

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА»  
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

## ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛ РЕЗАНИЯ ПРИ ТОЧЕНИИ

Рекомендовано редакционно-издательским советом федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева» в качестве методических указаний для студентов Самарского университета, обучающихся по основной образовательной программе высшего образования по направлению подготовки 24.03.05 Двигатели летательных аппаратов, 24.05.02 Проектирование авиационных и ракетных двигателей, 15.03.01 Машиностроение, 15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств, 15.03.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств

Составители:

*М.Б. Сазонов*

*А.Н. Швецов*

САМАРА

Издательство Самарского университета

2019

УДК 621.91(075)  
ББК 30.61я7

Составители: *М.Б. Сазонов, А.Н. Швецов*

Рецензент д-р техн. наук, проф. В.В. Б и р ю к

**Исследование сил резания при точении:** метод. указания / сост.:  
*М. Б. Сазонов, А. Н. Швецов.* – Самара: Изд-во Самарского университета,  
2019. – 20 с.

Изложена методика измерения сил резания при точении и экспериментального установления зависимости составляющих сил резания от элементов режима резания и геометрии инструмента. Представлена конструкция динамометра.

Предназначены для проведения лабораторной работы студентами дневного отделения института энергетики и транспорта.

Выполнена на кафедре технологий производства двигателей Самарского университета.

УДК 621.91(075)  
ББК 30.61я7

**Цель работы:** ознакомление с методикой экспериментального исследования сил резания при точении и приобретение навыков обработки результатов опытов, полученных с использованием соответствующих приборов и оборудования.

**Порядок выполнения работы:**

- ознакомиться с методическими указаниями к лабораторной работе;
- изучить конструкцию и принцип работы электроиндуктивного динамометра;
- провести три серии экспериментального исследования (серия глубин, подач и передних углов) и занести в бланк отчёта измеренные значения составляющих силы резания;
- с использованием тарировочных графиков перевести показания динамометра из мкА в Н;
- построить графики зависимостей одной из составляющих силы резания (по указанию преподавателя) от глубины резания и подачи в двойных логарифмических координатах, и от величины переднего угла в декартовых координатах;
- определить графически показатели степеней и коэффициенты в частных зависимостях. Указать частные зависимости на соответствующих графиках;
- определить общую зависимость;
- для разных значений глубины резания и подачи определить удельную силу и сделать вывод о характере их изменения с увеличением глубины резания и подачи;
- оформить отчёт по лабораторной работе;
- получить индивидуальное задание.

## 1. СХЕМА СИЛ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА РЕЗЕЦ ПРИ ТОЧЕНИИ

Процесс резания материалов сопровождается противодействующими силами, знание которых необходимо для выполнения расчетов на прочность, жесткость и виброустойчивость элементов конструкций станков и режущих инструментов и определения наивыгоднейших режимов резания.

Схема сил, действующих в процессе токарной обработки, приведена на рис 1.

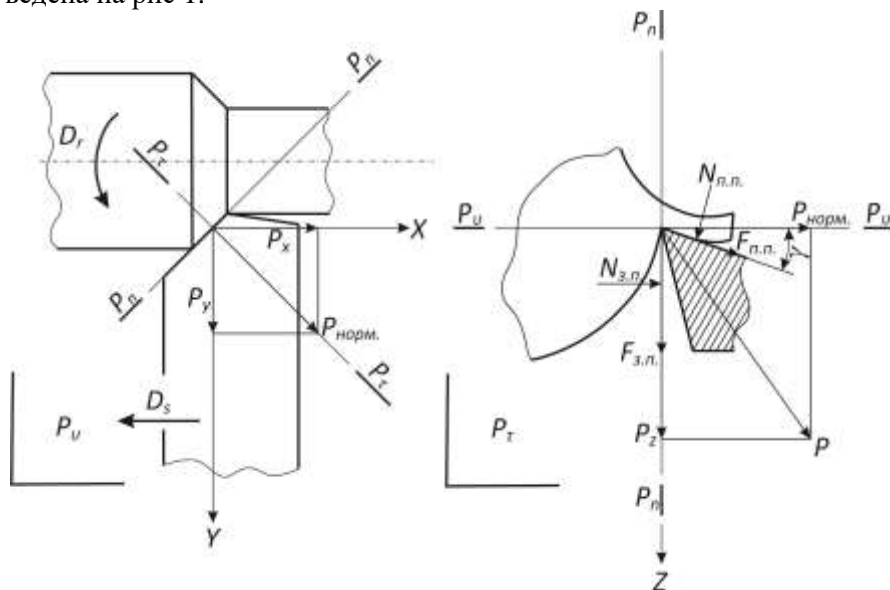


Рис. 1. Схема сил при точении проходным резцом

Сила  $R$  представляет здесь равнодействующую силу резания, которую можно разложить на три составляющие:  $P_z$  - тангенциальную, действующую в плоскости резания в направлении главного движения;  $P_x$  - осевую, действующую вдоль оси заготовки в направлении, противоположном направлению подачи;  $P_y$  - радиальную, действующую перпендикулярно плоскости, образованной векторами сил  $P_z$  и  $P_x$  в направлении от заготовки на резец.

Величина равнодействующей силы  $R$  может быть выражена через ее составляющие:

$$R = \sqrt{P_x^2 + P_y^2 + P_z^2} \quad (1)$$

Сила  $P_z$ , наибольшая по величине, определяет крутящий момент  $M_{кр}$  и нагружает коробку скоростей станка и резец.

Сила  $P_y$  определяет отжим резца от заготовки и прогиб самой заготовки.

Сила  $P_x$  нагружает механизм подачи станка и резец.

Соотношение сил  $P_z$ ,  $P_y$  и  $P_x$  не является постоянным, оно зависит от геометрии резца, степени его притупления, режима резания и других факторов. Так, уменьшение главного угла в плане  $\sigma$  вызывает увеличение отношения  $P_y/P_z$ ; увеличение подачи ведет к возрастанию отношения  $P_x/P_z$ . Возникающие в процессе резания силы могут быть рассчитаны теоретически или измерены экспериментально.

На практике пользуются опытными зависимостями составляющих сил резания  $P_z$ ,  $P_y$  и  $P_x$ , которые имеют степенной характер:

$$\begin{aligned} P_z &= C_{pz} \cdot t^{x_{pz}} \cdot S^{y_{pz}} \\ P_y &= C_{py} \cdot t^{x_{py}} \cdot S^{y_{py}} \\ P_x &= C_{px} \cdot t^{x_{px}} \cdot S^{y_{px}} \end{aligned} \quad (2)$$

Как показали многочисленные эксперименты, наибольшее влияние на составляющие силы резания оказывают элементы сечения среза: глубина резания  $t$  и подача  $S$ . С их увеличением возрастает площадь сечения среза,  $a$ , следовательно, и сила резания. В меньшей степени на составляющие силы резания влияет скорость резания  $v$ . В диапазоне рабочих режимов резания с увеличением скорости составляющие силы резания уменьшаются. Это связано в первую очередь с повышением температуры резания, что приводит к уменьшению коэффициентов трения по передней и задней поверхностям режущего лезвия, снижению прочностных характеристик обрабатываемого материала и степени деформации стружки.

Формулы такого вида приведены в нормативах по режимам резания.

В зависимости от заданных условий обработки находятся значе-

ния  $x_p, y_p, C_p$ . При этом коэффициенты, например для силы  $P_z$  представляют в форме

$$C_{pz} = C'_{pz} \cdot k_{pz} \quad (3)$$

где  $C'_{pz}$  – коэффициент, соответствующий определенным условиям обработки, принятым при разработке нормативных режимов резания;  $k_{pz}$  – поправочный коэффициент, учитывающий изменение условий обработки по сравнению с теми, при которых был найден коэффициент  $C'_{pz}$ .

Теоретические расчеты возникающих при резании сил сопряжены с большими трудностями, так как пластические деформации в срезаемом слое протекают при больших температурах и высоких скоростях нагружения. Поэтому в инженерной практике чаще всего используют экспериментальные методы исследования.

Экспериментальное определение составляющих сил резания производят с помощью динамометров.

В зависимости от типа датчиков, преобразующих упругие перемещения механических частей динамометров в электрические сигналы, динамометры подразделяются на пьезоэлектрические, емкостные, индуктивные и др.

Если быстроменяющиеся силы резания измерять не требуется, то могут применяться также механические и гидравлические динамометры.

В работе применяется трехкомпонентный электроиндуктивный динамометр.

## **2. КОНСТРУКЦИЯ И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ТРЕХКОМПОНЕНТНОГО ЭЛЕКТРОИНДУКТИВНОГО ДИНАМОМЕТРА**

В данной работе для измерения составляющих силы резания используется трехкомпонентный электроиндуктивный динамометр, конструкция которого разработана В.Ф. Парамоновым на кафедре резания КуАИ.

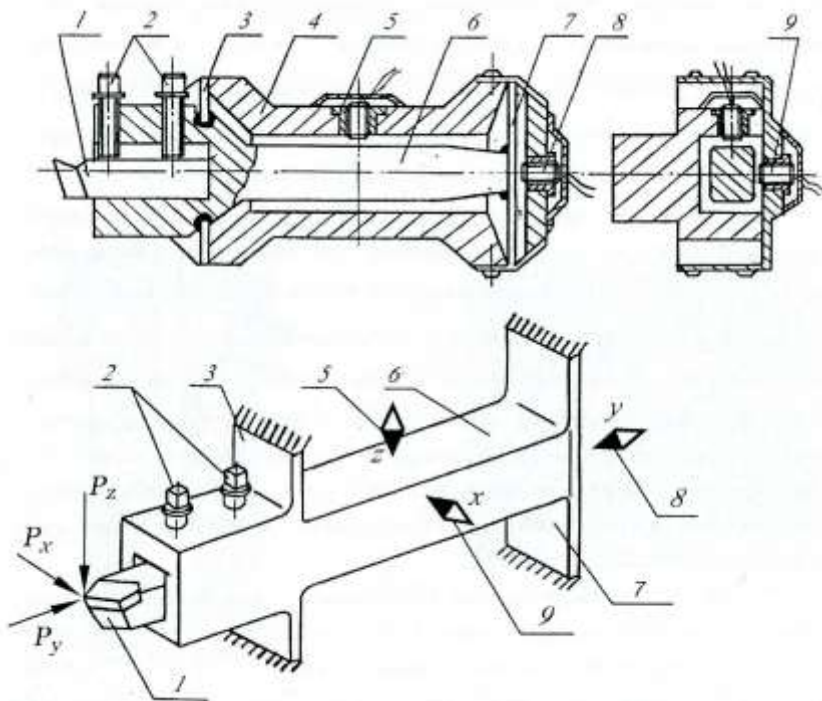


Рис. 2. Схема механической части динамометра

Механическая часть динамометра, как видно из рис. 2, представляет собой упругую систему, состоящую из люльки 6 и упругих стоек 3 и 7, соединяющих ее с корпусом 4. В передней части люльки имеется гнездо, в котором закрепляется резец. В корпусе динамометра в трех взаимно перпендикулярных направлениях установлены электроиндуктивные датчики 4, 8, 9, представляющие собой катушки, намотанные на стальные кольцеобразные сердечники с Ш-образным продольным сечением. Разомкнутые стороны магнитопроводов датчиков обращены к люльке, которая выполняет роль якоря. Зазор между люлькой и сердечниками катушек составляет 0,3-0,5 мм.

Под действием силы резания упругие элементы - люлька и стойки динамометра - деформируются, в результате чего изменяются зазоры между сердечниками индуктивных датчиков и люлькой, а, следо-

вательно, и индуктивные сопротивления их обмоток. Так, главная (касательная) составляющая силы резания  $P_z$  приводит к изменению зазора между люлькой и датчиком 5, радиальная составляющая  $P_y$  - к изменению зазора между люлькой и датчиком 8, осевая составляющая  $P_x$  - к изменению зазора между люлькой и датчиком 9.

Электрическая часть динамометра (рис. 3) представляет собой три независимых моста сопротивлений для измерения составляющих  $P_z$ ,  $P_y$  и  $P_x$ . Два плеча каждого моста представляют собой индуктивные сопротивления в виде датчиков  $L1, L3, L5$ , закрепленных в корпусе динамометра, и в виде задатчиков  $L2, L4, L6$ , установленных в пульте управления и настройки динамометра. Два других плеча - омические сопротивления в виде потенциометров  $R4, R5, R6$ . в цепь диагонали каждого моста включен регистрирующий прибор, в качестве которого могут использоваться микроамперметр или осциллограф.

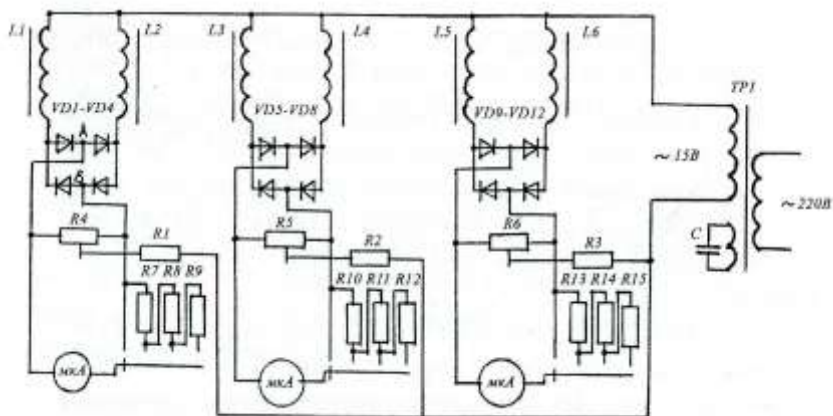


Рис. 3. Электрическая схема динамометра

Плечи мостов подключены к источнику переменного тока со стабилизированным напряжением 15-20 В. Для выпрямления тока полупроводниковые диоды  $VD1$ - $VD12$ .

изменяя чувствительность динамометра путем включения в цепь дополнительные сопротивления  $R7, R8, R9$  и т.д., можно получить различные диапазоны измерений.



Датчики динамометра подсоединяются к электрическим мостам с помощью множительного кабеля. Задатчики смонтированы в пульте и представляют собой такие же катушки индуктивности, как и датчики.

Для приведения каждого моста в равновесие индуктивное сопротивление задатчиков регулируется изменением зазора (рис. 4) между сердечником катушки 2 и якорем 1, которое осуществляется поворотом ручки 3. Плавная регулировка зазора обеспечивается за счет разности шагов резьбовых пар  $12 \times 0,956$  и  $6 \times 0,905$ . Один оборот ручки 3 соответствует изменению зазора на  $0,051$  мм.

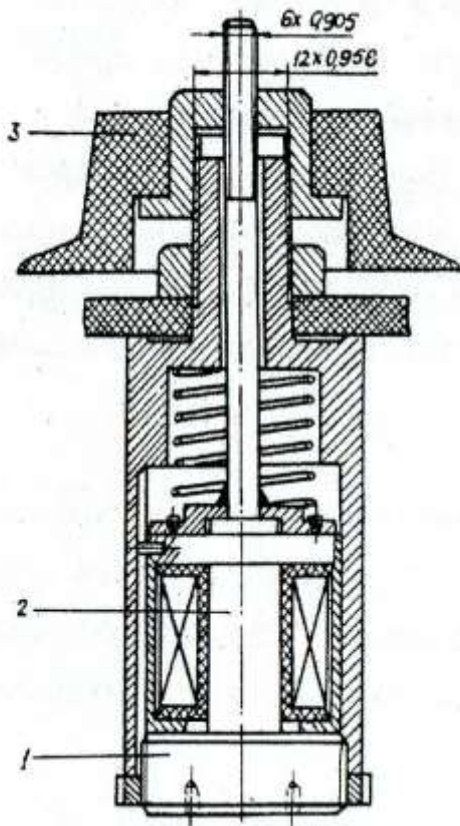


Рис. 4. Задатчики динамометра

При проведении эксперимента под действием составляющих силы резания происходят деформации упругих элементов динамометра, что приводит к изменению индуктивных сопротивлений датчиков. Это вызывает разбаланс мостов и появление токов в их диагоналях, величины которых будут определять величины соответствующих составляющих силы резания.

Для того чтобы показания приборов можно было переводить в значения сил, выраженные в Ньютонах, предварительно производится тарировка динамометра. Градуировочная характеристика может быть представлена в виде тарировочных графиков (рис. 5).

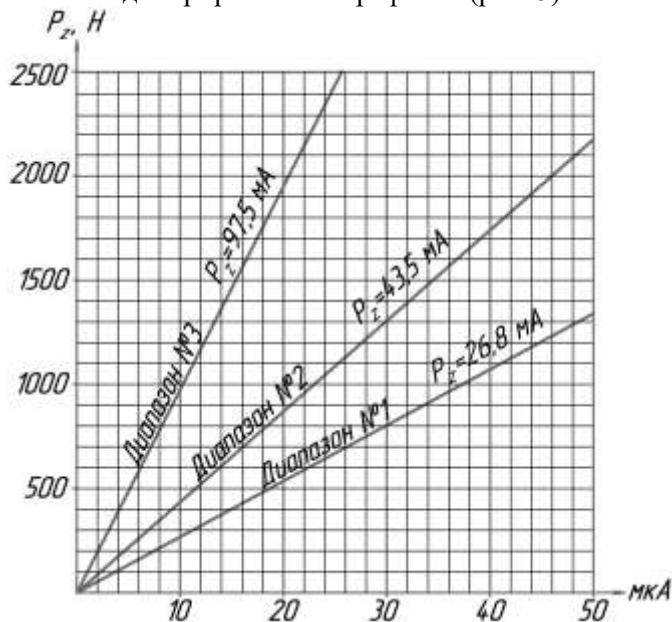


Рис. 5. Тарировочный график

### **3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВЛЯЮЩИХ СИЛЫ РЕЗАНИЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЭЛЕМЕНТОВ РЕЖИМА РЕЗАНИЯ ( $t$ , $S$ ) И ПЕРЕДНЕГО УГЛА РЕЗЦА $\gamma$**

Опыты проводятся на токарном станке 1К62 при продольном точении заготовки из конструкционной стали 45 проходным резцом,

оснащенным пластинкой из быстрорежущей стали или твердого сплава.

Для нахождения зависимостей составляющих силы резания  $P_z$ ,  $P_y$  и  $P_x$  от подачи и глубины резания проводят две серии опытов.

Первая серия проводится при постоянных подаче  $S = S_0$  и скорости резания. Определяется частная зависимость  $P = f(t)$ .

Вторая серия опытов проводится при постоянных скорости и глубине резания  $t = t_0$ . Находится частная зависимость  $P = f(S)$ .

Во время опытов снимают показания гальванометров, а затем производят обработку полученных результатов.

В задачу лабораторной работы входит также исследование влияния переднего угла  $\gamma$  на силы резания. Эти опыты проводятся при постоянных подаче, глубине и скорости резания. В этом случае в гнездо люльки устанавливаются резцы с различными углами  $\gamma$ .

#### 4. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

По показаниям гальванометров при установившемся процессе резания, пользуясь тарировочными графиками, находят составляющие силы резания  $P_z$ ,  $P_y$  и  $P_x$ . Затем в двойных логарифмических координатах строят графики частных зависимостей:

$$\begin{aligned} P_z &= f_1(t); & P_z &= f_1(S); \\ P_y &= f_1(t); & P_y &= f_1(S); \\ P_x &= f_1(t); & P_x &= f_1(S). \end{aligned} \quad (4)$$

Так как рассматриваемые зависимости в натуральных координатах удовлетворительно описываются степенными функциями, то в двойных логарифмических координатах они трансформируются в прямолинейные зависимости вида  $y = a + bx$ , т.е. (рис. 6)

$$\left. \begin{aligned} P &= C_1 t^{x_p} \\ P &= C_2 S^{y_p} \end{aligned} \right\} \rightarrow \ln P = C_1 + x_p \ln t \quad (5)$$
$$\rightarrow \ln P = C_2 + y_p \ln S$$

Показатели степеней в уравнениях (2) находятся как тангенсы углов наклона прямых линий, описываемых выражениями (5), к оси абсцисс (рис. 6):

$$x_p = tg\alpha_1; y_p = tg\alpha_2 \quad (6)$$

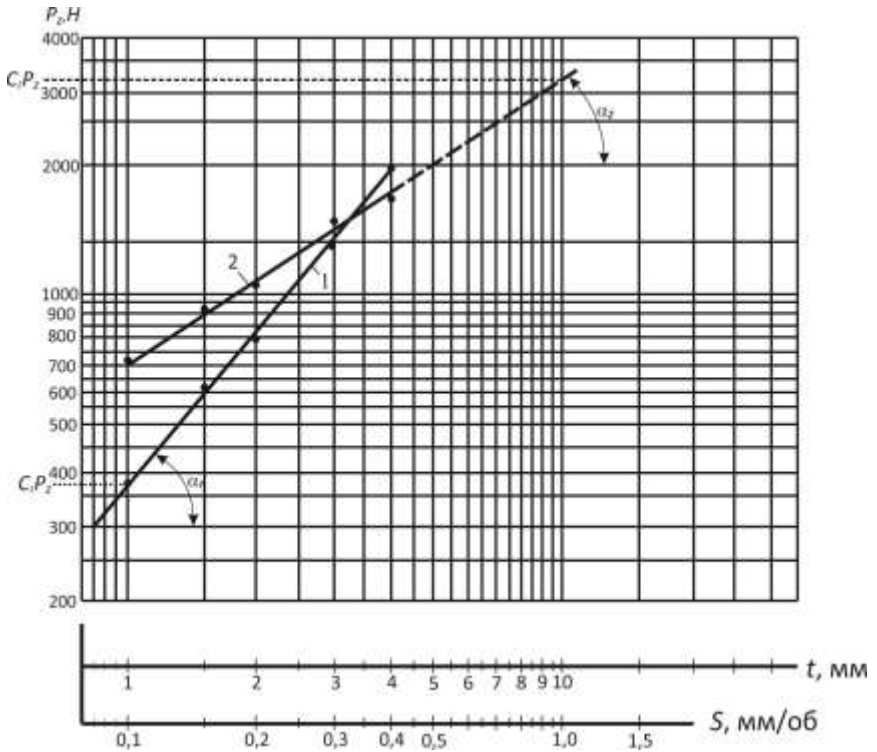


Рис. 6. Графики частных зависимостей в логарифмических координатах

Коэффициенты  $C_2$  и  $C_2$  определяются по графикам соответственно при значениях  $t=1$  мм и  $S=1$  мм/об.

На основе найденных частных зависимостей составляющих  $P_z$ ,  $P_y$  и  $P_x$  от глубины, подачи и скорости резания можно получить обобщенные формулы для их расчета, которые, как показано выше, принято представлять в виде степенных функций. При этом предполагается, что показатели степеней при глубине резания, подаче и обобщенных формулах имеют такие же значения, как и в частных зависимостях.

Значения коэффициентов  $C_{pz}$ ,  $C_{py}$  и  $C_{px}$  могут быть найдены путем подстановки в выражение (7) различных значений  $t$ ,  $S$  в соответствии с данными эксперимента и измеренных при этом величин составляющих силы резания, взятых из протокола отчета.

Решая полученные уравнения относительно коэффициентов  $C_{pz}$ ,  $C_{py}$  и  $C_{px}$ , определяют ряд значений и находят средние арифметические, которые и принимаются в качестве обобщенных коэффициентов. Так, например, для составляющей  $P_z$  получим

$$C_{pz(i)} = \frac{P_{zi}}{t_i^{x_{pz}} S_i^{y_{pz}}}, \quad (7)$$

где  $t_i$ ,  $S_i$  – глубина, подача в  $i$ -ом опыте;

$P_{zi}$  – измеренное значение составляющей  $P_z$  в  $i$ -ом опыте.

Окончательно

$$C_{pz} = \frac{\sum_{i=1}^n C_{pz(i)}}{n}, \quad (8)$$

где  $n$  – количество опытов, выбранных для расчета обобщенного коэффициента. Для более точного определения коэффициента  $C_{pz}$   $n$  следует принимать равным общему количеству опытов во всех двух сериях.

По результатам исследований сил резания в зависимости от величины переднего угла  $\gamma$  строятся графики в простых координатах (рис. 7).

Важными энергетическими показателями процесса резания являются сила и мощность резания.

Удельной силой принято называть отношения главной (касательной) составляющей силы резания  $P_z$  к площади номинального сечения среза:

$$p = \frac{P_z}{t \cdot S}. \quad (9)$$

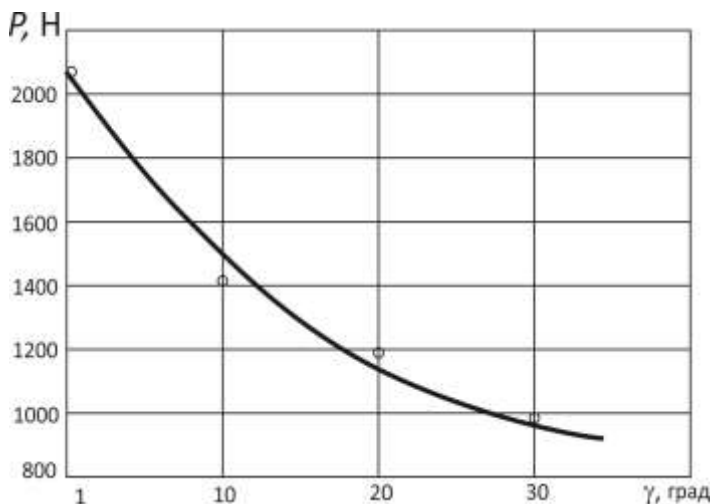


Рис. 7. Зависимость силы  $P_z$  от величины переднего угла

Мощность резания определяет работу, совершаемую составляющей силы  $P_z$  за одну секунду, и может быть найдена по формуле:

$$N_p = \frac{P_{z \max} \cdot v}{60} \quad (10)$$

где  $v$  – скорость резания м/мин.

Как показали многочисленные исследования, удельная сила  $p$  представляет собой нелинейную функцию от параметров сечения среза - глубины  $t$  и подачи  $S$ . Эта функция имеет следующий вид:

$$p = \frac{K}{t^\lambda \cdot S^\mu} \quad (11)$$

где  $K$  – коэффициент, зависящий от свойств обрабатываемого материала, геометрии инструмента, скорости резания и других факторов;  $\mu$  – показатель степени, определяемый пластическими свойствами обрабатываемого материала  $\mu = 0,1 \dots 0,4$ ;

$\lambda$  – показатель степени, зависящий от вида процесса резания (свободное или несвободное) и степени износа инструмента,  $\lambda = 0 \dots 0,1$ .

Как видно из выражения (11), с увеличением глубины резания  $t$  и особенно подачи  $S$  удельная сила  $p$ , а следовательно удельная

мощность, затрачиваемая на удаление единицы объема снимаемого припуска, уменьшаются. В этом проявляется одна из важных закономерностей процесса резания. Согласно этому закону при назначении элементов режима резания энергетически выгоднее работать с большими сечениями среза, т.е. выбирать наибольшую возможную глубину резания  $t$  и наибольшую технологически допустимую подачу  $S$ . В этом случае, хотя общая мощность резания  $N_p$  будет увеличиваться, её удельные затраты, отнесенные к единице объема снимаемого припуска уменьшаются.

Для того чтобы проверить, соответствуют ли результаты проведенного эксперимента закону удельной силы резания, необходимо выбрать из серии глубин резания и серии подач два результата, полученных соответственно при разных значениях  $t$  (например, при  $t_{\min}$  и  $t_{\max}$ ) и разных значениях  $S$  (например, при  $S_{\min}$  и  $S_{\max}$ ). Подставляя эти значения  $t$  и  $S$ , а также измеренные величины составляющей  $P_z$  в формулу (9), определяют удельную силу резания  $p$ . На основе сопоставления полученных результатов делается вывод о характере измерения удельной силы резания при увеличении глубины резания и подачи. Полученные данные и результаты их анализа заносятся в отчет по лабораторной работе.

### **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Опишите схему сил, действующих на режущее лезвие при точении токарным проходным резцом.
2. Для решения каких задач необходимо знать составляющие силы резания  $P_z$ ,  $P_y$  и  $P_x$ ?
3. Каков принцип действия трехкомпонентного электроиндуктивного динамометра?
4. Охарактеризовать и объяснить влияние переднего угла резца  $\gamma$  на составляющие силы резания.
5. Как получаются обобщенные формулы для расчета составляющих силы резания в зависимости от элементов режима резания и геометрии инструмента?
6. Что представляет собой удельная сила? Как она изменяется с увеличением глубины резания и подачи?



## **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. *Кожевников, Д.В.* Резание материалов / Д.В. Кожевников, С.В. Кирсанов. – М.: Машиностроение, 2007. – 303 с.

2. *Зайцев, В.М.* Исследование сил резания при точении: метод. указания к лабораторной работе / В.М. Зайцев, В.Н. Трусов, Ф.П. Урывский. – Куйбышев: Куйбышевский авиационный институт, 1983. – 32 с.

3. *Бурмистров, Е.В.* Исследование сил резания при точении: метод. указания к лабораторной работе / Е.В. Бурмистров, В.Н. Самыкин. – Самара: Самарский государственный аэрокосмический университет, 1996. – 36 с.

**ПРИЛОЖЕНИЕ**

**Кафедра  
технологий производства  
двигателей**

Студент \_\_\_\_\_  
Группа \_\_\_\_\_  
Дата \_\_\_\_\_

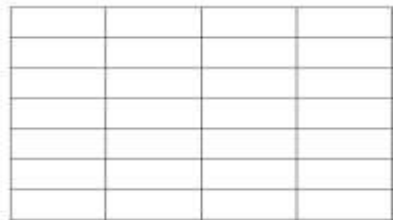
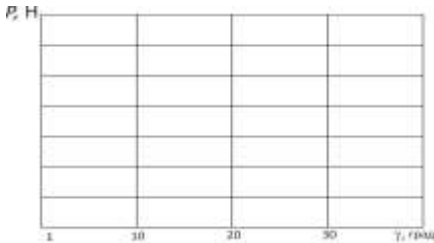
**ОТЧЕТ**

по лабораторной работе №\_\_

**Исследование сил резания при точении**

Обрабатываемый материал \_\_\_\_\_ Материал резца \_\_\_\_\_

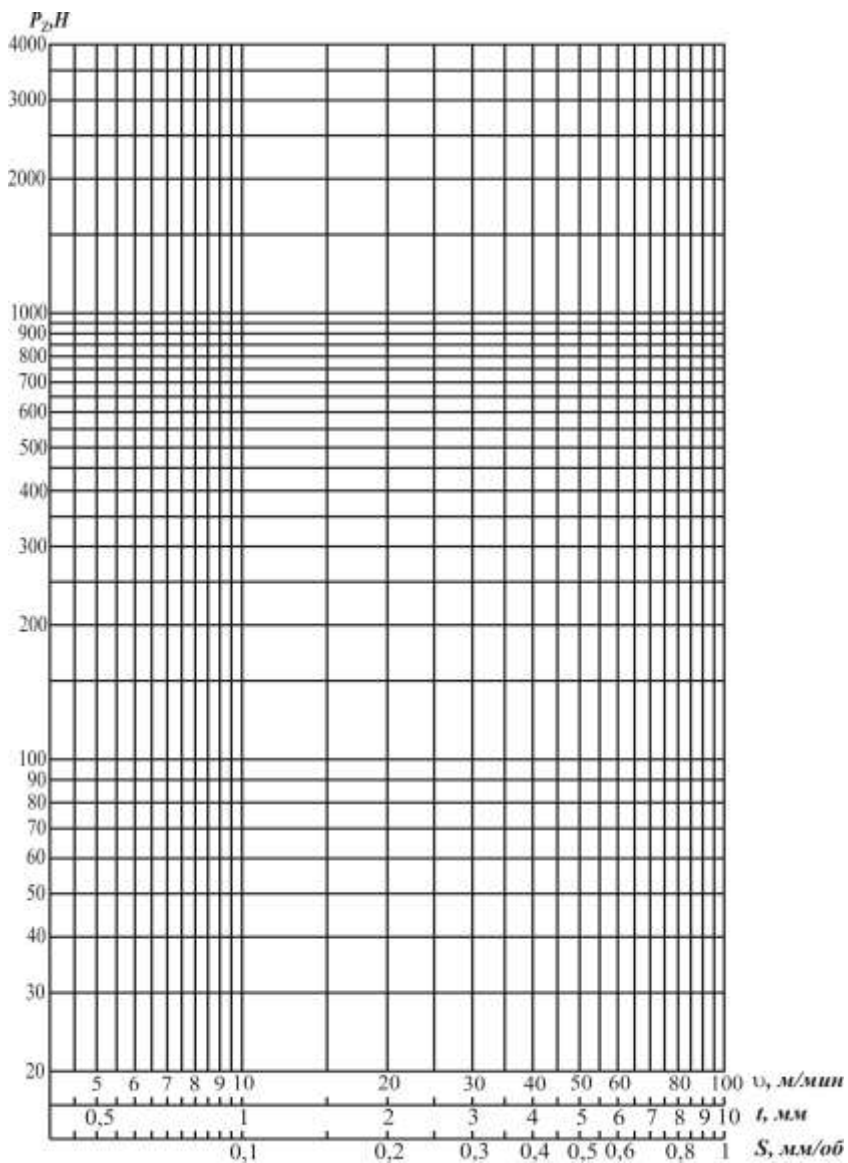
№ опыта	Начальный диаметр, мм	Обороты шпинделя, об/мин	Скорость резания (v), м/мин	Глубина резания (t), мм	Подача (S), мм/об	Геометрия резца		P <sub>x</sub> , мкА	P <sub>y</sub> , мкА	P <sub>z</sub> , мкА	P <sub>x</sub> , Н	P <sub>y</sub> , Н	P <sub>z</sub> , Н
						Главный угол в плане	Передний угол						



$$P_z = C_{pz} \cdot t^{npz} \cdot S^{ypz}, \quad P_{z(y,x)} = C_1 \cdot S^{ypz}, \quad P_{z(y,x)} = C_2 \cdot t^{npz},$$

$$P_z : P_y : P_x,$$

$$N_p = \frac{P_{z\max} \cdot v}{60} [\text{Вт}], \quad p = \frac{P_z}{t \cdot S} [\text{МПа}].$$



Преподаватель \_\_\_\_\_

Методические материалы

## **ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛ РЕЗАНИЯ ПРИ ТОЧЕНИИ**

*Методические указания*

Составители:

***Сазонов Михаил Борисович,  
Швецов Алексей Николаевич***

Редактор И.П. Ведмидская  
Компьютерная вёрстка И.П. Ведмидской

Подписано в печать 06.09.2019. Формат 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Печ. л. 1,25.

Тираж 25 экз. Заказ . Арт. - 82(Р1М)/2019.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С. П. КОРОЛЕВА»  
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)  
443086 САМАРА, МОСКОВСКОЕ ШОССЕ, 34.

---

Изд-во Самарского университета.  
443086 Самара, Московское шоссе, 34.