

УДК 621.91.001.5

Ю. А. НОВОСЕЛОВ, канд. техн. наук (Гомельский ГТУ им. П. О. Сухого)

О методологии исследования, познания и обучения теории резания

Излагается взгляд автора на существующую систему исследования, изучения и преподавания в вузах теории резания как базовой учебной дисциплины при подготовке инженеров-машиностроителей. Предлагается иной подход к этой системе, основанный на методологических исследованиях всего исторически накопленного материала, его реструктурировании и оптимизации, что показано на примере исследования сил резания.

The author's idea of the present system of research, study and teaching cutting theory in the higher institutions as a base subject for the engineering industry specialists' training. A different approach to the system is suggested, based on methodological studies of the historically accumulated data, its restructuring and optimisation, which is illustrated by an example of cutting forces research.

Изложение теории резания в вузах машиностроительного профиля традиционно строилось на основе последовательного освещения накопленного к моменту обучения объема исследовательского, главным образом экспериментального, материала, причем познавательный материал курса рассматривался по мере его накопления отдельно в рамках каждого вида обработки резанием, например точения, строгания, сверления и т. д. Поэтому в сознании обучающихся в процессе освоения дисциплины формировалось устойчивое убеждение в том, что каждый вид обработки сугубо индивидуален, состоит только из комплекса специфических особенностей и не имеет ничего общего с другими видами обработки резанием. Окончивший вуз специалист, становясь со временем профессионалом и не сомневаясь в правильности приобретенных убеждений, продолжал активно их тиражировать, работая преподавателем вуза, исследователем или руководителем творческого инженерного коллектива.

Так было в прошлом веке. Но наступил новый век, произошла смена общественно-политической формации, трансформировалась государственная система, изменились мораль, нравственность, сознание, культура нации и экономический базис государства. К сегодняшнему дню катастрофически вырос объем научно-технической информации, в том числе и в теории резания, а времени и средств на его освоение студентами и специалистами (а также и преподавателями вузов) остается все меньше — оно сжимается под тяжестью других жизненно важных проблем. Поэтому учебный процесс в вузах (в частности машиностроительного профиля) представляет собой сегодня процесс полуобучения

полузнаниям. Это, естественно, отражается и на производстве, так как молодой специалист, обученный в вузе одним частностям, погружается на производстве в омут других частностей и полученные им в вузе знания становятся на практике бесполезными. Конечно, проработав на конкретном участке завода 3—5 лет, он освоит эти новые частности, но для такой работы ему не нужен инженерный диплом — вполне достаточно диплома техника. Выпускник же вуза должен быть большим профессионалом в своей области.

Выход из такой ситуации можно найти в коренной методологической переработке [1] всего исторически накопленного информационного материала по любой технической дисциплине. Эта переработка заключается в концентрации всей имеющейся информации по дисциплине, ее анализе, отбрасывании второстепенных, устаревших и мелких сведений и фактов, выявлении важнейших понятийных элементов этого знания и синтезе из них обобщенной структуры рассматриваемой познавательной системы. Такая система не является суммой всевозможных известных конкретностей, а представляет собой своеобразную интеграцию наиболее существенных и важных признаков всех этих конкретностей в одном несуществующем (собирательном) их образе. Рассмотрим эти общие (философские) рассуждения на конкретной инженерной машиностроительной дисциплине — теории резания.

Ход и исход (результат) процесса резания зависят от чрезвычайно большого числа обстоятельств: обрабатываемого материала и материала режущей части инструмента; выбранной кинематической схемы процесса; модели металлорежущего станка; типа используемого режущего инструмента; конструкции станочного приспособления и др. В современных условиях число возможных вариантов каждого из перечисленных обстоятельств доходит до 10^3 . Следовательно, общее число ситуационных экспериментальных инвариаций составляет 10^{21} . Чтобы исследовать какой-нибудь физический аспект процесса, например три силы резания (P_x , P_y и P_z) с варьированием трех элементов режима резания (v , S и t) и, как минимум, четырех важнейших углов режущего инструмента (γ , α , ϕ и λ), нужно провести еще 10^{10} экспериментальных инвариаций, т. е. общее их число составляет уже 10^{31} . Но ведь в каждой из них неизбежно приходится изменять и численные значения последних семи параметров (задавать хотя бы по четыре их значения), повторяя каждый опыт для большей дос-

товерности минимум 3 раза. В итоге общее число опытов составляет суперастрономическую цифру 10^{38} . Таким образом, становится очевидной вся нереальность исследования любого показателя процесса резания, например сил резания, по традиционной методике до практически желаемого конца, ее несостоятельность и абсурдность. А ведь есть еще и множество других показателей процесса резания, например температура, деформация срезаемого слоя, качество обработанной поверхности и т. д. Их исследования проводятся сегодня по той же самой методике, что исследование сил резания.

На основе анализа рассматриваемой проблемы и методологических исследований [1, 2], автор берет на себя смелость утверждать, что огромный накопленный в ходе этих многолетних исследований фактологический материал о сути процесса резания, а также затраченные на его получение колоссальные материальные и людские ресурсы не дали той высокой научной и практической отдачи, которая при таких затратах в принципе была возможна. Эффективность этих исследований могла бы быть значительно выше, если бы к вопросу о фундаментальных понятиях теории резания, их исследованиям и экспериментированию в свое время подошли с позиций серьезного методологического анализа. Отсюда можно сделать вывод о том, что человечество, целый век активно ища истину, на самом деле ушло в обратную сторону от нее.

Правда, в первой половине XX века отдельные ученые интуитивно приходили все-таки к мысли о несовершенстве традиционного метода исследования сил резания, и ими делались попытки усовершенствовать его. Они предлагали по аналогии с сопроматом ввести в рассмотрение некую удельную силовую характеристику, представляющую собой частное от деления главной составляющей P_z силы резания на площадь $f = St$ сечения срезаемого слоя. Эта характеристика исследователями называлась и обозначалась по-разному: удельное давление резания p , силовой коэффициент резания K и т. д. По смыслу же и по размерности она эквивалентна (подобна) некоторому нормальному напряжению в срезаемом слое. Введение такой характеристики было весьма заманчиво, так как силу резания можно было бы определять просто путем умножения значения этой характеристики на площадь сечения срезаемого слоя.

Однако такие попытки усовершенствования традиционного метода исследования сил резания закончились неудачей, так как эта характеристика (используем название "удельное давление p резания") зависит от условий резания, что видно из соотношения

$$p = \frac{P_z}{f} = \frac{C_{P_z} t^{x_{P_z}} S^{y_{P_z}} v^{z_{P_z}} K_{P_z}}{St} = C t^{x_{P_z}-1} S^{y_{P_z}-1} v^{z_{P_z}},$$

где $C = C_{P_z} K_{P_z}$.

Это обстоятельство хорошо иллюстрируется результатами исследований [3, 4] удельного давления p реза-

Прочность конструкционных сталей σ_B , кгс/мм ²	Удельное давление p (кгс/мм ²) при площади сечения f (мм ²) срезаемого слоя						
	1	2	3	5	8	10	20
30 ÷ 40	170	153	147	134	130	125	113
40 ÷ 50	210	190	180	170	160	155	140
50 ÷ 60	250	230	220	210	192	185	170
60 ÷ 70	300	270	260	240	230	225	200
70 ÷ 85	355	325	310	290	270	260	240

ния с изменением в широких пределах площади f [от 1 до 20 мм²] сечения срезаемого слоя и временного сопротивления σ_B (от 30 до 85 кгс/мм²) при обработке большой гаммы углеродистых конструкционных сталей при глубине резания $t = 5$ мм (таблица).

Разработанный нами метод, описанный ниже, по-прежнему решает эту проблему. Опираясь на терминологические стандарты по обработке резанием [2], мы вновь вернемся к проблеме усовершенствования метода исследования сил резания на основании созданной нами обобщенной логической модели процесса резания, разработки классификации кинематических принципов видов резания, установлении на этой основе единой системы проведения координатных осей процесса резания, а следовательно, и единого принципа разложения силы резания для любой разновидности обработки на универсальные составляющие, однозначно связанные с самим процессом резания.

Но давайте повернем историю вспять и начнем рассуждения на заданную тему с самого начала. Будем считать процесс резания одним из видов деформирования материала с разрушением, как, например, срез, сжатие, растяжение и др. Если это так, то изначально должна существовать простая принципиальная схема такого деформирования, свободная от всевозможных геометрических и технологических осложнений (криволинейностей, не прямых и ненулевых углов, видов обрабатываемых деталей, форм обработанных поверхностей, способов осуществления резания, конструкций станков и т. д.). Такая схема, предлагаемая нами, приведена на рис. 1.

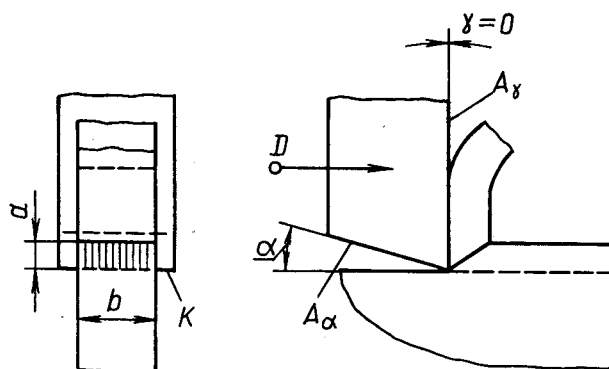


Рис. 1

Простота этой схемы, которую можно назвать также логической моделью процесса резания, обеспечивается следующими условиями:

- 1) резание осуществляется только за счет одного прямолинейного движения резания D ;
- 2) принято свободное резание, т. е. резание, при котором оба конца режущей кромки не участвуют в резании;
- 3) режущая кромка K прямолинейна;
- 4) передняя A_γ и задняя A_α поверхности — плоские;
- 5) значение переднего угла γ принято нулевым как пограничное между положительной и отрицательной областями его практически используемых значений;
- 6) значение заднего угла α принято равным 12° как среднее из рекомендуемых значений при обработке различных материалов разными инструментами из различных инструментальных материалов;
- 7) значение угла λ наклона режущей кромки принято нулевым;
- 8) резание осуществляется без охлаждения.

Принципиальная схема процесса резания (логическая его модель) (см. рис. 1) имеет один небольшой недостаток: обеспечить на станках (строгальных) постоянство скорости v прямолинейного движения D резания невозможно. С целью его исключения предлагается замена принципиальной схемы процесса резания адекватной ей реальной схемой, представленной на рис. 2 в двух вариантах:

- а) с главным вращательным движением D_r^3 заготовки и прямолинейным движением D_s^H подачи инструмента вдоль оси главного движения (метод токарной обработки);
- б) с главным вращательным движением D_r^H инструмента и прямолинейным движением D_s^H подачи инструмента вдоль оси главного движения (метод осевой обработки).

На рис. 2 проведены также координатные оси x , y и z (последняя проектируется в точку) так называемой нами технологической системы координат процесса резания: ось x проводится параллельно оси главного вращательного движения D_r , ось y — по радиусу траектории этого движения, а ось z — по направлению вектора v

скорости главного движения. При такой постановке вопроса других принципов проведения координатных осей просто не существует, а координатные составляющие любых линейно векторных характеристик процесса (например, сил резания) для любых разновидностей резания имеют однозначные смысл, расположение и влияние на процесс резания и его результаты.

В обеих схемах на рис. 2 подача S совмещается с толщиной a срезаемого слоя, а глубина t резания — с шириной b срезаемого слоя, что также упрощает исследование любой разновидности процесса резания. В случае же использования осевой обработки (см. рис. 2, б) необходимо совместить ось главного вращательного движения с осью заготовки во избежание возможных радиальных колебаний. И все же первая схема предпочтительнее, так как она дает сразу координатное разложение экспериментальной информации (по осям x , y и z), во втором же случае придется делать некоторые пересчеты. Поэтому все дальнейшие рассуждения будут связаны со схемой на рис. 2, а.

Назовем процесс, изображенный на рис. 2, а, базовым процессом резания, на основе которого и будем формировать методологию исследования. Введем в рассмотрение понятие эталонного опыта базового процесса резания, под которым будем понимать опыт, в котором независимые параметры принимают жестко фиксированные (стандартизованные) значения. Пусть эталонным опытом будет опыт с параметрами a_0 , b_0 , v_0 . Заметим, что такая постановка вопроса, т. е. проведение опытов при фиксированных параметрах, как известно, используется в сопротивлении материалов — там при исследовании поведения изучаемых материалов в условиях того или иного вида деформации, например при растяжении, используются стандартные (эталонные) образцы с конкретными численными значениями их размеров. Если бы в сопромате использовались произвольные образцы, то в таких опытах исследуемые предельные напряжения принимали бы различные значения при разных размерах образцов, и тогда говорить о напряжениях как о свойствах материалов не представлялось бы возможным. Поскольку резание также является процессом деформирования (правда, более сложного вида), то и к нему с полным основанием можно применить эту методику.

Если в условиях эталонного опыта провести исследование какого-нибудь показателя (показателей) процесса резания (например, коэффициента усадки стружки, сил резания, температуры резания и др.), то полученное численное значение этого показателя (показателей) в эталонном опыте будет отображать уровень физического состояния этого процесса при взаимодействии конкретных инструментального и обрабатываемого материалов (и в данный момент времени, если рассматриваемый процесс резания нестационарен). При другом же сочетании инструментального и обрабатываемого материалов в этом же эталонном опыте численное значение исследуемого показателя процесса резания будет другим, но оно также будет единственным и будет также однозначно отображать эту новую ситуацию (никаких иных значений в каждом из этих случаев не потребует-

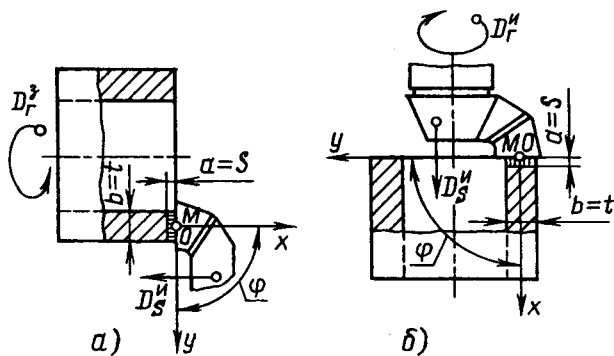


Рис. 2

ся). При этом возникает только один вопрос: какие конкретные численные значения нужно придать параметрам a_0, b_0, v_0 эталонного опыта? Ответ на него лучше всего поискать путем анализа исследований сил резания, который приводится ниже.

Общеизвестные эмпирические степенные зависимости координатных составляющих силы резания от элементов режима в базовом процессе резания существенно упрощаются:

радиальная сила $P_y = 0$;

осевая сила P_x (нормальная к поверхности резания), как показали многочисленные исследования (в том числе и исследования автора [5]), меньше силы P_z , мало зависит от толщины a срезаемого слоя и в большей степени обусловлена упругими свойствами обрабатываемого материала и величиной действующей силы P_z , т. е. она пропорциональна этой силе $P_x \approx kP_z$, где k — коэффициент пропорциональности;

тангенциальная сила P_z в условиях базового процесса резания остается определяющей и ее традиционная зависимость от элементов режима резания

$$P_z = C_{P_z} t^{x_{P_z}} S^{y_{P_z}} v^{z_{P_z}} K_{P_z} \quad (A)$$

в нашем случае трансформируется в зависимость

$$P(a, b, v) = C_P a^y b^x v^z. \quad (1)$$

Зависимость (1) в условиях эталонного опыта базового процесса резания превращается в функционально-числовую связь:

$$P_0(a_0, b_0, v_0) = C_P a_0^y b_0^x v_0^z, \quad (2)$$

где $P_0(a_0, b_0, v_0)$ — единственное численное значение главной составляющей силы резания в эталонном опыте базового процесса; a_0, b_0, v_0 — принятые в эталонном опыте базового процесса численные значения элементов режима резания; x, y, z — численные значения показателей степени при соответствующих элементах режима резания.

Произведем с формулой (1) некоторые структурные преобразования. Умножив и разделив правую части формулы (1) на совокупность параметров $(a_0^y b_0^x v_0^z)$ эталонного опыта [см. формулу (2)], получим:

$$P_0(a, b, v) = C_P a_0^y b_0^x v_0^z \left(\frac{a}{a_0}\right)^y \left(\frac{b}{b_0}\right)^x \left(\frac{v}{v_0}\right)^z.$$

Выражение без скобок есть сила $P_{ЭТ}$ резания в эталонном опыте базового метода обработки, т. е.

$$P_0(a, b, v) = P_{ЭТ} \left(\frac{a}{a_0}\right)^y \left(\frac{b}{b_0}\right)^x \left(\frac{v}{v_0}\right)^z. \quad (3)$$

После умножения и деления формулы (3) на отношение $(a/a_0)^x$ получим:

$$P_0(a, b, v) = P_{ЭТ} \left(\frac{ab}{a_0 b_0}\right)^x \left(\frac{a_0}{a}\right)^{x-y} \left(\frac{v}{v_0}\right)^z,$$

т. е. будем иметь

$$P_0(a, b, v) = P_{ЭТ} \left(\frac{f}{f_0}\right)^x \left(\frac{a_0}{a}\right)^{x-y} \left(\frac{v}{v_0}\right)^z, \quad (4)$$

где f — площадь сечения срезаемого слоя в исследуемом процессе; $f_0 = a_0 b_0$ — площадь сечения срезаемого слоя в эталонном опыте базового вида обработки.

Таким образом, сила резания в базовом виде обработки оказалась представленной произведением некоторой заранее известной или легко определяемой путем эксперимента эталонной силы $P_{ЭТ}$ на комплекс возведенных в некоторую степень безразмерных коэффициентов, выражающих собой особенности площади сечения срезаемого слоя, толщины срезаемого слоя и скорости резания в базовом процессе по сравнению с эталонным его опытом.

В качестве эталонного опыта, как это следует из формулы (4), более целесообразно выбрать такой опыт, в котором площадь срезаемого слоя была бы равна единице ($f_0 = 1$). При этом первая скобка в формуле (4) упростится, а сила $P_{ЭТ}$ станет численно равной условно-расчетному напряжению сжатия в срезаемом слое в условиях эталонного опыта. Желательно также, чтобы эталонный опыт имел такие значения a_0 и b_0 , которые, с одной стороны обладали бы значительной частотой производственно-практического использования, с другой — простотой численных значений и удобством их арифметического взаимодействия с другими числами. Названным требованиям отвечает опыт с параметрами $a_0 = 0,2$ мм, $b_0 = 5$ мм. Примем также $v_0 = 20$ м/мин, чтобы можно было одним экспериментом обслуживать любые разновидности резания любым инструментальным материалом.

Итак, установив основные параметры эталонного опыта ($a_0 = 0,2$ мм, $b_0 = 5$ мм, $v_0 = 20$ м/мин) и приняв во внимание, что в условиях свободного прямоугольного резания по многочисленным литературным данным $x \approx 1$, запишем формулу (4) в окончательном виде:

$$P_0(a, b, v) \cong q f \left(\frac{0,2}{a}\right)^{1-y} \left(\frac{v}{20}\right)^z, \quad (5)$$

где q — удельная эталонная (в условиях эталонного опыта) сила резания, численно равная условно-расчетному напряжению сжатия в срезаемом слое.

Заметим, что удельная эталонная сила q в формуле (5) принципиально отличается от структурно аналогичных величин, известных из литературы под названиями "удельное давление резания" и "коэффициент резания", упомянутых выше, тем, что она не зависит от подачи и численно равна силе резания в эталонном опыте базового метода при единичной площади сечения срезаемого слоя.

Введя обозначения $K_a = \left(\frac{0,2}{a}\right)^{1-\gamma}$ и $K_v = \left(\frac{v}{20}\right)^z$, запишем теперь формулу (А) для определения главной составляющей силы P_z резания в любом процессе резания в окончательном виде (в новой интерпретации):

$$P_z = qfK_aK_vK_1K_2K_3\dots K_n, \quad (\text{Б})$$

где q — своеобразное напряжение, кг/мм², возникающее в конкретном обрабатываемом материале в условиях деформации резания; f — площадь сечения срезаемого слоя, мм²; K_a и K_v — безразмерные поправочные коэффициенты соответственно на толщину срезаемого слоя и скорость резания в реальном процессе резания относительно их значений в эталонном опыте базового процесса резания; $K_1, K_2, K_3, \dots, K_n$ — безразмерные поправочные коэффициенты на различного рода другие предельно частные отличия реального процесса резания от условий эталонного опыта базового процесса резания, например: по переднему углу γ — K_1 ; по заднему углу α — K_2 ; по углу наклона режущей кромки γ — K_3 ; по форме сечения срезаемого слоя — K_4 ; по степени стесненности процесса резания — K_5 ; по радиусу кривизны траектории резания — K_6 и т. д.

Полученная формула (Б) обладает следующими достоинствами:

- 1) отвечает правилам теории размерностей, имеет физический смысл и проста по структуре;
- 2) пригодна для любых разновидностей лезвийной обработки при любом сочетании условий резания;
- 3) входящая в формулу удельная эталонная сила q представляет собой некоторую механическую характеристику обрабатываемого материала в условиях резания, определяя его обрабатываемость;
- 4) дает возможность обобщения имеющихся в литературе результатов исследования сил резания.
- 5) подсказывает оптимальное направление дальнейших исследований сил резания.

Рассмотренный здесь способ исследования сил резания подтвержден авторским свидетельством [5].

Описанный метод обработки результатов силовых исследований был применен к результатам, представленным в таблице. Обработка нами этих данных с учетом формулы (Б) позволила представить их в виде следующего математического выражения:

$$P_z = 4,625\sigma_B ab \left(\frac{0,2}{a}\right)^{0,13},$$

где $q = 4,625\sigma_B$ и есть механическая характеристика любой углеродистой конструкционной стали (с любым σ_B) в условиях резания (линейно зависит от σ_B , а $K_a = (0,2/a)^{0,13}$ — поправочный коэффициент на любую реальную толщину срезаемого слоя a .

Описанная методология исследования процесса резания и познания его внутренней сущности касается не только сил резания (это лишь пример ее применения) — она распространяема буквально на все физические аспекты и явления процесса резания. При ее применении объем необходимых и достаточных экспериментов и исследований сокращается более чем на два порядка, повышается глубина познания, сама теория резания переходит из системы большого количества частных знаний в науку. Значительно повышается эффективность ее преподавания в вузах и подготовки высококвалифицированных специалистов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ящерицын П. И., Новоселов Ю. А. Методологические вопросы теории резания // Изв. вузов. Машиностроение. 1982. № 6, 8.
2. ГОСТ 25762—83. Обработка резанием. Термины, определения и обозначения общих понятий. М.: Изд-во стандартов. 1983. 41 с.
3. Глебов С. Ф. Теория наиболее выгоднейшего резания металлов. Т. 1. М.; Л.: Госмашмедиздат, 1933.
4. Ачеркан Н. С. Расчет и конструирование металлорежущих станков. М.; Л.: ОНТИ. 1936.
5. Способ определения сил резания: А. с. 834416: СССР.

