленные мероприятия, совместно с совершенствованием аналитических алгоритмов расчёта усилий резания, позволят не только повысить технологический уровень отечественных предприятий, но также дадут возможность разработчикам расчётных модулей CAD/CAM/CAE/PDM – систем установить реальный уровень точности программ автоматизированных расчётов режимов резания.

Литература

1. Грановский Г.И., Грановский В.Г. Резание металлов: Учебник для машиностр. и приборостр. спец. вузов.— М.: Высш. шк., 1985. 304 с.
2. Развитие науки о резании металлов /Под ред. Н.Н. Зорева. М., 1967. 416 с.
3. Армарего И.Дж.А., Браун Р.Х. Обработка металлов резанием. Пер. с англ. В.А. Пастунова. М., «Машиностроение», 1977. 325 с.
4. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов. М., «Машиностроение», 1975. 344 с.
5. Васин С.А., Верещака А.С, Кушнер В.С. Резание материалов: Термомеханический подход к системе взаимосвязей при резании: Учеб. для техн. вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 448 с.
6. Вульф А.М. Резание металлов. Изд. 2-е. Л., «Машиностроение» (Ленингр. отд-ние), 1973. 496 с.
7. М. Даниелян. Резание металлов и инструмент. Машгиз. Москва.: – 1950, 451 с.
8. Резание конструкционных материалов, режущие инструменты и станки. Под ред. проф. П.Г. Петрухи. Изд. 2-е, перераб. и доп. М., Машиностроение, 1974, 616 с.
9. Garant. Cutting Pilot Hoffmann Group. Справочник по обработке резанием. ФРГ. 2009. 842 с. www.garant-tools.com, www.iwu.fraunhofer.de.
10. Справочник по технологии резания материалов. В 2-х кн. Кн. 1./Ред; нем. изд.: Г. Шпур, Т. Штеферле; Пер. с нем. В. Ф. Колотенкова и др.; Под ред. Ю. М. Соломенцева. — М.: Машиностроение, 1985. — 616 с, ил.
11. Панкин А.В. Обработка металлов резанием. М.: Машгиз, 1961. 520 с.
12. Резание металлов. Филоненко С.Н. «Техніка», 1975. 232 с.
13. Справочник технолога – машиностроителя. В 2-х т. Т.2/Под ред. А.М. Дальского, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова, А.Г. Сулова. – 5-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение-1, 2001г. 912с.
14. Справочник по обработке металлов резанием/Ф.Н. Абрамов, В.В. Коваленко, В.Е. Любимов и др. – К.: Техніка, 1983. – 239 с.
15. В.Н. Баранчиков, А.С. Тарапанов, Г.А. Харламов. Обработка специальных материалов в машиностроении: Справочник. М.: Машиностроение, 2002. 264 с.
16. Гузеев В.И., Батуев В.А., Сурков И.В. Режимы резания для токарных и сверлильно-фрезерно-расточных станков с числовым программным управлением: Справочник / Под ред. В.И. Гузеева. М.: Машиностроение, 2005. 368 с.
17. Теория резания. Физические и тепловые процессы в технологических системах: Учеб. для вузов /П.И. Ящерицын, М.Л. Еременко, Е.Э. Фельдштейн. Мн.: Выш. шк., 1990. 512 с.
18. Воронцов А.Л. Разработка современной теории механической обработки металлов. Ч. 4. Определение основных параметров процесса резания / Воронцов А.Л. // Производство про-

ката. 2008. № 4. С. 3-10.

19. Трент Е.М. Резание металлов: Пер. с англ./Пер. Г.И. Айзенштока. М.: Машиностроение, 1980. 263 с.

20. А.А. Липатов, Ю.Л. Чигиринский, С.И. Кормилицын. Методика определения сил резания, действующих на задней поверхности режущего инструмента //СТИН. 2010. №8. С. 6-8.

21. Старков В.К. Физика и оптимизация резания материалов /Старков В.К. - М.: Машиностроение, 2009. 639 с.

22. Ермаков Ю.М. Комплексные способы эффективной обработки резанием: Библиотека технолога. - М: Машиностроение, 2005. - 272 с: ил.

Создание компенсаторов термических напряжений для перспективного авиационного ГТД методами порошковой металлургии

Исаева Е.А., Перевозин С.А., Исаев Д.А.

Университета машиностроения,

Филиал «НИИД» ФГУП «НПЦ газотурбостроения «Салют»

d1mon_demon@mail.ru

Аннотация. В статье показано, что для реального внедрения в авиационные ГТД конструкционных керамических материалов необходимо в сопряжении металл-керамика использовать промежуточный элемент - компенсатор термических напряжений (металл-компенсатор-керамика). Обоснован один из путей создания компенсаторов - методом порошковой металлургии. Изложен перечень работ, необходимых для создания компенсаторов.

Ключевые слова: газотурбинные двигатели (ГТД), конструкционные керамические материалы (ККМ), температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР), компенсатор термических напряжений

Дальнейшее развитие авиационных ГТД требует применения новых материалов с более высокими эксплуатационными свойствами, а именно: жаростойкостью и износостойкостью [4, 5].

Работоспособность различных материалов в конструкциях узлов авиационных деталей в условиях высоких температур и окислительных сред с необходимым ресурсом показала, что, помимо жаропрочных сплавов, могут применяться керамические материалы, которые имеют низкую плотность, высокую стойкость к термической усталости, малую деформацию ползучести и легко выдерживают высокие температуры.

Основными требованиями, предъявляемыми ко всем антифрикционным материалам, являются минимальный коэффициент трения и высокая износостойкость. Эти свойства определяют минимальные потери энергии в узлах трения и максимальный срок их службы.

Керамические материалы, обладающие более высокими эксплуатационными свойствами, наряду с этим имеют и другие свойства, значительно отличающиеся от металлических материалов, используемых в авиационных ГТД, а именно: большую хрупкость; температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР), значительно отличающийся от металлических материалов; высокую твердость [1-3].

Именно эти свойства создают значительные препятствия на пути применения их в перспективных авиационных ГТД. Связано это с тем, что детали из керамических материалов в авиационных ГТД работают в сопряжении с деталями из металлических материалов.

В процессе эксплуатации авиационных ГТД при изменении температуры деталей в них возникают термические напряжения из-за разности температурного коэффициента линейного расширения у металлических и конструкционных керамических материалов.

Учитывая тот факт, что температурный интервал, в котором происходит изменение температуры деталей авиационного ГТД, очень широк, термические напряжения также могут достигать значительных величин, часто превышающих допустимые напряжения.