

### **Цель работы:**

- 1) ознакомиться с источниками возникновения сил резания, составляющими равнодействующей силы  $P_z$  и соотношением между ними;
- 2) ознакомиться с методами измерения сил резания и применяемым оборудованием;
- 3) изучить устройство динамометра ДК-1 и получить навыки его тарирования;
- 4) определить опытным путем зависимость вертикальной составляющей силы резания от элементов режима резания;
- 5) приобрести практические навыки в выполнении исследований, обработке и анализе опытных данных и их обобщении.

**Оборудование рабочего места.** Для выполнения лабораторной работы применяются следующие оборудование, приборы, инструменты, приспособления и материалы:

- токарно-винторезный станок модели 1К62 или любой другой такого же типоразмера;
- однокомпонентный механический динамометр ДК-1;
- резцы твердосплавные токарные проходные прямые с различной геометрией лезвия;
- набор шаблонов и универсальный угломер ЛМТ для контроля радиуса закругления вершины каждого резца  $r_v$  и углов его заточки ( $\gamma$ ,  $\alpha$ ,  $\varphi$ ,  $\varphi'$ ,  $\lambda$ );
- тарировочное устройство к динамометру ДК-1;
- штангенциркуль марки ШЦ-2-300-0,05 ГОСТ 116-80 с пределом измерения 300 мм, ценой деления 0,05 мм и линейка металлическая;
- заготовки длиной 300–450 мм и диаметром 60–120 мм из сталей разных марок.

## **1. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ**

1. При самостоятельной работе, пользуясь настоящими методическими указаниями и наглядными пособиями, изучить:

- общие сведения об источниках возникновения сил резания, разложении общей силы на составляющие, их влияние на заготовку и узлы станка;
- конструкцию динамометра ДК-1 и методику его тарирования;
- содержание табл. 3 и вычертить ее для последующей записи результатов исследований, проводимых во время занятий.

2. Во время занятий выполнить:

- замеры геометрических элементов резца и заготовки (каждому звену задается своя геометрия резца и характеристики заготовки);
  - тарирование динамометра ДК-1 с построением графика, позволяющего расшифровывать показания индикатора;
  - исследовать влияние глубины резания  $t$ , подачи  $S$  и скорости резания  $V$  на вертикальную составляющую силу  $P_z$  (режим обработки  $t$ ,  $S$ ,  $V$  задается каждому звену свой);
  - построить графики функциональных зависимостей  $P_z = f(t)$ ;  $P_z = f(S)$  и  $P_z = f(V)$  и определить значения коэффициентов  $C_{1P_z}$ ,  $C_{2P_z}$ ,  $C_{3P_z}$  и показателей степеней при глубине  $X_{P_z}$ , подаче  $Y_{P_z}$  и скорости  $n_{P_z}$ .
3. Составить экспериментальные частные расчетные формулы, связывающие силу  $P_z$  соответственно с глубиной, подачей и скоростью резания.
  4. Определить значение коэффициента  $C_{P_z}$ , входящего в обобщенную зависимость (21). Проанализировать степень влияния  $t$ ,  $S$  и  $V$  на вертикальную составляющую силу  $P_z$ .
  5. Установить статистическую ошибку опыта проведенных исследований.
  6. Сопоставить полученные данные с нормативными для аналогичных условий и с данными другого звена или с результатами компьютерной обработки. Сделать выводы.
  7. Убрать рабочее место.
  8. Оформить и сдать отчет.

## 2. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать ответы на следующие вопросы:

1. Общие сведения об источниках возникновения сил резания, разложение общей силы на составляющие, их влияние на заготовку и узлы станка.
2. Характеристику резца (тип, марка материала, его расшифровка, геометрические параметры лезвия).
3. Таблицу с результатами измерений (опытными данными).
4. Графики функциональных зависимостей  $P_z = f(t)$ ;  $P_z = f(S)$  и  $P_z = f(V)$ . Расчеты по обработке результатов опытных данных, экспериментальные частные расчетные формулы, связывающие силу  $P_z$  соответственно с глубиной, подачей и скоростью резания.
5. Расчеты по определению обобщенного коэффициента  $C_{P_z}$ , входящего в зависимость (21). Анализ степени влияния  $t$ ,  $S$  и  $V$  на вертикальную составляющую силу  $P_z$ .

6. Определение статистической ошибки опыта проведенных исследований.

### 3. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

В процессе резания на лезвие инструмента (резца, фрезы, сверла и пр.) действуют следующие силы сопротивления перемещению его по траектории относительного рабочего движения:

- сила упругой деформации снимаемого слоя и обработанной поверхности;
- сопротивление обрабатываемого материала пластической деформации стружкообразования;
- сопротивление пластически деформированных металлов разрушению в местах возникновения новых поверхностей;
- сопротивление срезаемой стружки дополнительной деформации изгиба и ломанию;
- силы трения на лезвии и других трущихся поверхностях рабочей части инструмента.

Вышеназванные силы сопротивления перемещению лезвия по траектории относительного рабочего движения нестабильны. Их значения могут колебаться на  $\pm 5-10\%$  от средних величин. Тем не менее их можно показать несколько в упрощенном виде схематически (рис. 1, а).

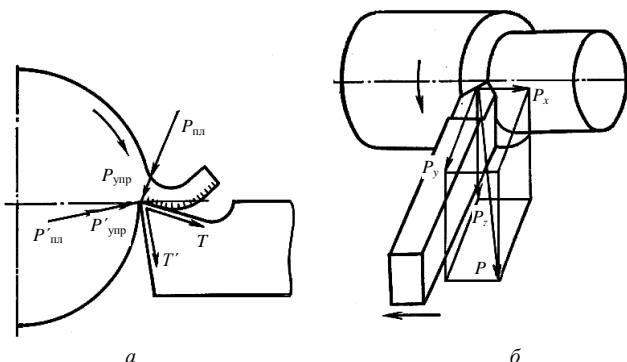


Рис. 1. Схема сил, действующих на токарный резец: а – к передней поверхности резца; б – разложение силы резания на составляющие

Со стороны срезаемого слоя нормально к передней поверхности резца (рис. 1, а) действуют сила упругой деформации  $P_{упр}$  и сила пла-

стической деформации  $P_{пл}$ . Со стороны обработанной поверхности нормально к задней поверхности резца действуют также силы упругой  $P'_{упр}$  и пластической деформации  $P'_{пл}$ . При относительном перемещении резца и заготовки возникают силы трения по передней и задней поверхности резца:

$$T = \mu(P_{упр} + P_{пл}) \text{ и } T' = \mu'(P'_{упр} + P'_{пл}), \quad (1)$$

где  $\mu$  и  $\mu'$  – коэффициенты трения.

Эта система сил приводится к одной силе  $P$  (см. рис. 1, б), называемой силой резания. Ее принято выражать в ньютонах (Н) или килоньютонах (кН). В практических расчетах используют составляющие силы резания:

$P_z$  – главная составляющая силы резания, или тангенциальная (вертикальная) сила, касательная к поверхности резания и совпадающая с направлением главного движения. По ней рассчитываются мощность, затрачиваемая на резание, мощность электродвигателя и детали механизма главного движения станка;

$P_x$  – осевая сила, или сила подачи, действующая параллельно оси заготовки в направлении, противоположном движению подачи. По ней, с учетом веса движущихся частей суппорта и сил трения на поверхностях направляющих станины от действия сил  $P_z$  и  $P_y$ , рассчитывается мощность, необходимая для осуществления движения подачи, а также детали коробки подач, фартука и упорные подшипники;

$P_y$  – радиальная сила, направленная перпендикулярно к оси обрабатываемой заготовки. По ней рассчитывается станок на жесткость и радиальное давление на подшипники шпинделя.

Равнодействующая сила  $P$  (Н) представляет собой геометрическую сумму трех составляющих сил

$$\vec{P} = \vec{P}_z + \vec{P}_y + \vec{P}_x \quad (2)$$

и является диагональю параллелепипеда. Рассчитывается равнодействующая  $P$  (Н) по формуле

$$P = \sqrt{P_z^2 + P_y^2 + P_x^2}. \quad (3)$$

Бывают частные случаи разложения равнодействующей  $P$  только на две составляющие:  $P_z$  и  $P_y$ ;  $P_z$  и  $P_x$  (рис. 2).

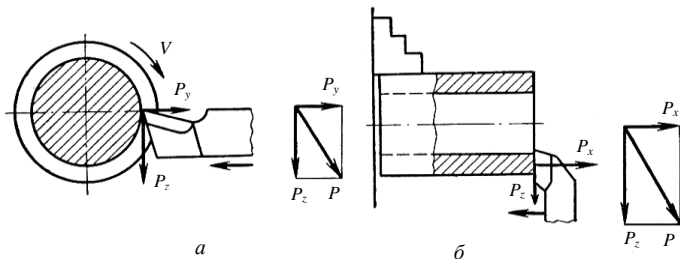


Рис. 2. Частные случаи разложения равнодействующей:  
*a* – при отрезании (разрезании) резцом с режущей кромкой, параллельной  
 оси заготовки; *б* – при резании трубы резцом с  $\varphi = 90^\circ$ ,  $\lambda = 0^\circ$

Экспериментально установлено, что при точении конструкционных сталей и чугунов резцом с геометрическими параметрами  $\varphi = 45^\circ$ ,  $\gamma = 15^\circ$ ,  $\lambda = 0^\circ$  имеется примерно следующее соотношение между указанными в зависимости (3) составляющими силами:

$$P_z : P_x : P_y = 1 : (0,4 - 0,5) : (0,3 - 0,4) \approx 1 : 0,45 : 0,35.$$

Для вышеприведенного частного случая

$$P = \sqrt{P_z^2 + (0,45P_z^2) + (0,35P_z^2)} \approx 1,14P_z. \quad (4)$$

В действительности эти соотношения значительно колеблются в зависимости от ряда факторов, влияние которых можно представить в виде функции

$$P = f(t, S, V, \gamma, \alpha, \varphi, \varphi', \lambda, r, h_3, k_{\text{охл}}, M_n, M_3), \quad (5)$$

где  $t$  – глубина резания, мм;

$S$  – подача (скорость подачи), мм/об;

$V$  – скорость резания, м/мин;

$\gamma$  – передний угол, град;

$\alpha$  – главный задний угол, град;

$\varphi$  – главный угол в плане, град;

$\varphi'$  – вспомогательный угол в плане, град;

$\lambda$  – угол наклона главной режущей кромки, град;

$r$  – радиус закругления вершины резца, мм;

$h_3$  – износ резца, мм;

$k_{\text{охл}}$  – фактор охлаждения или смазки в процессе резания;

$M_{\text{и}}$  – характеристика качества материала инструмента;

$M_3$  – характеристика качества обрабатываемой заготовки.

Из приведенного выражения видно, что сила резания является функцией многих переменных.

Это вызывает большую трудность при определении вида функции математическими методами, и поэтому до сих пор нет еще такого уравнения, которое бы полностью и строго учитывало все указанные выше факторы и основывалось бы на законах математики и физики.

Первые научные исследования сил резания были выполнены русским профессором К. А. Зворыкиным в 1892 г. После было проведено много исследований, но все еще не получено достаточного количества факторов, которые могли бы полностью обеспечить теоретическое решение приведенной выше функции. Однако на основе экспериментальных данных известно, как влияет изменение того или иного фактора резания на силу, а, зная влияние отдельных факторов, можно сделать обобщенные выводы для тех или других ограниченных условий и получить более простые формы уравнения зависимости сил резания от основных условий процесса резания металлов.

#### **4. ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СИЛ РЕЗАНИЯ И ИХ ТАРИРОВКА**

Для измерения составляющих силы резания и изучения влияния на них различных факторов применяют специальные приборы – динамометры. Динамометры в зависимости от количества измеряемых составляющих бывают одно- (например, для силы  $P_z$ ), двух- и трехкомпонентные ( $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$ ). По принципу действия динамометры подразделяются на электрические, механические и гидравлические. Каждый динамометр состоит из устройства, служащего для закрепления резца и разложения силы резания на составляющие, датчиков для преобразования измеряемых составляющих сил резания в механическое перемещение, электрическую емкость, силу электрического тока или давления жидкости регистрирующего устройства.

Применяемые методы измерения сил основаны на использовании упругих деформаций датчиков под воздействием нагрузки и различных явлений (механических, гидравлических, пневматических, магнитных и электрических).

К динамометрам предъявляются следующие требования:

– надежность и экономичность эксплуатации, для чего рекомендуется избегать применения сложных и дорогостоящих усилителей;

- простота тарирования прибора при минимальных затратах времени на подготовку его к работе;
- возможность легкой установки различных диапазонов измеряемых нагрузок при сохранении достаточной чувствительности прибора, т. е. способности реагировать на малые изменения нагрузок;
- минимальные измерительные перемещения (т. е. минимально возможные сдвиг и деформация деталей, воспринимающих нагрузку) для сохранения практически неизменных условий резания – сечения стружки, геометрии инструмента и пр.;
- малая инерционность при измерении, определяемая поставленной задачей (например, для измерения истинных значений сил резания требуются приборы, способные регистрировать колебания нагрузок, изменяющихся до 500 раз в секунду; при этом собственная частота колебаний прибора должна быть пяти-, восьмикратная).

Сравнительная оценка различных электрических динамометров приведена в табл. 1. Положительной оценке того или иного свойства соответствует знак «+», а отрицательной – знак «-», отсутствию как положительных, так и отрицательных качеств отвечает знак «0».

Таблица 1. Сравнительная характеристика электрических динамометров

Методы измерения	Измерительное смещение	Размеры	Диапазон измерений	Точность	Подверженность помехам	Инерционность	Легкость тарирования	Затраты	Простота обслуживания
Пьезоэлектрический	+	+	+	+	0	++	-	--	--
Емкостный	+	-	+	+	0	++	+	-	-
Угольного сопротивления	+	+	+	+	0	++	0	+	++
Жидкостного сопротивления	+	+	+	0	0	0	0	+	+
Индуктивный	+	++	++	+	+	++	+	++	++
Магнитный	+	++	+	+	++	+	+	+	+
Тензометрический	+	++	+	+	++	+	+	+	++

Гидравлические динамометры просты по конструкции и в эксплуатации, но имеют значительную инерционность рычажно-поршневой системы, из-за чего показания отстают от быстропротекающих процессов и искажают картину изменения сил резания во времени и по величине. Кроме того, они малочувствительны.

Механические динамометры имеют те же недостатки, что и гидравлические, а поэтому, несмотря на простоту их конструкции и эксплуатации, широкого применения не получили.

Несмотря на вышеприведенные недостатки, учитывая простоту конструкции механических динамометров, эксплуатации, обслуживания и тарирования, для учебных целей целесообразно использовать однокомпонентный механический динамометр ДК-1. Он позволяет измерять величину только одной составляющей силы резания  $P_z$  и рассчитан на силу до 6000 Н.

Динамометр (рис. 3) устанавливается на верхнем суппорте токарного станка 1К62, вместо предварительно снятого резцедержателя, и закрепляется болтом, который проходит сквозь отверстие *A*. Корпус 3 динамометра выполнен таким образом, что державка 1, в которой закрепляется резец, оказывается соединенной с остальной частью динамометра посредством торсионных брусков 2 квадратного сечения.

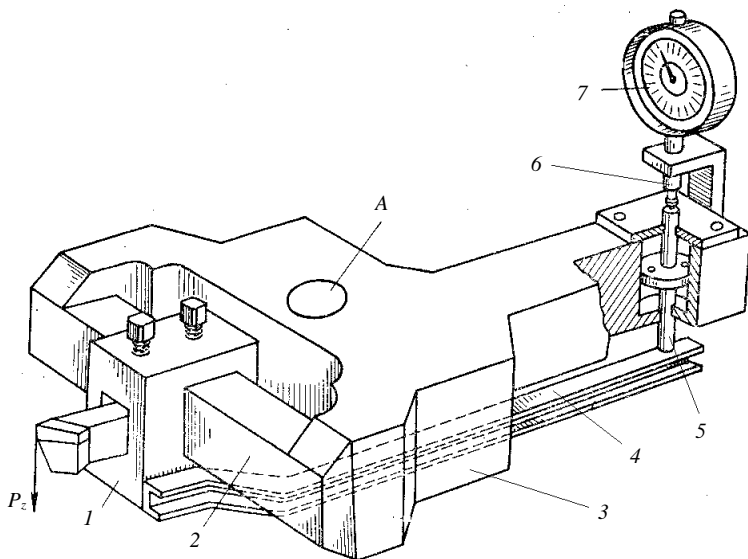


Рис. 3. Схема однокомпонентного динамометра ДК-1:  
 1 – державка; 2 – торсионные бруски; 3 – корпус; 4 – планка; 5 – стержень;  
 6 – ножка индикатора; 7 – шкала индикатора

Под действием тангенциальной составляющей силы  $P_z$  резец слегка наклоняется, закручивая торсионные бруски. При этом конец длинной планки 4, приваренной к державке 1, находящейся в нижней части прибора, поднимается, нажимая посредством стержня 5 на ножку индикатора 6. Перемещение ножки индикатора пропорционально дефор-

мации торсионных брусков и, следовательно, тангенциальной составляющей силы резания. Две другие составляющие силы резания  $P_y$  и  $P_x$ , изгибая торсионные бруски, вызывают перемещение планки 4 только в горизонтальной плоскости и на показания индикатора практически не влияют.

Для изоляции ножки индикатора от неизбежных колебаний планки 4 предусмотрено простое демпфирующее устройство, включающее насаженный на стержень 5 поршень с двумя малыми отверстиями, помещенный в закрытый, наполненный вязким маслом цилиндр в корпусе динамометра. При перемещении стержня вверх или вниз необходимо затратить энергию на выдавливание некоторого объема масла сквозь отверстия в поршне, тем самым значительно уменьшить передаваемые колебания.

Для установления величины показаний индикатора 7 (цены деления шкалы в ньютонах), полученных при исследовании процесса резания, динамометр следует тарировать. Тарирование обычно выполняется методом искусственного нагружения.

Сообщая прибору заранее известную нагрузку, устанавливают соответствующее этой нагрузке отклонение стрелки индикатора. Путем ряда последовательных нагружений получают соответствующий ряд показаний прибора, по которым строится тарировочный график.

Применительно к динамометру ДК-1 тарирование проводится в следующей последовательности. В державке 1 динамометра (см. рис. 3), установленного на токарном станке, закрепляется на месте резца тарировочный валик 2 (рис. 4) с вылетом  $l_t$ , равным вылету резца.

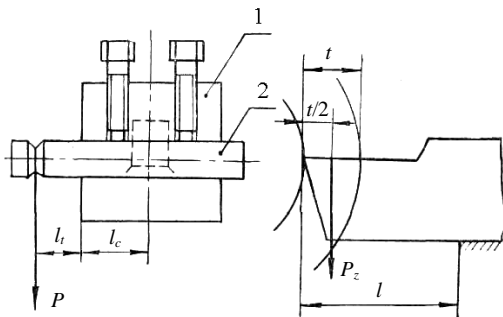


Рис. 4. Схема тарирования динамометра ДК-1

Стрелка индикатора поворотом циферблата устанавливается против нулевого деления. На тарировочный валик подвешивается груз

массой 5 кг, действие которого на торсионные бруски аналогично действию силы в 49,05 Н (можно округлять данное значение до 50 Н). При этом стрелка индикатора отклоняется от нулевого положения на одно деление ( $n_d = 1$ ). Цена деления  $K_d$  шкалы индикатора при измерении линейных величин равна 0,01 мм. В этом случае отклонением стрелки индикатора будет зафиксирована величина деформации (поворот) торсионных брусков с учетом подъема конца планки 4 (см. рис. 3) на величину  $\Delta h$ . При  $n_d = 1$  подъем планки  $\Delta h = 0,01$  мм. Если подвесить груз массой 10 кг (приблизительно 100 Н), стрелка индикатора отклонится на два деления –  $\Delta h = 0,02$  мм и т. д.

Результаты тарирования динамометра заносятся в табл. 2, по которым строится график тарирования (рис. 5).

Таблица 2. Результаты тарирования динамометра ДК-1

Сила нагружения $P_z$ , Н	Показания индикатора		Сила нагружения $P_z$ , Н	Показания индикатора	
	$n_d$	$\Delta h$ , мм		$n_d$	$\Delta h$ , мм
50	1	0,01	250	5	0,05
100	2	0,02	300	6	0,06
150	3	0,03	350	7	0,07
200	4	0,04	400	8	0,08

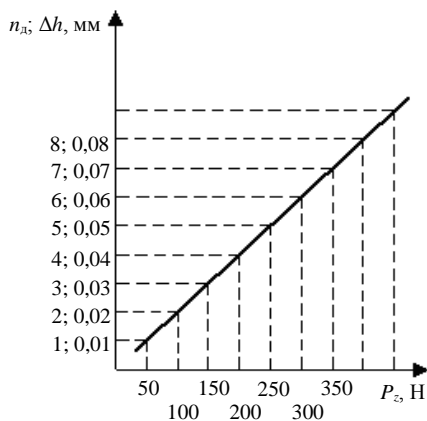


Рис. 5. График тарирования динамометра ДК-1

На оси абсцисс откладываются показания нагрузки тарировочного валика в ньютонах, а по оси ординат – величина перемещения конца планки 4 (см. рис. 3) в миллиметрах или соответствующие показания индикатора  $n_d$ . Соединив экспериментальные точки, получают зависимость показаний индикатора от сил нагружения.

Из табл. 2 и графика (см. рис. 5) видно, что цена одного деления  $K_d$  шкалы индикатора в единицах силы равна 49,05 Н ( $\approx 50$  Н).

Имея такой график, можно определить силу  $P_z$ , действующую на резец в процессе точения. Если, например, при резании стрелка индикатора показала отклонение на 6 делений от нулевого положения, тогда, согласно рис. 5, сила, действовавшая на резец, будет равна 294,30 Н ( $\approx 300$  Н).

В тарифовочном графике должна быть зафиксирована величина вылета  $l_t$  (см. рис. 4), от которого зависит результат тарифирования. Следует отметить, что при вылете резца, равном  $l$ , и глубине резания  $t$  сила резания приложена на плече  $l - t/2$ . Если  $l_t$  равна  $l - t/2$ , то при вычислении силы резания можно пользоваться непосредственно зависимостью (6) или тарифовочным графиком (см. рис. 5).

$$P_z = K_d \cdot n_d = 49,05 \cdot 6 = 294,30 \text{ (}\approx 300 \text{ Н).} \quad (6)$$

Если  $l_t$  несколько отличается от  $l - t/2$ , то необходимо внести поправку и вычислить силу резания по следующей формуле (пренебрегая влиянием на величину поправки изгиба торсионных брусков):

$$P_z = \frac{l_c + l_t}{l_c + \left(l - \frac{t}{2}\right)} \cdot K_d \cdot n_d, \quad (7)$$

где  $P_z$  – тангенциальная составляющая силы резания, Н;

$K_d$  – цена одного деления индикатора, Н;

$n_d$  – показания индикатора (число делений);

$l_c + l_t$  – расстояние от оси торсионных брусков до точки приложения силы резания, мм.

Перед началом работы следует убедиться в тщательности закрепления измерительного прибора на станке, так как при недостаточно прочном закреплении возникают вибрации резца, искажающие результаты испытаний. Следует также проверить закрепление обрабатываемой заготовки.

Во избежание вибраций в процессе резания следует применять резец с положительным передним углом и значительным углом в плане, располагать резец несколько выше центра, избегать очень малых подач, выбирать маловязкий и хорошо обрабатываемый материал заготовки.

## **5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ТАНГЕНЦИАЛЬНОЙ СИЛЫ $P_z$ ОТ ГЛУБИНЫ РЕЗАНИЯ, ПОДАЧИ И СКОРОСТИ РЕЗАНИЯ**

Прежде чем приступить к исследованию изменения силы  $P_z$  в зависимости от режима точения, необходимо:

а) указать марку материала заготовки и его механические характеристики;

б) определить тип резца, размеры сечения его державки, марку и вид материала режущей части резца. Произвести измерение его геометрических элементов с помощью угломера ЛМТ и шаблона;

в) установить вид и характер обработки.

Сведения по пунктам «а» и «в» задаются руководителем занятий. Результаты замеров и другие необходимые данные заносятся в отчет.

Экспериментальное исследование содержит три серии опытов: каждая серия включает по четыре опыта. В первой серии опытов заготовка обрабатывается с четырьмя различными глубинами резания ( $t_1, t_2, t_3, t_4$ ), оставляя все другие факторы (подачу, скорость резания и др.) неизменными. Для каждого принятого при испытаниях значения глубины резания фиксируется показание индикатора  $n_d$  и заносится в табл. 3. Затем расчетным путем (см. формулу (6)) или по графику тарирования (см. рис. 5) определяется сила  $P_z$  и полученные данные также заносятся в табл. 3.

Во второй серии опытов заготовка обрабатывается при переменной подаче ( $S_1, S_2, S_3, S_4$ ). Все же другие факторы (глубина и скорость резания и пр.) остаются постоянными. Фиксируемые для каждого значения подачи показания индикатора и определяемые величины силы  $P_z$  заносятся в табл. 3.

В третьей серии опытов обработка ведется при переменной скорости резания ( $V_1, V_2, V_3, V_4$ ), а подача и глубина резания сохраняют свои значения постоянными. Полученные при этом результаты заносятся также в табл. 3.

### **5.1. Обработка опытных данных**

Результаты исследования, представленные в табл. 3, позволяют судить о степени влияния каждого элемента режима резания ( $t, S, V$ ) на силу  $P_z$ . Чтобы пользоваться таблицей на практике, для определения силы необходимо выполнить большое количество экспериментов с небольшими интервалами значений переменной.

Таблица 3. Результаты исследования тангенциальной составляющей силы резания при точении

Серия опытов	Номер опыта	Диаметр заготовки $d$ , мм	Глубина резания $t$ , мм	Подача $S$ , мм/об	Частота вращения шпинделя $V$ , мин <sup>-1</sup>	Скорость резания $V$ , м/мин	Показания индикатора		Сила $P_z$ , Н	Значение коэффициента $C_{Pz}$	Показатель степени	$P_z = f(t, S, V)$
							число делений $n_d$	$\Delta h$ , мм				
1-я $P_z = f(t)$	1	Const =		Const =	Const =	Const =						
	2											
	3											
	4											
2-я $P_z = f(S)$	1	Const =	Const =		Const =	Const =						
	2											
	3											
	4											
3-я $P_z = f(V)$	1	Const =	Const =	Const =								
	2											
	3											
	4											

Для получения формулы, описывающей связь между силой резания и переменными ( $t$ ,  $S$ ,  $V$ ), могут применяться различные методы обработки экспериментальных данных (графический, графоаналитический, средних величин, наименьших квадратов). Анализ экспериментальных данных (см. табл. 3) показывает, что при изменении любого фактора сила резания монотонно возрастает или убывает. Эти зависимости хорошо отображаются кривыми параболического типа (рис. 6).

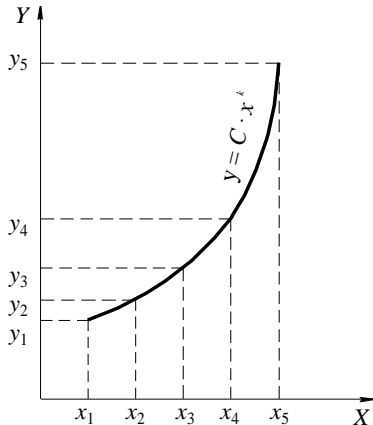


Рис. 6. График степенной функции в декартовых координатах

Они, как правило, описываются степенной функцией следующего вида:

$$Y = C \cdot x^k. \quad (8)$$

Нахождение составляющих степенной функции  $C$  и  $k$  удобно проводить, используя графоаналитический метод обработки результатов эксперимента. При этом используется двойная логарифмическая сетка координат, когда вместо декартовых координат по осям откладываются не сами величины  $X$  и  $Y$ , а их десятичные логарифмы.

Это подтверждается следующими выкладками. Прологарифмировав выражение (8), получим уравнение первой степени

$$\lg y = \lg C + k \cdot \lg x, \quad (9)$$

которое аналогично уравнению прямой линии, не проходящей через начало координат:

$$y = b + kx. \quad (10)$$

Это означает, что в двойной логарифмической системе координат степенная функция выражается прямой линией. Причем величина показателя степени  $k$  соответствует тангенсу угла  $\alpha$  наклона прямой к положительному направлению оси абсцисс. Величина координаты  $C$  равна отрезку, отсекаемому прямой на оси ординат при переменной  $x$ , равной единице (рис. 7). Так как  $\lg 1 = 0$ , то второе слагаемое  $k \cdot \lg x$  выражения (9) равно нулю. Тогда  $\lg y = \lg C$ , а  $y = C$ .

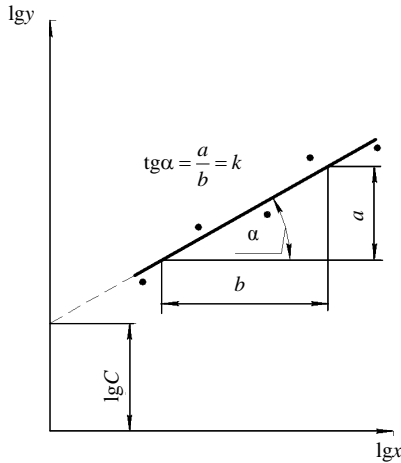


Рис. 7. График степенной функции в координатах с логарифмической шкалой

Таким образом, по тангенсу угла наклона прямой к оси абсцисс и отрезку, отсекаемому на оси ординат, легко находится степенная функция  $y$  при некотором заданном значении аргумента  $x$ . Как видно, графоаналитический метод очень прост, но не обладает высокой точностью. Его недостатком является субъективность в проведении по нанесенным точкам прямой, которая равно удалена от всех опытных точек.

Графики (рис. 7) можно построить путем логарифмирования значений аргумента ( $t, S, V$ ) и функции ( $P_z$ ), откладывая логарифмы соответственно по оси абсцисс и ординат. Для построения таких графиков можно пользоваться специальной логарифмической бумагой, на которой нанесена двойная логарифмическая сетка, или построить с использованием персонального компьютера.

Описанный выше метод обработки опытных данных позволяет непосредственно перейти к установлению функциональной зависимости  $P_z = f(t, S, V)$ , пригодной для практического пользования при расчете составляющей силы резания.

Из протокола (см. табл. 3) результаты 1-й серии опытов наносят на двойную логарифмическую сетку (рис. 8).

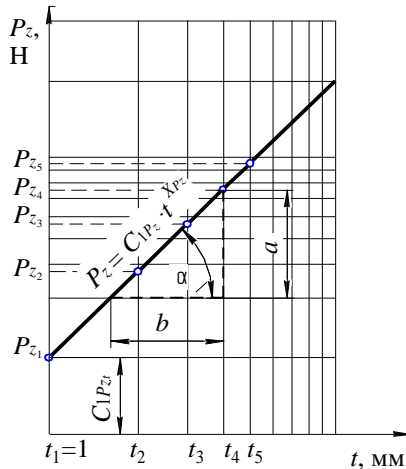


Рис. 8. График зависимости вертикальной силы от глубины резания

Затем проводят прямую так, чтобы сумма расстояний от экспериментальных точек до нее была минимальной, т. е. наиболее близкой ко всем экспериментальным точкам. Это и есть графическое изображение искомой зависимости

$$P_z = C_{1P_z} \cdot t^{\alpha_{P_z}} . \quad (11)$$

Таким же образом результаты 2-й и 3-й серий опытов наносятся на двойную логарифмическую сетку (рис. 9, а, б). Полученные линии представляют собой графическое изображение зависимостей:

$$P_z = C_{2P_z} \cdot S^{\beta_{P_z}} ; \quad (12)$$

$$P_z = C_{3P_z} \cdot V^{\gamma_{P_z}} . \quad (13)$$

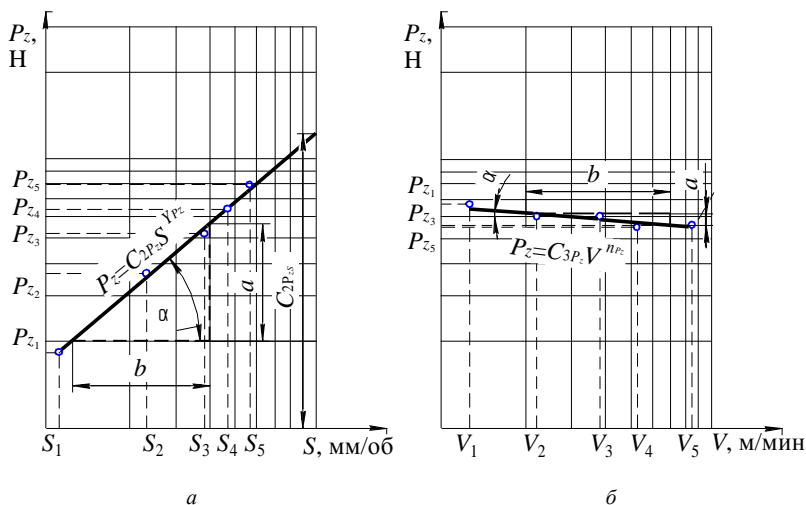


Рис. 9. Графики зависимости вертикальной составляющей силы от подачи (а) и скорости резания (б)

Для зависимости (13)  $P_z = f(V)$  принят диапазон скоростей резания по ниспадающей ветви кривой, что соответствует скоростям резания для резцов, оснащенных пластинками из твердого сплава.

Показатели степеней при глубине резания, подаче и скорости резания определяют из рис. 8 и 9, измеряя масштабной линейкой величину катетов прямоугольных треугольников и подставляя их значения в следующие зависимости:

$$\operatorname{tg} \alpha_1 = a / b; \quad \operatorname{tg} \alpha_1 = X_{P_z}. \quad (14)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_2 = a / b; \quad \operatorname{tg} \alpha_2 = Y_{P_z}. \quad (15)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_3 = a / b; \quad \operatorname{tg} \alpha_3 = n_{P_z}. \quad (16)$$

Постоянные  $C_{1P_z}$ ,  $C_{2P_z}$ ,  $C_{3P_z}$  равны отрезкам, отсекаемым соответствующими прямыми на осях ординат при переменных  $t$ ,  $S$  и  $V$ , равных единице. Определение постоянной  $C_{3P_z}$  по графику (рис. 9, б) затруднительно, так как на оси абсцисс точка для  $V = 1$  м/мин выходит далеко за пределы чертежа. Поэтому  $C_{3P_z}$  определяется из зависимости (13) решением ее относительно  $C_{3P_z}$ :

$$C_{3P_z} = \frac{P_z}{V^{n_z}}. \quad (17)$$

Подстановкой в зависимость (17) значений  $V$  и  $P_z$  из любого опыта третьей серии с учетом ранее определенного показателя степени  $n_{P_z}$  находят  $C_{3P_z}$ .

Таким образом находятся частные функциональные зависимости:

$$P_{z1} = C_{1P_z} t; \quad (18)$$

$$P_{z2} = C_{2P_z} S; \quad (19)$$

$$P_{z3} = C_{3P_z} n, \quad (20)$$

по которым возможен расчет составляющей силы  $P_z$  по одному из элементов режима резания, так как конкретные численные значения показателей степеней и постоянных коэффициентов  $C_{P_z}$  определены ранее.

Однако больший интерес представляет определение  $P_z$  (Н) функцией обобщенной зависимости

$$P_z = C_{P_z} \cdot t^{X_{P_z}} \cdot S^{Y_{P_z}} \cdot V^{n_{P_z}}. \quad (21)$$

Значение коэффициента  $C_{P_z}$  может быть найдено решением  $i$  уравнения вида (21) относительно  $C_{P_z}$ :

$$C_{P_z} = \frac{P_z}{t^{X_{P_z}} \cdot S^{Y_{P_z}} \cdot V^{n_{P_z}}}. \quad (22)$$

В выражении (21) показатели степени  $X_{P_z}$ ,  $Y_{P_z}$ ,  $n_{P_z}$  определены ранее из построенных графиков (см. рис. 8 и 9) и зависимостей (14), (15), (16), а величины  $P_z$ , полученные при заданных значениях  $t$ ,  $S$  и  $V$ , берутся из табл. 3. Коэффициент  $C_{P_z}$  является среднеарифметическим значением величин  $C_{1P_z}$ ,  $C_{2P_z}$ ,  $C_{3P_z}$ , ...,  $C_{iP_z}$ , т. е.

$$C_{P_z} = \frac{C_{1P_z} + C_{2P_z} + C_{3P_z} + \dots + C_{iP_z}}{i}. \quad (23)$$

Окончательная (обобщенная) формула для практического расчета силы  $P_z$  (при заданном обрабатываемом материале заготовки, геометрии, материале и износе резца, охлаждении и пр.) будет иметь следующий вид:

$$P_z = C_{P_z} \cdot t \cdot S \cdot V. \quad (24)$$

Аналогично можно получить формулы для расчета составляющих сил  $P_y$  и  $P_x$ .

Следовательно, обработка результатов опытов сводится к получению цифровых данных для постоянной  $C_{P_z}$  и показателей степеней  $X_{P_z}$ ,  $Y_{P_z}$ ,  $n_{P_z}$ .

Применение графоаналитического метода определения цифровых данных для постоянной  $C_{P_z}$  и показателей степеней  $X_{P_z}$ ,  $Y_{P_z}$ ,  $n_{P_z}$  не обеспечивает высокую степень точности определения этих показателей. Помимо ошибки, возникающей при проведении опыта, возникают и объективные ошибки, обусловленные самим исследователем. Это и не совсем точное нанесение характерных точек на логарифмическую шкалу, и приближенное определение аппроксимирующей закономерности, и погрешности, связанные с определением параметров аппроксимирующей.

С целью исключения из эксперимента объективного влияния исследователя и повышения точности определения параметров как частных функциональных зависимостей, так и обобщенной, можно применять регрессионный анализ. Для этого целесообразно использовать вычислительную технику.

## 5.2. Статистическая обработка данных

После получения обобщенных зависимостей вышеизложенными способами проводится их статистическая проверка. Для этого из любого опыта с известной силой резания  $P_z$  (см. табл. 3) подставляются в обобщенные зависимости значения  $t$ ,  $S$  и  $V$  и определяются расчетные значения силы резания  $P_{zp}$ . Полученные значения силы  $P_{zp}$  сравниваются с экспериментальным значением силы  $P_z$ .

Абсолютная ошибка (Н) определяется по формуле (25), а относительная ошибка (%) – по формуле (26):

$$\Delta P_z = P_{zp} - P_z; \quad (25)$$

$$B = \frac{\Delta P_z}{P_z} \cdot 100. \quad (26)$$

Изложенная методика обработки опытных данных применима к определению взаимосвязи между другими характеристиками процесса точения (температурой резания, износом и стойкостью резца, усадкой стружки и пр.).

## Контрольные вопросы

1. Назовите силы, действующие на лезвие режущего инструмента.
2. На какие составляющие раскладывается сила резания?
3. Назовите факторы, влияющие на силу резания.
4. Какие приборы применяются для измерения силы резания?
5. Какие требования предъявляются к динамометрам?
6. Изложите устройство и принцип работы динамометра ДК-1.
7. Изложите порядок тарирования динамометра ДК-1.
8. Изложите сущность графоаналитического метода обработки данных при исследовании силы резания.
9. В чем заключается статистическая проверка полученных зависимостей?

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Справочник технолога-машиностроителя / под ред. А. М. Дальского [и др.]. – Москва: Машиностроение, 2001. – 918 с.
2. Некрасов, В. В. Обработка материалов резанием / В. В. Некрасов. – Москва: Агропромиздат, 1988. – 336 с.
3. Справочник токаря-универсала / Д. Г. Белецкий [и др.]; под ред. М. Г. Шеметова. – Москва: Машиностроение, 1987. – 560 с.
4. Грановский, Г. И. Резание металлов: учебник / Г. И. Грановский, В. Г. Грановский. – Москва: Высш. шк., 1985. – 304 с.
5. Барановский, Ю. В. Режимы резания металлов: справочник / Ю. В. Барановский. – Москва: Машиностроение, 1972. – 407 с.
6. Аршинов, В. А. Резание металлов и режущий инструмент / В. А. Аршинов, Г. А. Алексеев. – Москва: Машиностроение, 1967. – 500 с.