

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА»

**ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛ РЕЗАНИЯ  
ПРИ ТОЧЕНИИ**

САМАРА 2009

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С. П. КОРОЛЕВА»

## **ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛ РЕЗАНИЯ ПРИ ТОЧЕНИИ**

*Методические указания к лабораторной работе*

САМАРА - 2009

*Составители: Е.В. Бурмистров, В.Н. Самыкин*

**Исследование сил резания при тчении: метод. указания к лаб. работе/**  
**Е.В. Бурмистров, В.Н. Самыкин - Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та,**  
**009. - 34 с.**

Представлена методика однофакторного планирования экспериментов при исследовании сил резания при тчении. Дано описание конструкции и электрической части динамометра. Рассмотрены различные способы обработки результатов экспериментов и получения эмпирических формул для расчёта сил резания. Показана возможность использования для этой цели табличного процессора EXCEL.

Предназначены для студентов факультета №2 «Двигатели летательных аппаратов». Выполнены на кафедре механической обработки материалов.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Ф.И. Дёмин

Печатаются по решению кафедры механической обработки материалов и редакционной комиссии по двигателям летательных аппаратов и энергомашиностроению.

© Самарский государственный аэрокосмический университет, 2009

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ. ЦЕЛЬ РАБОТЫ .....</b>	<b>4</b>
<b>1. СИЛЫ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ НА РЕЗЕЦ ПРИ ТОЧЕНИИ.....</b>	<b>5</b>
<b>2. КОНСТРУКЦИЯ И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ТРЕХКОМПОНЕНТНОГО ЭЛЕКТРОИНДУКТИВНОГО ДИНАМОМЕТРА .....</b>	<b>9</b>
<b>3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВЛЯЮЩИХ СИЛЫ РЕЗАНИЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЭЛЕМЕНТОВ РЕЖИМА РЕЗАНИЯ И ПЕРЕДНЕГО УГЛА РЕЗЦА..</b>	<b>13</b>
3.1. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ОДНОФАКТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА.....	13
3.2. ГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ.....	15
3.3. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ОДНОФАКТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ .....	17
3.4. ПОЛУЧЕНИЕ ОБОБЩЁННЫХ ФОРМУЛ ДЛЯ РАСЧЁТА СОСТАВЛЯЮЩИХ СИЛЫ РЕЗАНИЯ.....	19
3.5. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЕРЕДНЕГО УГЛА РЕЗЦА НА СОСТАВЛЯЮЩИЕ СИЛЫ РЕЗАНИЯ.....	20
3.6. УДЕЛЬНАЯ СИЛА И МОЩНОСТЬ РЕЗАНИЯ.....	22
3.7. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТАБЛИЧНОГО ПРОЦЕССОРА EXCEL ДЛЯ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ .....	23
<b>ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ .....</b>	<b>27</b>
<b>КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....</b>	<b>28</b>
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....</b>	<b>29</b>

## ВВЕДЕНИЕ. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью данной лабораторной работы является:

- ознакомление с основными положениями механики действующих при резании сил;
- изучение динамометрической и регистрирующей аппаратуры, используемой при исследованиях сил резания;
- ознакомление с методикой экспериментального исследования сил резания в зависимости от элементов режима резания и геометрии инструмента;
- обработка результатов проведенных исследований с использованием графического метода и метода наименьших квадратов с помощью табличного процессора EXCEL;
- получение эмпирических формул для расчёта составляющих силы резания и их сопоставление с нормативными данными;
- определение мощности резания  $N_p$  и удельной силы  $p$  в зависимости от элементов сечения среза: глубины резания и подачи;
- проверка результатов расчётов  $N_p$  и  $p$  на соответствие закону об удельной силе резания.

Лабораторная работа выполняется в рамках изучаемого студентами факультета №2 курса «Обработка конструкционных материалов» и способствует закреплению теоретического материала, изложенного на лекциях.

Методические указания по данной работе представляют собой переработанное и дополненное издание ранее выпущенных в 1996г. [1]. Кроме того, при переработке были использованы также материалы работы [2].

## 1. СИЛЫ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ НА РЕЗЕЦ ПРИ ТОЧЕНИИ

Схема сил, действующих на резец в процессе точения представлена на рис. 1.

Как видно из этой схемы, на переднюю и заднюю поверхности резца действуют следующие силы:

- $N_{пп}$  - сила, нормальная к передней поверхности и определяемая сопротивлением срезаемого слоя пластической деформации и разрушению;
- $F_{пп}$  - сила трения стружки о переднюю поверхность резца;
- $N_{зп}$  - сила, нормальная к контактной площадке на задней поверхности резца, определяемая упруго-пластическим оттеснением и упругим восстановлением поверхностного слоя;
- $F_{зп}$  - сила трения между задней поверхностью резца и поверхностью резания заготовки.

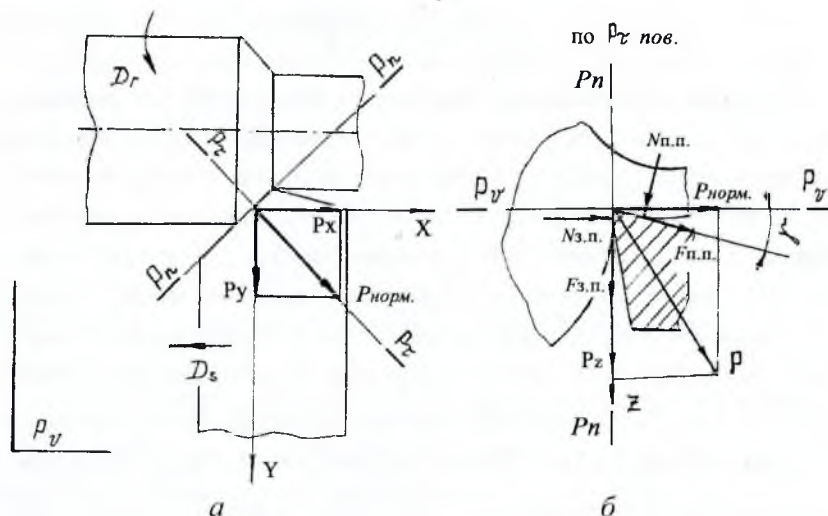


Рис. 1. Схема сил, действующих на резец: а – проекция резца и обрабатываемой заготовки на основную плоскость  $P_v$  (вид в плане);

б – сечение режущего лезвия, заготовки и стружки главной секущей плоскостью  $P_t$ .

Равнодействующую указанных сил  $P$  называют силой резания и для удобства измерения и анализа раскладывают на три составляющие:

$P_z$  - касательную к поверхности резания, применительно к процессу точения её часто называют также главной или вертикальной составляющей силы резания;

$P_y$  - радиальную, действующую по радиусу обрабатываемой заготовки;

$P_x$  - осевую, действующую в направлении, параллельном оси заготовки.

Величина силы резания  $P$  может быть выражена через её составляющие:

$$P = \sqrt{P_z^2 + P_y^2 + P_x^2}.$$

Знание составляющих силы резания необходимо для решения целого ряда конструкторских и технологических задач. Например, для выполнения расчётов на прочность, жёсткость и виброустойчивость элементов конструкций станков и режущих инструментов, определения наиболее выгодных режимов резания, точностных расчётов и др. Так, составляющая  $P_z$  определяет крутящий момент и мощность резания, вызывает деформации резца и обрабатываемой заготовки, воздействует на шпиндель и радиальные подшипники шпиндельного узла. Радиальная составляющая  $P_y$  определяет относительные отжимы резца и заготовки и тем самым влияет на точность обработки. Осевая составляющая  $P_x$  нагружает механизм подачи станка. Поэтому знание её необходимо для расчёта на прочность механизма подачи станка.

Теоретические расчёты 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, для чего применяют различного типа динамометры.

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, а следовательно и сила резания. В меньшей степени на составляющие силы резания влияет скорость резания  $v$ . В диапазоне режимов резания, соответствующих достаточно высокой производительности, 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.

Зависимости составляющих силы резания от глубины резания, подачи и скорости принято аппроксимировать степенными функциями следующего вида:

$$\begin{aligned} P_z &= C_{Pz} \cdot t^{x_{Pz}} \cdot s^{y_{Pz}} \cdot v^{z_{Pz}}; \\ P_y &= C_{Py} \cdot t^{x_{Py}} \cdot s^{y_{Py}} \cdot v^{z_{Py}}; \\ P_x &= C_{Px} \cdot t^{x_{Px}} \cdot s^{y_{Px}} \cdot v^{z_{Px}}. \end{aligned} \quad (1)$$

Коэффициенты  $C_{Pz}$ ,  $C_{Py}$  и  $C_{Px}$  зависят от свойств обрабатываемого материала, геометрии резца, степени его износа и других факторов. Значения этих коэффициентов для так называемых «стандартных» условий и показатели степеней и формулах (1) приводятся в нормативах по режимам резания [3]. Для того чтобы учесть реальные условия обработки, если они отличаются от «стандартных», в



формулы (1) вводят поправочные коэффициенты, значения которых также приводятся в нормативах.

Из геометрических параметров резца наибольшее влияние на силу резания оказывает передний угол  $\gamma$  (рис.1). При этом с его увеличением сила резания уменьшается, что обусловлено снижением степени пластической деформации и упрочнения срезаемого слоя. В результате изменяется характер образующейся стружки и уменьшаются параметры, определяющие степень её деформации, в частности, коэффициенты утолщения  $K_a = a_1/a$ , уширения  $K_b = b_1/b$  и укорочения  $K_\ell = \ell/\ell_1$ , где  $a, b, \ell$  - соответственно толщина, ширина и длина среза;  $a_1, b_1, \ell_1$  — толщина, ширина и длина стружки.

При обработке углеродистых конструкционных сталей резцами с малыми и особенно с отрицательными передними углами образуется, как правило, суставчатая стружка, которая состоит из отдельных, чётко просматриваемых элементов, прочно соединённых друг с другом. При больших, положительных передних углах ( $\gamma=20\dots25^\circ$ ) стружка становится непрерывной (сливной), а её толщина и коэффициент утолщения уменьшаются. При этом увеличивается радиус завивания стружки, а в некоторых случаях стружка сходит в виде непрерывной ленты, что вызывает трудности с её безопасным отводом.

Влияние переднего угла на составляющие силы резания учитывается путем введения в формулы (1) поправочных коэффициентов  $K_{\gamma Pz}, K_{\gamma Py}, K_{\gamma Px}$ .

## 2. КОНСТРУКЦИЯ И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ТРЕХКОМПОНЕНТНОГО ЭЛЕКТРОИНДУКТИВНОГО ДИНАМОМЕТРА

В данной работе для измерения составляющих силы резания используется трёхкомпонентный электроиндуктивный динамометр, конструкция которого разработана В.Ф.Парамоновым [4].

Механическая часть динамометра, как видно из рис.2, представляет собой упругую систему, состоящую из люльки 6 и стоек 3 и 7, соединяющих её с корпусом 4. В передней части люльки имеется гнездо, в котором с помощью винтов 2 закрепляется резец 1.

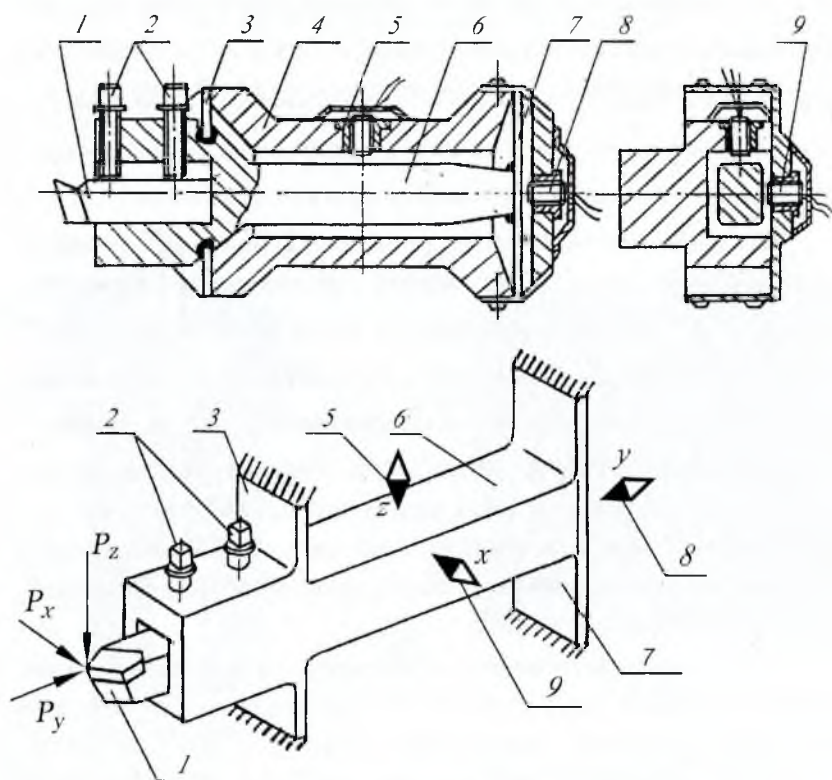


Рис.2. Схема механической части динамометра.

В корпусе динамометра в трёх взаимно перпендикулярных направлениях  $x$ ,  $y$ ,  $z$  установлены электроиндуктивные датчики 5, 8, 9, представляющие собой катушки, намотанные на стальные сердечники. Разомкнутые стороны магнитопроводов датчиков обращены к люльке, которая выполняет роль якоря. Величина начального зазора между люлькой и сердечниками катушек составляет 0,5 мм.

Под действием составляющих силы резания упругие элементы динамометра (стойки 3 и 7) деформируются, в результате чего изменяются зазоры между сердечниками индуктивных датчиков и люлькой, а следовательно и индуктивные сопротивления их обмоток. Так, касательная составляющая силы резания  $P_z$  приводит к изменению зазора между люлькой 6 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  $L1, L3, L5$ , закреплённых 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 включён регистрирующий прибор, в качестве которого могут быть использованы микроамперметр или осциллограф.

Плечи мостов подключены к источнику переменного тока со стабилизированным напряжением 15В. Для выпрямления тока используются полупроводниковые диоды  $VD1—VD12$ . Изменяя чувствительность динамометра путём включения в цепь дополнительных сопротивлений  $R7, R8, R9$  и т.д., можно получить различные диапазоны измерений.

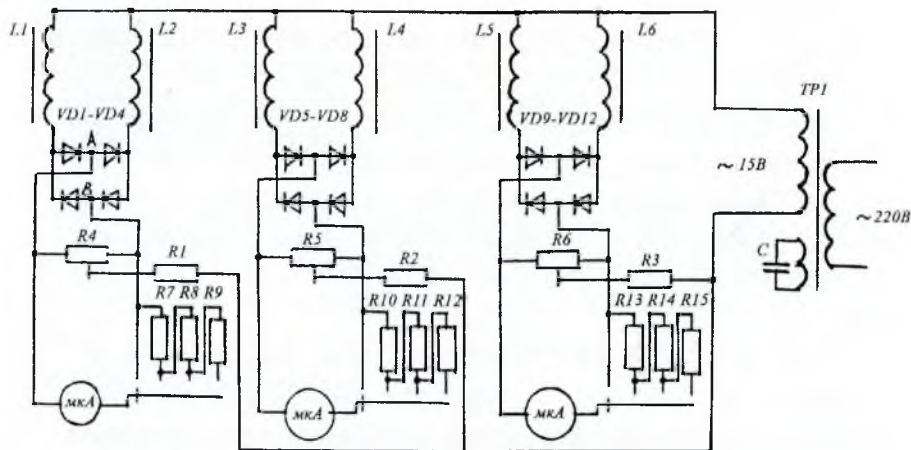


Рис. 3. Принципиальная электрическая схема динамометра.

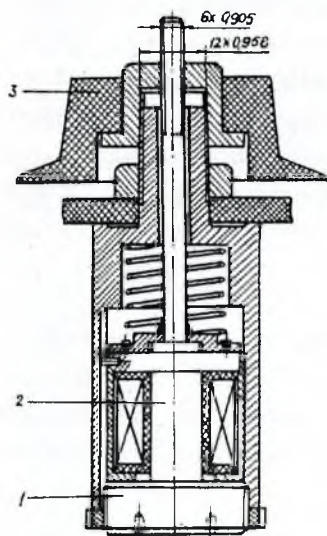


Рис. 4. Конструкция зататчика.

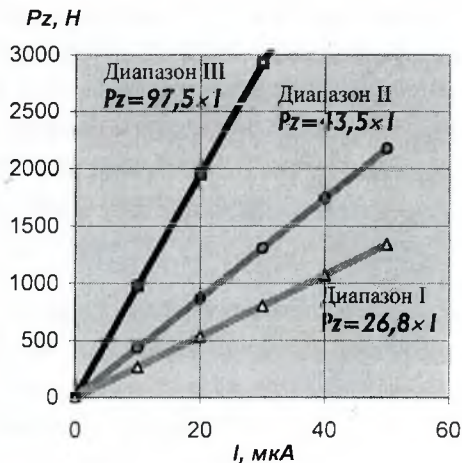


Рис. 5. Тарировочный график для нахождения составляющей  $P_z$ .

Перед началом эксперимента каждый из мостов приводится в равновесное состояние путём изменения индуктивных сопротивлений задатчиков (рис.4), что достигается за счёт изменения зазора между сердечником катушки задатчика 2 и якорем 1 при повороте соответствующих ручек 3 на пульте управления и настройки динамометра.

При проведении эксперимента вследствие деформаций упругих элементов динамометра, происходит изменение индуктивных сопротивлений датчиков. Это вызовет разбаланс мостов и появление токов в их диагоналях, величины которых будут пропорциональны значениям соответствующих составляющих силы резания и могут быть измерены с помощью микроамперметров или осциллографа.

Для того чтобы показания регистрирующих приборов можно было перевести в значения сил, выраженные в Ньютонах, предварительно производится тарировка динамометра. Тарировочная характеристика может быть представлена либо в виде графиков, либо в виде формул. В качестве примера на рис. 5 представлены тарировочные графики и формулы, по которым могут быть найдены значения касательной составляющей силы резания  $P_z$  для трёх различных по чувствительности диапазонов измерений.



### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВЛЯЮЩИХ СИЛЫ РЕЗАНИЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЭЛЕМЕНТОВ РЕЖИМА РЕЗАНИЯ И ПЕРЕДНЕГО УГЛА РЕЗЦА

Опыты проводятся на токарном станке 1К62 при продольном точении заготовки из конструкционной стали 45 проходным резцом, оснащённым пластинкой из быстрорежущей стали или твёрдого сплава. При этом могут использоваться методики однофакторного или многофакторного планирования экспериментов.

#### 3.1. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ОДНОФАКТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

При однофакторном эксперименте закономерности изменения составляющих силы резания в зависимости от элементов режима резания исследуются последовательно, для чего проводят три серии опытов.

В *первой серии опытов* (серии глубин резания) варьируемым параметром является глубина резания  $t$ , остальные параметры (подача  $s$ , скорость резания  $v$ , геометрия резца и др.) остаются постоянными. По результатам этой серии находится частная зависимость составляющих силы резания от глубины резания:

$$P_{z,y,x} = f(t). \quad (2)$$

Во *второй серии опытов* (серии подач) варьируемым параметром является подача  $s$ , все остальные параметры остаются постоянными. По результатам этой серии опытов находится частная зависимость составляющих силы резания от подачи:

$$P_{z,y,x} = f(s). \quad (3)$$

В *третьей серии опытов* (серии скоростей) варьируемым параметром является скорость резания  $v$ , а все остальные параметры ос-

таются постоянными. По результатам этой серии опытов находится частная зависимость составляющих силы резания от скорости:

$$P_{z,y,x} = f(v). \quad (4)$$

План опытов при однофакторном планировании эксперимента можно представить в виде табл. 1.

Таблица 1

### ПЛАН

проведения однофакторного эксперимента

Обрабатываемый материал: сталь 45. Резец: P18 или T15K6, геометрические параметры  $\phi =$  ;  $\phi_1 =$  ;  $\gamma =$  ;  $\alpha = \alpha_1 =$  ;  $\lambda =$  ;  $r_n =$  .

№ опыта	Серии опытов с изменением	Факторы			Результат
		$t$	$s$	$v$	
1	<i>глубины резания</i>	$t_1$	Одно из значений, взятых из серии подач, например, $s=s_2=const$	Одно из значений, взятых из серии скоростей, например, $v=v_2=const$	Частная зависимость $P_{z,y,x} = f(t)$ в табличной форме
2		$t_2$			
3		$t_3$			
4		$t_4$			
5	<i>подачи</i>	Одно из значений, взятых из серии глубин, например, $t=t_2=const$	$s_1$	$v=v_2=const$	Частная зависимость $P_{z,y,x} = f(s)$ в табличной форме
6			$s_2$		
7			$s_3$		
8			$s_4$		
9	<i>скорости резания</i>	$t=t_2=const$	$s=s_2=const$	$v_1$	Частная зависимость $P_{z,y,x} = f(v)$ в табличной форме
10				$v_2$	
11				$v_3$	
12				$v_4$	

При этом для более точного описания частных зависимостей количество опытов в каждой серии должно быть достаточно большим (не менее 4—5). Результаты измерений заносятся в протокол отчёта (см. Приложение).



Для представления частных зависимостей (2)—(4) в аналитической форме удобнее всего аппроксимировать их степенными функциями. Так, например, для касательной составляющей можно записать:

$$P_z = C_{1P_z} \cdot t^{x_{P_z}} \quad (5)$$

$$P_z = C_{2P_z} \cdot s^{y_{P_z}} \quad (6)$$

$$P_z = C_{3P_z} \cdot v^{z_{P_z}} \quad (7)$$

Коэффициенты и показатели степеней, входящие в формулы (5)-(7), могут быть найдены на основе использования графического метода, сущность которого изложена ниже.

### 3.2. ГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Сущность графического метода заключается в построении графиков функций (5)-(7) в двойных логарифмических координатах, в которых они будут представлены прямыми линиями (рис.6). Для пояснения прологарифмируем выражения (5)-(7):

$$\lg P_z = \lg C_{1P_z} + x_{P_z} \lg t,$$

$$\lg P_z = \lg C_{2P_z} + y_{P_z} \lg s,$$

$$\lg P_z = \lg C_{3P_z} + z_{P_z} \lg v.$$

Нетрудно заметить, что полученные после логарифмирования выражения представляют собой уравнения прямых линий. Тогда искомые показатели степеней  $x_{P_z}$ ,  $y_{P_z}$  и  $z_{P_z}$  могут быть найдены как угловые коэффициенты соответствующих прямых, т.е. будут равны тангенсам углов наклона этих прямых к оси абсцисс (рис.6):

$$x_{P_z} = \operatorname{tg} \alpha_1, \quad y_{P_z} = \operatorname{tg} \alpha_2 \quad \text{и} \quad z_{P_z} = \operatorname{tg} \alpha_3.$$

Коэффициенты  $C_{1P_z}$ ,  $C_{2P_z}$  и  $C_{3P_z}$  определяются как значения силы  $P_z$  соответственно при  $t=1,0$  мм,  $s=1,0$  мм/об и  $v=1,0$  м/мин.

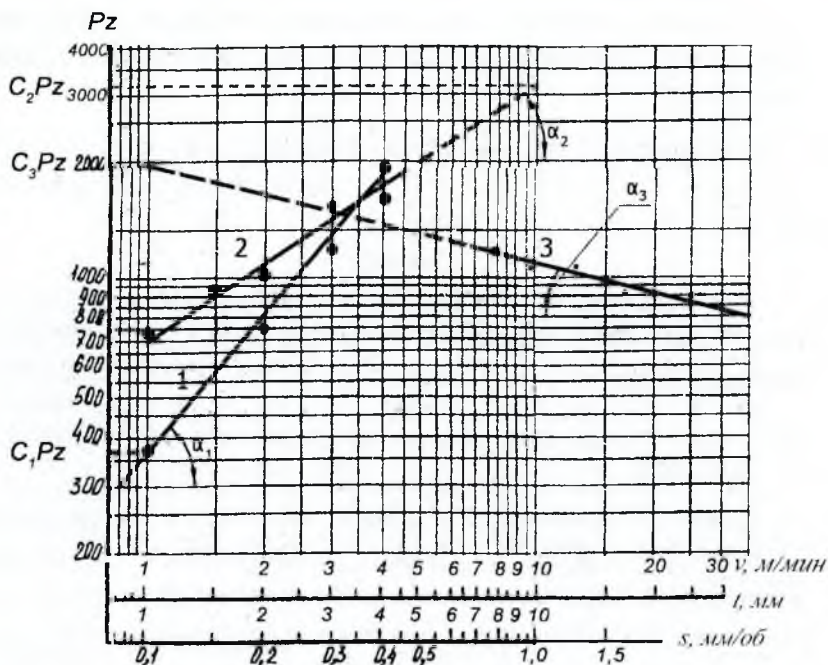


Рис. 6. Графики частных зависимостей касательной составляющей силы резания в двойных логарифмических координатах (сталь 45, резец P18,  $\gamma=10^\circ$ ;  $\alpha=\alpha_1=10^\circ$ ;  $\varphi=\varphi_1=45^\circ$ ;  $\lambda=0$ ;  $r_n=1,0\text{мм}$ ): 1 –  $P_z=385 v$ ; 2 –  $P_z=3150 s^{0,75}$ ; 3 –  $P_z=1980 v^{-0,15}$ .

Необходимо отметить, что в связи с наличием погрешностей при измерении сил резания экспериментальные точки, как правило, не лежат на одной прямой. Поэтому прямые линии необходимо проводить так, чтобы экспериментальные точки находились на наиболее близком расстоянии от прямых, а количество точек, расположенных выше и ниже прямой, было бы примерно одинаковым.

Аналогично строятся графики и находятся показатели степеней и коэффициенты в зависимостях для составляющих  $P_y$  и  $P_x$ .

### 3.3. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ОДНОФАКТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ

Рассмотренный выше графический метод обработки экспериментальных данных отличается простотой, но не обеспечивает достаточно высокой точности полученных формул. При повышенных требованиях к точности целесообразно использовать известный в математической статистике метод наименьших квадратов [5].

Поясним сущность этого метода на примере определения коэффициента и показателя степени в частной зависимости составляющей  $P_z$  от глубины резания. Как показано в п.3.1, эта зависимость может быть аппроксимирована степенной функцией вида

$$P_z = C_{1Pz} \cdot t^{x_{Pz}},$$

которая после логарифмирования приобретает следующий вид:

$$\ln P_z = \ln C_{1Pz} + x_{Pz} \ln t \quad (8)$$

Эта функция будет удовлетворять опытным данным с известным приближение. Поэтому после подстановки в уравнение прямой (8) различных величин глубин резания  $t$  и фактически измеренных в каждом опыте значений  $P_z$ , получим ряд отклонений  $\Delta$ :

$$\begin{aligned} \Delta_1 &= \ln P_{z(1)} - \ln C_{1Pz} - x_{Pz} \ln t_1, \\ \Delta_2 &= \ln P_{z(2)} - \ln C_{1Pz} - x_{Pz} \ln t_2, \\ &\dots\dots\dots \\ \Delta_i &= \ln P_{z(i)} - \ln C_{1Pz} - x_{Pz} \ln t_i, \\ &\dots\dots\dots \\ \Delta_n &= \ln P_{z(n)} - \ln C_{1Pz} - x_{Pz} \ln t_n, \end{aligned} \quad (9)$$

где  $i$  – порядковый номер опыта в серии глубин резания;  
 $n$  – количество опытов в серии глубин резания.

Согласно методу наименьших квадратов искомые величины  $C_{1Pz}$  и  $x_{Pz}$  могут быть найдены из условия, что сумма квадратов отклонений  $\Delta$  должна быть минимальной, то есть

$$\Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \dots + \Delta_i^2 + \dots + \Delta_n^2 = \min.$$

Дифференцируя это выражение по  $C_{1Pz}$  и  $x_{Pz}$  и приравнявая производные нулю, получаем систему двух уравнений:

$$\begin{aligned} 2\Delta_1 \frac{\delta \Delta_1}{\delta C_{1Pz}} + 2\Delta_2 \frac{\delta \Delta_2}{\delta C_{1Pz}} + \dots + 2\Delta_i \frac{\delta \Delta_i}{\delta C_{1Pz}} + \dots + 2\Delta_n \frac{\delta \Delta_n}{\delta C_{1Pz}} &= 0, \\ 2\Delta_1 \frac{\delta \Delta_1}{\delta x_{Pz}} + 2\Delta_2 \frac{\delta \Delta_2}{\delta x_{Pz}} + \dots + 2\Delta_i \frac{\delta \Delta_i}{\delta x_{Pz}} + \dots + 2\Delta_n \frac{\delta \Delta_n}{\delta x_{Pz}} &= 0. \end{aligned} \quad (10)$$

Подставляя в уравнения (10) отклонения  $\Delta_i$  в соответствии с (9) и решая совместно полученную систему уравнений, найдём выражения для определения коэффициента  $C_{1Pz}$  и показателя степени  $x_{Pz}$ :

$$C_{1Pz} = \exp \left[ \frac{\sum_{i=1}^n \ln P_{Zi} \cdot \sum_{i=1}^n (\ln t_i)^2 - \sum_{i=1}^n \ln t_i \cdot \sum_{i=1}^n \ln P_{Zi} \cdot \ln t_i}{n \cdot \sum_{i=1}^n (\ln t_i)^2 - \left( \sum_{i=1}^n \ln t_i \right)^2} \right] \quad (11)$$

$$x_{Pz} = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n \ln P_{Zi} \cdot \ln t_i - \sum_{i=1}^n \ln t_i \cdot \sum_{i=1}^n \ln P_{Zi}}{n \cdot \sum_{i=1}^n (\ln t_i)^2 - \left( \sum_{i=1}^n \ln t_i \right)^2} \quad (12)$$

Аналогичные по структуре формулы могут быть получены для определения коэффициентов и показателей степеней в частных зависимостях составляющей  $P_z$  от подачи и от скорости резания.

Произведя обработку результатов измерений радиальной составляющей  $P_y$  и осевой составляющей  $P_x$  по методу наименьших квадратов, находят частные зависимости этих составляющих от глубины резания, подачи и скорости резания.

Все расчёты, связанные с нахождением коэффициентов и показателей степеней в частных зависимостях для составляющих силы резания, целесообразно осуществлять с помощью ПЭВМ. В разд. 3.7 показана возможность использования для этой цели табличного процессора *EXCEL*.

#### 3.4. ПОЛУЧЕНИЕ ОБОБЩЁННЫХ ФОРМУЛ ДЛЯ РАСЧЁТА СОСТАВЛЯЮЩИХ СИЛЫ РЕЗАНИЯ

На основе найденных частных зависимостей составляющих  $P_z$ ,  $P_y$  и  $P_x$  от глубины, подачи и скорости резания можно получить обобщённые формулы для их расчёта, которые, как показано выше, принято представлять в виде степенных функций (1). При этом предполагается, что показатели степеней при глубине резания, подаче и скорости в обобщённых формулах имеют такие же значения, как и в частных зависимостях.

Значения коэффициентов  $C_{Pz}$ ,  $C_{Py}$  и  $C_{Px}$  могут быть найдены путём подстановки в выражения (1) различных значений  $t$ ,  $S$  и  $v$  в соответствии с планом эксперимента (табл.1) и измеренных при этом величин составляющих силы резания, взятых из протокола отчёта (см. Приложение).

Решая полученные уравнения относительно коэффициентов  $C_{Pz}$ ,  $C_{Py}$  и  $C_{Px}$ , определяют ряд их значений и находят средние арифметические, которые и принимаются в качестве обобщённых коэффициентов. Так, например, для составляющей  $P_z$  получим:

$$C_{Pz(i)} = \frac{P_{zi}}{t_i^{x_{Pz}} \cdot S_i^{y_{Pz}} \cdot v_i^{z_{Pz}}},$$

где  $t_i, S_i$  и  $v_i$  – глубина, подача и скорость резания в  $i$ -том опыте;  $P_{zi}$  – измеренное значение составляющей  $P_z$  в  $i$ -том опыте.

$$\text{Окончательно } C_{Pz} = \frac{\sum_{i=1}^n C_{Pz(i)}}{n},$$

где  $n$  – количество опытов, выбранных для расчёта обобщённого коэффициента. Для более точного определения коэффициента  $C_{Pz}$  величину  $n$  следует принимать равной общему количеству опытов во всех трёх сериях. Расчёт обобщённых коэффициентов  $C_{Pz}, C_{Py}$  и  $C_{Px}$  также может быть выполнен с помощью ПЭВМ и табличного процессора EXCEL (см. разд. 3.7).

После нахождения этих коэффициентов окончательно записываются обобщённые формулы (1) с указанием значений коэффициентов и показателей степеней. Полученные формулы следует сопоставить с приведенными в нормативах по режимам резания [3].

### 3.5. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЕРЕДНЕГО УГЛА РЕЗЦА НА СОСТАВЛЯЮЩИЕ СИЛЫ РЕЗАНИЯ

Для исследования влияния переднего угла на составляющие силы резания проводятся опыты по точению резцами, заточенными с различными передними углами  $\gamma$ . При этом элементы режима резания ( $t, s$  и  $v$ ) в этой серии опытов сохраняются постоянными. План эксперимента представлен в протоколе отчёта. В таблицу протокола заносятся результаты измерений составляющих силы резания  $P_z, P_y$  и  $P_x$ , а также наблюдения за изменением характера стружки



и степени её деформации. При этом коэффициент утолщения, как отмечалось выше, рассчитывается по формуле  $K_a = \frac{a_1}{a}$ .

Толщина стружки  $a_1$  легко может быть измерена с помощью микрометра, для чего необходимо собрать образцы стружек, полученных при обработке резцами с различными углами  $\gamma$ . Толщина среза рассчитывается по формуле:

$$a = s \cdot \sin \varphi, \text{ где } \varphi - \text{ главный угол резца в плане.}$$

При расчёте поправочных коэффициентов  $K_{\gamma Pz}, K_{\gamma Py}, K_{\gamma Px}$ , учитывающих влияние переднего угла на составляющие силы резания, за базу сравнения, согласно нормативам по режимам резания, принимаются значения составляющих, полученные при использовании: твёрдосплавных резцов с  $\gamma = 10^\circ$ , быстрорежущих резцов с  $\gamma = 25^\circ$ , если  $\sigma_b$  обрабатываемого материала меньше или равно 800 МПа, или  $\gamma = 20^\circ$ , если  $\sigma_b > 800$  МПа.

Поправочные коэффициенты находятся как отношения величин составляющих, измеренных при данном значении переднего угла  $\gamma$ , к величинам, полученным при работе с приведенными выше «эталонными» значениями угла  $\gamma$ :

$$K_{\gamma Pz} = P_z(\gamma) / P_{z\gamma_{эм}}, \quad K_{\gamma Py} = P_y(\gamma) / P_{y\gamma_{эм}},$$

$$K_{\gamma Px} = P_x(\gamma) / P_{x\gamma_{эм}}.$$

Результаты расчётов также заносятся в таблицу протокола.



### 3.6. УДЕЛЬНАЯ СИЛА И МОЩНОСТЬ РЕЗАНИЯ

Важными энергетическими показателями процесса резания являются удельная сила и мощность резания.

Удельной силой принято называть отношение касательной составляющей силы резания  $P_z$  к площади номинального сечения среза:

$$p = \frac{P_z}{t \cdot s}, \text{ МПа} \quad (13)$$

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

$$N_p = \frac{P_z \cdot v}{60}, \text{ Вт} \quad (14)$$

Как показали многочисленные исследования, удельная сила  $p$  представляет собой нелинейную функцию от параметров сечения среза: глубины резания и подачи:

$$p = \frac{K}{t^\lambda \cdot s^\mu}, \quad (15)$$

где  $K$  – коэффициент, зависящий от свойств обрабатываемого материала, геометрии инструмента, скорости резания и других факторов;

$\mu$  – показатель степени, определяемый пластическими свойствами обрабатываемого материала  $\mu = 0,1 - 0,4$ ;

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

Как видно из выражения (15), 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, получившая название закона об удельной силе 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, удельные затраты, отнесённые к единице объёма снимаемого припуска, уменьшаются.

Для того чтобы проверить, соответствуют ли результаты проведенного эксперимента закону об удельной силе резания, необходимо выбрать из серии глубин резания и серии подач (см. табл.1) по 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 формулы (13) и (14), определяют удельную силу резания  $p$  и мощность  $N_p$ . На основе сопоставления полученных результатов делается вывод о характере изменения удельной силы и мощности резания при увеличении глубины резания и подачи. Полученные данные и результаты их анализа заносятся в отчёт по лабораторной работе (см. Приложение).

### 3.7. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТАБЛИЧНОГО ПРОЦЕССОРА EXCEL ДЛЯ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Как показано выше, для обработки экспериментальных данных при исследовании сил резания целесообразно использовать метод наименьших квадратов. Однако применение этого метода осложняется необходимостью выполнения довольно трудоёмких расчётов. Снижение трудоёмкости рас-

чѐтов и автоматизация процессов обработки экспериментальных данных могут быть достигнуты на основе использования табличного процессора EXCEL. Ниже приведена электронная таблица (рис.7), которая состоит из следующих зон (блоков).

В первом блоке, охватывающем столбцы А-Е, содержатся условия проведения опытов (глубина резания  $t$ , подача  $s$ , скорость  $v$ , передний угол  $\gamma$ ).

Во втором блоке (столбцы G-I) указываются измеренные значения составляющих силы резания  $P_z$ ,  $P_y$ ,  $P_x$ . Оба блока образуют область исходных данных. Эти данные заносятся в электронную таблицу из сводного бланка отчѐта по лабораторной работе и могут изменяться в зависимости от условий проведения экспериментов и полученных при этом результатов.

Диапазон ячеек R2:AC19 является рабочей зоной, в ячейках которой содержатся формулы, используемые в методе наименьших квадратов (п.3.3). По этим формулам производятся все промежуточные расчѐты, необходимые для нахождения коэффициентов и показателей степеней в частных зависимостях составляющих силы резания от глубины резания  $t$ , подачи  $s$  и скорости резания  $v$ .

В четвертой зоне, охватывающей ячейки J1:L18, занесены формулы для расчѐта значений коэффициентов и показателей степеней в частных зависимостях, а также результаты этих расчѐтов и сами зависимости. При изменении исходных данных происходит автоматический пересчѐт всей таблицы.

Пятая зона (столбцы M-O) предназначена для размещения формул и результатов расчѐтов коэффициентов  $C_{Pz}$ ,  $C_{Py}$ ,  $C_{Px}$  в обобщенных формулах (1), а сами формулы записываются в блоке ячеек N22:N25.

Влияние переднего угла резца  $\gamma$  на составляющие силы резания учитывается, как отмечалось выше в п.3.5, введением в обобщѐнные формулы поправочных коэффициентов. Эти коэффициенты определяются по данным, полученным при проведении серии опытов с изменяющимися передними углами, и приведены в зоне 6, включающей блок ячеек A20:L26.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M		N	O	P	Q		
												SR7	CPX						
1	Серия опытов с изменением...	№	Исходные данные					Частные зависимости					Нахождение обобщенных коэффициентов		Удельная сила	Мощность резания			
2		1	s	y	γ	Pz, H	Px, H	Rx, H	467,15	268,43	150,96	0,96	0,79	0,86	2049,44	1253,28	632,45	2204,8	145,1
3	глубины	2	0,21	18,8	25	463	282	145	0,96	0,79	0,86			2095,20	1072,04	730,49	2185,7	287,6	
4	резания	3	0,21	18,8	25	918	417	305	Pz=467 t*(0,36)					2091,41	1216,93	622,38	2142,9	423,0	
5		4	0,21	18,8	25	1350	652	369	Pγ=268 t*(0,79)					2035,90	1238,79	653,63	2059,5	542,1	
6		4	0,21	18,8	25	1730	833	497	Px=151 t*(0,86)										
7																			
8									4476,30	2014,21	1564,43								
9	подачи	5	0,11	18,8	25	855	385	300	0,75	0,75	0,75			2151,19	1166,86	820,97	2590,9	267,9	
10		6	0,21	18,8	25	1389	625	486	Pz=4476 s*(0,75)					2151,82	1166,53	819,71	2204,8	435,2	
11	скорости	7	0,34	18,8	25	1993	897	698	Pγ=2014 s*(0,75)					2151,18	1166,60	820,86	1953,9	624,5	
12	резания	8	0,43	18,8	25	2377	1070	832	Px=1564 s*(0,75)					2151,35	1166,94	820,73	1842,6	744,8	
13																			
14									1271,56	574,42	439,28								
15		9	0,21	15,1	25	947	426	331	0,11	0,11	0,10			2110,78	1069,19	774,92			
16		10	0,21	18,8	25	927	417	324	Pz=1272 v*(0,11)					2115,74	1072,04	776,00			
17		11	0,21	23,5	25	905	407	317	Pγ=574 v*(0,11)					2115,96	1072,24	777,04			
18		12	0,21	30,1	25	879	395	308	Px=439 v*(0,1)					2110,91	1069,24	774,65			
19									коэффициенты										
20														2111	1144	752			
21																			
22	переднего угла	13	0,21	18,8	0	1527	687	534	KPz	KPy	KPx								
23		14	0,21	18,8	15	1319	594	462	1,33	1,33	1,33								
24		15	0,21	18,8	20	1250	563	436	1,15	1,15	1,15								
25		16	0,21	18,8	25	1149	517	402	1,09	1,09	1,08								
26		17	0,21	18,8	30	1051	480	370	1,00	1,00	1,00								
									0,91	0,93	0,92								
									Обобщенные формулы:										
									Pz=2111 t*(0,96) s*(0,75) v*(0,11) kPx										
									Py=1144 t*(0,79) s*(0,75) v*(0,11) kPy										
									Px=752 t*(0,86) s*(0,75) v*(0,1) kPx										

Рис.7. Электронная таблица «Результаты исследования сил резания при точении».



Последней, 7-ой зоной электронной таблицы является область, включающая диапазон ячеек P1:Q12. В этой зоне содержатся формулы и результаты расчётов удельной силы  $\rho$  и мощности резания  $N_{рез}$  в зависимости от глубины резания  $t$  и подачи  $s$ . Эти данные позволяют проверить, соответствуют ли результаты проведенного исследования закону об удельной силе резания.

Помимо табличной формы представления результатов обработки экспериментальных данных, EXCEL даёт возможность их графического отображения. В качестве примера на рис.8 приведены графики частных зависимостей составляющих  $P_z$ ,  $P_y$ ,  $P_x$  от глубины резания  $t$  и их линейные аппроксимации.

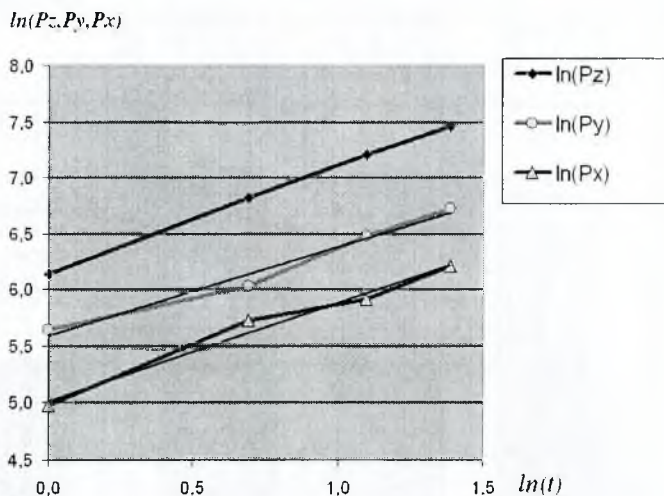


Рис.8. Зависимость составляющих силы резания от глубины резания.

Таким образом, использование компьютера и табличного процессора EXCEL позволяет существенно упростить и автоматизировать процесс обработки экспериментальных данных и получения обобщённых формул для расчёта составляющих силы резания.

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с методическими указаниями к лабораторной работе.
2. Ознакомиться с конструкцией динамометра, его установкой на станке и регистрирующей аппаратурой.
3. В соответствии с заданием, полученным от преподавателя, составить план однофакторного эксперимента и занести его в бланк отчёта (см. Приложение).
4. Провести четыре серии экспериментального исследования (серии глубин, подач, скоростей резания и передних углов) и измеренные значения составляющих силы резания занести в бланк отчёта.
5. Построить графики зависимостей одной из составляющих силы резания (по указанию преподавателя) от глубины резания  $t$ , подачи  $s$  и скорости резания  $v$  в двойных логарифмических координатах.
6. Определить графически показатели степеней и коэффициенты в частных зависимостях. Привести частные зависимости на соответствующих графиках.
7. Рассчитать коэффициенты в обобщённых формулах. Привести результаты расчётов и записать обобщённые формулы для составляющих силы резания в бланке отчёта.
8. Используя данные, полученные в серии передних углов, определить поправочные коэффициенты к обобщённым формулам, а также привести результаты наблюдений за изменением характера стружки и степени её деформации при изменении переднего угла резца.
9. Для разных значений глубины резания и подачи определить удельную силу  $p$  и мощность резания  $N_{рез}$ . Сделать вывод о характере их изменения с увеличением глубины резания и подачи.
10. Используя электронную таблицу (ЭТ), ввести исходные данные, получить распечатку ЭТ на принтере и приложить её к отчёту.
11. Просмотреть на экране дисплея графики частных зависимостей и дать заключение об их характере в отчёте. Напечатать и приложить к отчёту графики зависимостей составляющих силы резания от переднего угла резца и графики зависимостей удельной силы и мощности резания от подачи.
12. Оформленный отчёт по лабораторной работе предъявить преподавателю.

## 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 трёхкомпонентного электроиндуктивного динамометра?
4. В чём сущность методики однофакторного эксперимента при исследовании зависимостей составляющих силы резания от элементов режима резания и геометрии инструментов?
5. Какие математические модели чаще всего используются для аппроксимации зависимостей составляющих силы резания от элементов режима резания?
6. В чём сущность графического метода обработки результатов эксперимента? Его преимущества и недостатки.
7. В чём заключается обработка результатов эксперимента по методу наименьших квадратов? Преимущества этого метода.
8. Охарактеризовать и объяснить влияние элементов режима резания ( $t$ ,  $s$  и  $v$ ) на составляющие силы резания.
9. Охарактеризовать и объяснить влияние переднего угла резца  $\gamma$  на составляющие силы резания.
10. Как получаются обобщённые формулы для расчёта составляющих силы резания в зависимости от элементов режима резания и геометрии инструмента?
11. Что представляют собой удельная сила и мощность резания? Как они изменяются с увеличением глубины резания и подачи?
12. В чём заключается использование табличного процессора EXCEL для обработки результатов эксперимента и получения формул для расчёта составляющих силы резания? Каковы его преимущества?



## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бурмистров Е.В., Самыкин В.Н. Исследование сил резания при точении: метод. указания к лаб. работе / Е.В.Бурмистров, В.Н.Самыкин. – Самара: Изд-во СГАУ, 1996. – 36с.
2. Зайцев В.М., Трусов В.Н., Урывский Ф.П. Исследование сил резания при точении: метод. указания к лаб. работе / В.М.Зайцев, В.Н.Трусов, Ф.П.Урывский. – Куйбышев: Изд-во КуАИ, 1983. – 8с.
3. Лепилин В.И. Режимы резания авиационных материалов при точении: Учеб. пособие. / В.И.Лепилин. - Самара: Изд-во СГАУ, 2000. – 128с.
4. Полетика М.Ф. Приборы для измерения сил резания и крутящих моментов. М.:Машгиз, 1963. – 108с.
5. Турчак Л.И. Основы численных методов./ Л.И.Турчак.- М.:Наука, 1987. – С.32-34.

Кафедра  
механической обработки  
материалов

Студент \_\_\_\_\_

Группа \_\_\_\_\_ Дата \_\_\_\_\_

## ОТЧЕТ

по лабораторной работе

### Исследование сил резания при точении

1. Исходные данные и результаты эксперимента.

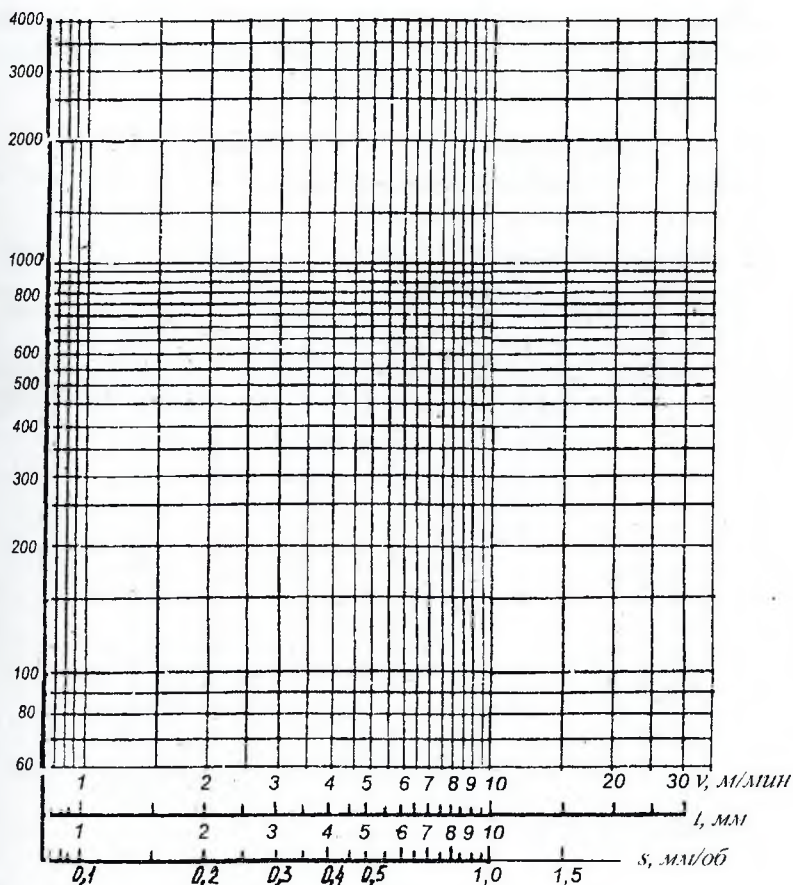
Обрабатываемый материал: \_\_\_\_\_, диаметр заготовки  $D_{заг.} =$  \_\_\_\_\_

Резец: инструм. материал - \_\_\_\_\_; геометрические параметры:  $\varphi =$  \_\_\_\_\_;

$\varphi_1 =$  \_\_\_\_\_;  $\gamma =$  \_\_\_\_\_;  $\alpha = \alpha_1 =$  \_\_\_\_\_;  $\lambda =$  \_\_\_\_\_;  $r_b =$  \_\_\_\_\_.

№ опыта	Серии опытов с изменением	Режим резания				Показания приборов, мкА при измерении			Значения составляющих силы резания, Н		
		$t$ , мм	$s$ , мм/об	$n$ , об/мин	$v$ , м/мин	$P_z$	$P_y$	$P_x$	$P_z$	$P_y$	$P_x$
1	глубины резания										
2											
3											
4											
5	подачи										
6											
7											
8											
9	скорости резания										
10											
11											
12											

2. Графики частных зависимостей составляющих силы резания от глубины  $t$ , подачи  $s$  и скорости резания  $v$ .\*



Показатели степеней:

Коэффициенты:

\* Если значения какой-либо составляющей окажется больше 2000Н, числовые значения, отмеченные на оси ординат, следует увеличить на порядок.

3. Частные зависимости и обобщённые формулы для расчёта составляющих силы резания:

4. Влияние *переднего угла резца* на составляющие силы резания, характер и степень деформации стружки. Расчёт поправочных коэффициентов к обобщённым формулам.

Обрабатываемый материал: \_\_\_\_\_, диаметр заготовки  $D_{зас} =$  \_\_\_\_\_  
 Резец: \_\_\_\_\_; геометрические параметры:  $\varphi =$  \_\_\_\_\_;  $\varphi_1 =$  \_\_\_\_\_;  $\gamma =$  \_\_\_\_\_;  
 $\alpha = \alpha_1 =$  \_\_\_\_\_;  $\lambda =$  \_\_\_\_\_;  $r_b =$  \_\_\_\_\_  
 Элементы режима резания:  $t =$  \_\_\_\_\_ мм;  $s =$  \_\_\_\_\_ мм/об;  $n =$  ..... об/мин;  
 $v =$  \_\_\_\_\_ м/мин.

№ оп.	Угол $\gamma$	Показания приборов, мкА при измерении			Значения составляющих силы резания, Н			Поправочные коэффициенты			$a_f$ мм	К
		$P_z$	$P_y$	$P_x$	$P_z$	$P_y$	$P_x$	$K_{\gamma P_z}$	$K_{\gamma P_y}$	$K_{\gamma P_x}$		
1												
2												
3												
4												
5												
6												

Характер стружки:

5. Расчёт удельной силы  $p$  и мощности резания  $N_p$ . Заключение о соответствии результатов эксперимента закону об удельной силе резания.

6. Индивидуальное задание (№ вопроса по методическим указаниям к лабораторной работе)

Преподаватель \_\_\_\_\_

*Учебное издание*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛ РЕЗАНИЯ ПРИ ТОЧЕНИИ**

*Методические указания к лабораторной работе*

Составители:

*Е.В. Бурмистров,*

*В.Н.Самыкин*

Компьютерная верстка В.Н. Самыкин

Государственное образовательное учреждение высшего  
профессионального образования «Самарский государственный  
аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева».  
443086 Самара, Московское шоссе, 34

---