

**САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ АКАДЕМИКА С. П. КОРОЛЕВА**

**ИССЛЕДОВАНИЕ
СИЛ РЕЗАНИЯ
ПРИ ТОЧЕНИИ**

(Однофакторный эксперимент)

САМАРА 1996

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ПО ВЫСШЕМУ ОБРАЗОВАНИЮ

САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С. П. КОРОЛЕВА

ИССЛЕДОВАНИЕ
СИЛ РЕЗАНИЯ
ПРИ ТОЧЕНИИ

(ОДНОФАКТОРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ)

Методические указания к лабораторной работе

САМАРА 1996

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

УДК 621.9.539.621.317.004.14

Исследование сил резания при точении: Метод. указания к лаб. работе /Самар. гос. аэрокосмич. университет; Сост.: Е. В. Бурмистров, В. Н. Самыкин. Самара, 1996. 36 с.

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

Предназначены для студентов дневного и вечернего обучения I, II, III, IV факультетов. Выполнены на кафедре РСИ.

Печатаются по решению редакционно-издательского совета Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С. П. Королева.

Рецензент доц. А. В. Тарасов

СОДЕРЖАНИЕ

1. Силы, действующие на резец при точении	4
2. Конструкция и принцип действия трехкомпонентного электроиндуктивного динамометра	8
3. Экспериментальное исследование составляющих силы резания в зависимости от элементов режима резания (t , s , v) и переднего угла γ	11
3.1. Методика проведения однофакторного эксперимента	11
3.2. Графический метод обработки экспериментальных данных	14
3.3. Обработка результатов однофакторного эксперимента с использованием метода наименьших квадратов	15
3.4. Получение обобщенных формул для расчета составляющих силы резания	17
3.5. Исследование влияния переднего угла резца γ на составляющие силы резания	18
3.6. Удельная сила и мощность резания	19
3.7. Использование табличного процессора СУПЕРКАЛК для получения обобщенных формул	21
4. Порядок выполнения работы	24
Контрольные вопросы	25
Библиографический список	26
П р и л о ж е н и е	27

Цель лабораторной работы: ознакомление с методикой экспериментального исследования сил резания в зависимости от элементов режима резания и геометрии инструмента и получение эмпирических формул для их расчета; изучение динамометрической и регистрирующей аппаратуры, используемой для исследования сил резания.

1. СИЛЫ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ НА РЕЗЦ ПРИ ТОЧЕНИИ

Схема сил, действующих на резец в процессе точения при работе одним режущим лезвием, представлена на рис. 1. Как видно

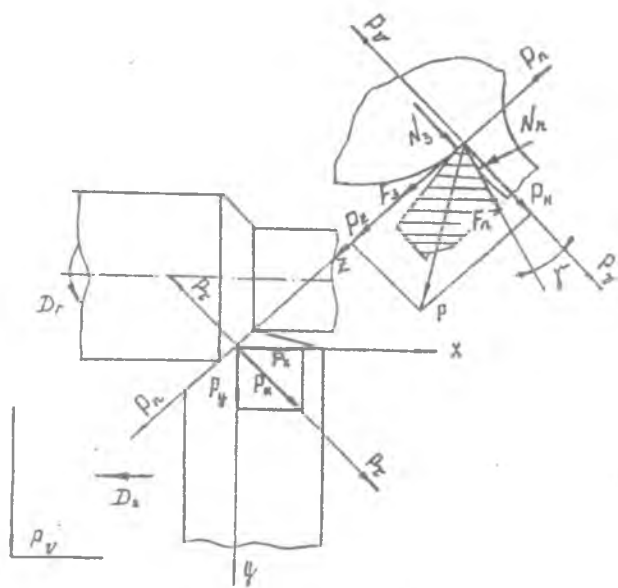


Рис. 1. Схема сил, действующих на резец при точении

из этой схемы, на переднюю и заднюю поверхности резца действуют следующие силы: N_{Π} - сила, нормальная к передней поверхности и определяемая сопротивлением срезаемого слоя пластической деформации; F_{Π} - сила трения на передней поверхности;

N_3 - сила, нормальная к контактной площадке на задней поверхности резца, определяемая упруго-пластическим оттеснением и упругим восстановлением поверхностного слоя; F_3 - сила трения на задней поверхности.

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

P_z - главную, применительно к процессу точения ее часто называют также касательной 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 ее составляющие:

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

Знание составляющих силы резания необходимо для выполнения расчетов на прочность, жесткость и виброустойчивость элементов конструкций станков и режущих инструментов, определения наиболее выгодных режимов резания, точностных расчетов и т. д.

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 и резец. Поэтому знание ее необходимо для расчета на прочность механизма подачи станка.

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, 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 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.

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 в формулах (1) приводятся в нормативах по режимам резания [1]. 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 γ (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 ее деформации: коэффициенты утолщения $K_a = a_1/a$, уширения $K_b = b_1/b$ и укорочения $K_l = l/l_1$, где a , b , l — соответственно толщина, ширина и длина среза; a_1 , b_1 , l_1 — толщина, ширина и длина стружки. При обработке углеродистых конструкционных сталей резцами с малыми и, в особенности, с отрицательными передними

углами образуется, как правило, суставчатая стружка, которая состоит из отдельных, четко просматриваемых элементов, прочно соединенных друг с другом. При больших положительных передних углах ($\gamma = 20 - 25^\circ$) стружка становится непрерывной (сливной), а ее толщина и коэффициент утолщения уменьшаются. При этом увеличивается и радиус завивания стружки, а в некоторых случаях стружка сходит в виде непрерывной ленты, что вызывает трудности с ее безопасным отводом.

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

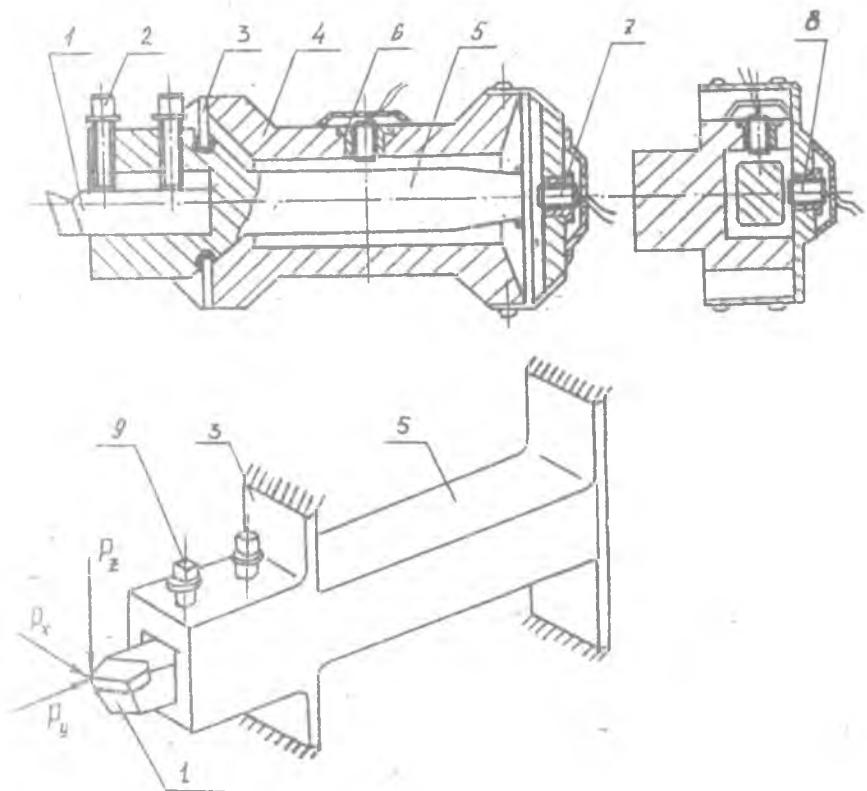


Рис. 2. Схема механической части динамометра

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.

Механическая часть динамометра, как видно из рис. 2, представляет собой упругую систему, состоящую из люльки 5 и стоек 3 и 9, 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 6, 7, 8, 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 следовательно и индуктивные сопротивления их обмоток. Так, главная (касательная) составляющая силы резания P_z приводит к изменению зазора между люлькой и датчиком 6, радиальная составляющая P_y — к изменению зазора между люлькой и датчиком 7, осевая составляющая P_x — к изменению зазора между люлькой и датчиком 8.

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 быть использованы микроамперметр или осциллограф.

Плечи мостов подключены к источнику переменного тока со стабилизированным напряжением 15—20 В. Для выпрямления

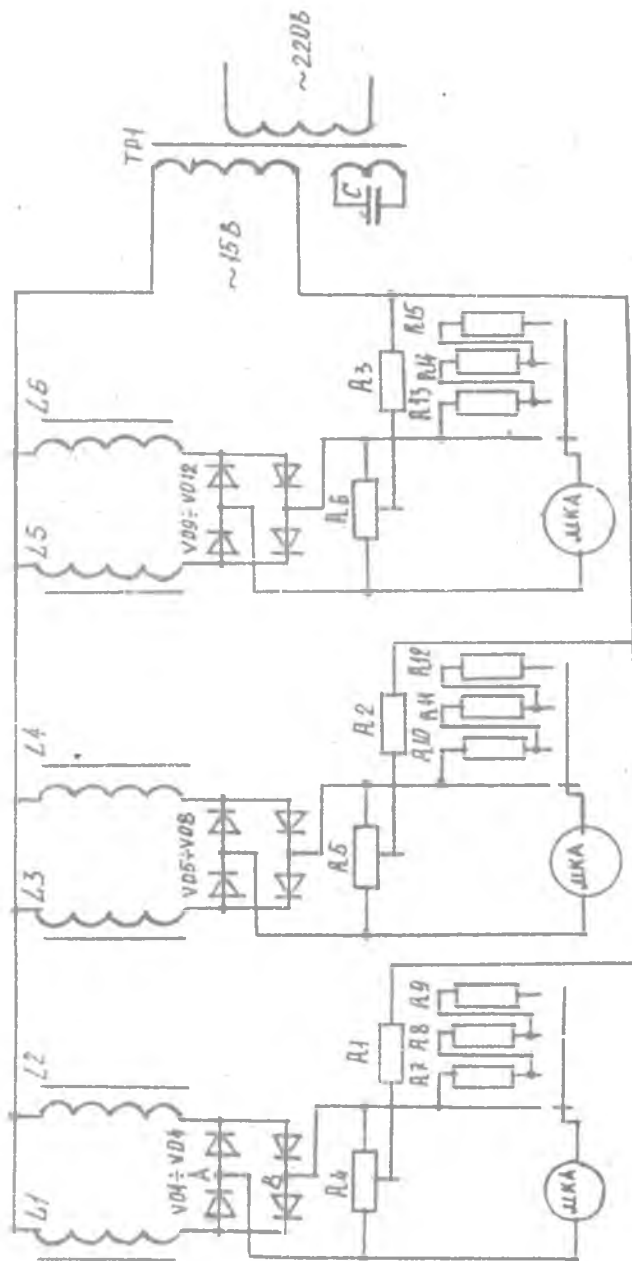


Рис. 3. Электрическая схема динамометра

тока используются полупроводниковые диоды VD1—VD12. Изменяя чувствительность динамометра путем включения в цепь дополнительных сопротивлений $R7$, $R8$, $R9$ и т. д., можно получить различные диапазоны измерений.

Перед началом эксперимента каждый из мостов приводится в равновесное состояние регулированием индуктивных сопротивлений задатчиков, что достигается за счет изменения зазора между

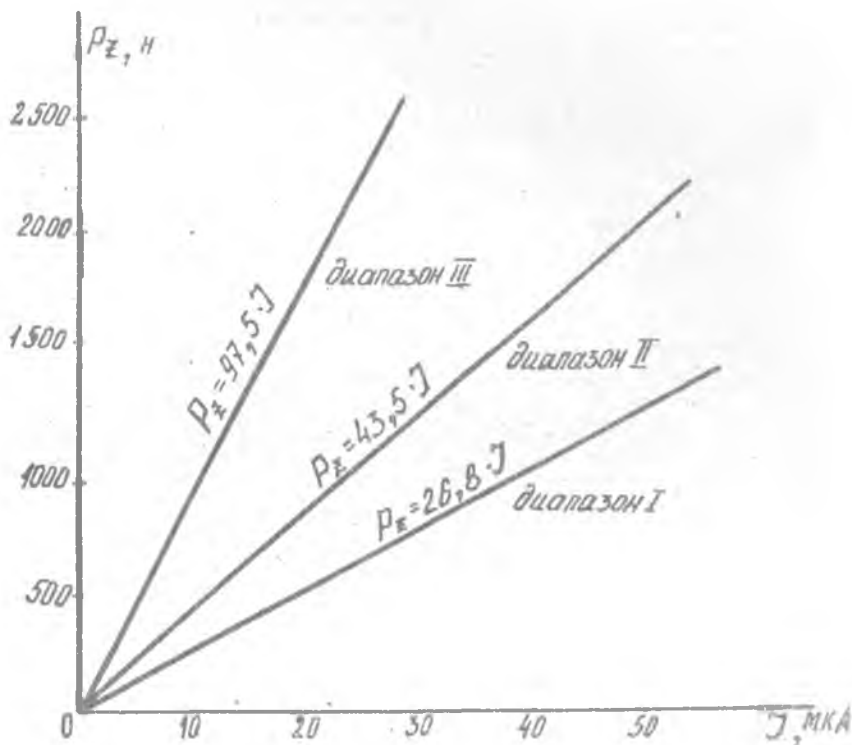


Рис. 4. Тарировочный график

сердечником катушки задатчика и якорем при повороте соответствующих ручек на пульте управления и настройки 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 либо в виде тарировочных графиков, либо в виде формул (рис. 4).

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВЛЯЮЩИХ СИЛЫ РЕЗАНИЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЭЛЕМЕНТОВ РЕЖИМА РЕЗАНИЯ (t , S , v) И ПЕРЕДНЕГО УГЛА РЕЗЦА γ

Опыты проводятся на токарном станке 1К62 при продольном точении заготовки из конструкционной стали 45 проходным резцом, оснащенный пластинкой из быстрорежущей стали или твердого 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 ($t=\text{var}$), остальные параметры (подача S , скорость резания v , геометрия резца и др.) остаются постоянными. В результате 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 ($S=\text{var}$), 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 ($v=\text{var}$), а все остальные параметры остаются постоянными. По результатам этой серии опытов определяется 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. 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 отчета (приложение, с. 27).

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

$$P_z = C_{1pz} \cdot t^{npz}, \quad (5)$$

$$P_z = C_{2pz} \cdot S^{npz}, \quad (6)$$

$$P_z = C_{3pz} \cdot v^{npz}. \quad (7)$$

План проведения однофакторного эксперимента

Обрабатываемый материал: сталь 45;

Резец: P18 или T15K6; $\varphi =$; $\varphi_1 =$; $\gamma =$; $\alpha = \alpha_1 =$; $\lambda =$; $r_B =$.

№ опыта	Серия опытов с изменением	Факторы			Результат
		t	S	v	
1	глубины резания	t_1	Одно из значений, взятых из серии подачи, например $S = S_2 = \text{const}$	Одно из значений, взятых из серии скоростей, например $v = v_2 = \text{const}$	Частная зависимость $P_{z,y,x} = f(t)$ в табличной форме
2		t_2			
3		t_3			
4		t_4			
5	подачи	Одно из значений, взятых из серии глубин, например, $t = t_2 = \text{const}$	S_1	$v = v_2 = \text{const}$	Частная зависимость $P_{z,y,x} = f(S)$ в табличной форме
6			S_2		
7			S_3		
8			S_4		
9	скорости резания	$t = t_2 = \text{const}$	$S = S_2 = \text{const}$	v_1	Частная зависимость $P_{z,y,x} = f(v)$ в табличной форме
10				v_2	
11				v_3	
12				v_4	

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

3.2. ГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Метод логарифмических анаморфоз заключается в построении графиков функций (5)—(7) в двойных логарифмических координатах, в которых они будут представлены прямыми линиями (рис. 5). Для пояснения прологарифмируем выражения (5)—(7):

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

$$\lg P_z = \lg C_{2pz} + y_{pz} \cdot \lg S,$$

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

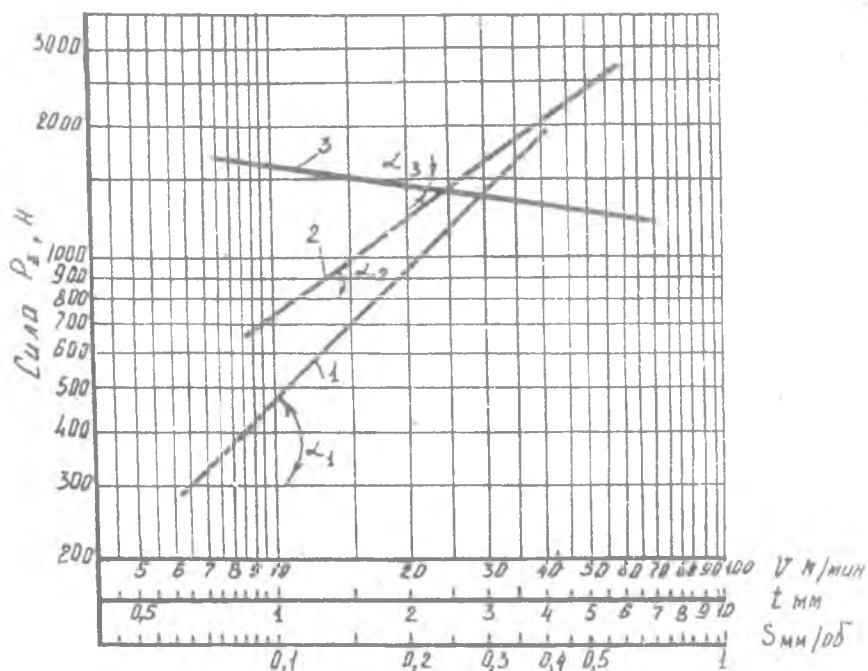


Рис. 5. Графики частных зависимостей касательной составляющей силы резания в двойных логарифмических координатах:

(Сталь 45, резец P18, $\gamma = 10^\circ$; $\alpha = 10^\circ$; $\varphi = \varphi_1 = 45^\circ$; $\lambda = 0$)

1 — $P_z = 48,5t$, 2 — $P_z = 4058S^{0,75}$, 3 — $P_z = 2243v^{-0,15}$.

Нетрудно заметить, что полученные после логарифмирования выражения представляют собой уравнения прямых линий. Тогда искомые показатели степеней x_{pz} , y_{pz} и z_{pz} могут быть найдены как угловые коэффициенты соответствующих прямых, т. е. будут равны тангенсам углов наклона прямых к оси абсцисс (рис. 5).

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

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

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 находят показатели степеней и коэффициенты в частных 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 [2].

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

$$P_z = C_{1pz} \cdot t^{\varphi z},$$

которая после логарифмирования приобретает следующий вид:

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

Эта функция будет удовлетворять опытным данным с известным приближением. Поэтому после подстановки в уравнение прямой (8) фактически измеренных в каждом опыте значений P_z и глубин резания t получим ряд отклонений Δ :

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

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 Δ 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 Δ_i в соответствии с (9) и решая совместно полученную систему уравнений, найдем выражения для определения коэффициента C_{1pz} и показателя степени X_{pz} :

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

$$X_{pz} = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n \ln P_{zi} \cdot \ln t_i - \sum_{i=1}^n \ln t_i \cdot \sum_{i=1}^n \ln P_{zi}}{n \cdot \sum_{i=1}^n (\ln t_i)^2 - \left(\sum_{i=1}^n \ln t_i \right)^2}. \quad (12)$$

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 графическим методом или по методу наименьших квадратов, находят частные зависимости этих составляющих от глубины резания, подачи и скорости.

Все расчеты, 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 СУПЕРКАЛК.

3.4. ПОЛУЧЕНИЕ ОБОБЩЕННЫХ ФОРМУЛ ДЛЯ РАСЧЕТА СОСТАВЛЯЮЩИХ СИЛЫ РЕЗАНИЯ

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 (1). При этом предполагается, что показатели степеней при глубине резания, подаче и скорости в 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 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 отчета (приложение, с. 27).

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 обобщенных 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.
Окончательно

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

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 трех сериях.

Расчет обобщенных коэффициентов C_{pz} , C_{py} и C_{px} также может быть выполнен с помощью ПЭВМ (см. разд. 3.7.).

После нахождения этих коэффициентов окончательно записываются обобщенные формулы (1) с указанием числовых значений коэффициентов и показателей степеней.

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 γ . При этом элементы режима резания (t , S и v) в этой серии опытов сохраняются постоянными. План эксперимента представлен в протоколе отчета (приложение, с. 29). 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 ее 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 γ . Толщина среза рассчитывается по формуле

$$a = S \cdot \sin \varphi,$$

где φ — главный угол резца в плане.

При расчете 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: твердосплавных резцов с $\gamma = 10^\circ$, быстрорежущих резцов с $\gamma = 25^\circ$, если σ_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 γ , к величинам, полученным при работе с приведенными выше "эталонными" значениями угла γ :

$$K_{\gamma pz} = P_z(\gamma) / P_{z\gamma\text{эт}}, \quad K_{\gamma py} = P_y(\gamma) / P_{y\gamma\text{эт}},$$

$$K_{\gamma px} = P_x(\gamma) / P_{x\gamma\text{эт}}.$$

Результаты расчетов 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 главной (касательной) составляющей силы резания P_z к площади номинального сечения среза:

$$p = \frac{P_z}{t \cdot S}. \quad (13)$$

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

$$N_p = \frac{P_z \cdot v}{60}. \quad (14)$$

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

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

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

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

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

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 ее затраты, отнесенные к единице объема 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 отчет по лабораторной работе (см. приложение, с. 30).

3.7. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТАБЛИЧНОГО ПРОЦЕССОРА СУПЕРКАЛК ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ОБОБЩЕННЫХ ФОРМУЛ

Как показано выше, для обработки экспериментальных данных при исследовании сил резания целесообразно использовать метод наименьших квадратов. Однако применение этого метода осложняется необходимостью выполнения довольно трудоемких расчетов. Снижение трудоемкости расчетов и автоматизация процесса обработки экспериментальных данных могут быть достигнуты на основе использования ПЭВМ и табличного процессора СУПЕРКАЛК [3].

Ниже приведена электронная таблица (табл. 2), которая состоит из следующих зон (блоков). В первой зоне, охватывающей колонки А—G (с учетом разделительных вертикальных линий), содержатся порядковые номера опытов и условия их проведения: глубина t , подача S , скорость резания v и передний угол резца γ (ГАММА).

В клетках второй зоны (колонки H—J) указываются измеренные значения составляющих силы резания P_z , P_y и P_x . Обе зоны образуют область исходных данных. Эти данные заносятся в таблицу из сводного бланка отчета по лабораторной работе и могут изменяться в зависимости от условий проведения экспериментов и полученных при этом результатов.

Зона, охватывающая колонки от K до R включительно, является рабочей зоной. В клетках этой зоны содержатся формулы, по которым производятся все необходимые промежуточные расчеты. Для удобства пользования электронной таблицей при проведении лабораторных занятий эти колонки скрыты, т. е. не выводятся на экран дисплея.

В зоне 4 (колонки T, U и V) записываются частные зависимости составляющих силы резания от глубины, подачи и скорости резания и приводятся значения показателей степеней и коэффициентов (обозначения последних несколько изменены), полученные в результате расчетов по формулам, свойственным методу

Результаты исследования сил резания при точении

Таблица 2

A	C	D	E	F	H	I	J	T	U	V	X	Y	Z	AE	AG	
2	N	t	s	v	ВМФА	Fz	Fy	Fx	Зависим. Fz	Зависим. Fy	Зависим. Fx	Объем. коэффициенты	К	Мощность		
3	оп.	мм	мм/об	мин	град.	Н	Н	Н	от t, s, v	от t, s, v	от t, s, v	СFz	СFy	СFx	Мощ. в кВт	
4																
5																
6	14	1.5	.2	60	104	750	400	525	Fz=C1z*t^a*s^b*v^c	Fy=Cy*t^a*s^b*v^c	Fx=C1x*t^a*s^b*v^c	3311.5	2146.4	2915.7	2500	7500
7	24	2.5	.2	60	104	1180	605	950	C1z	C1y	C1x	3239.9	2105	3198.1	2360	11800
8	34	3.5	.2	60	104	1670	850	1200	513.6	282.6	362.4	3333.2	2221.8	2903.8	2385.7	16700
9	44	4.5	.2	60	104	2050	1000	1580	вРz	вРy	вРx	3758.4	2111.1	2989.9	2277.8	20500
10									.93	.85	.90					
11																
12																
13	58	2.5	.11	60	104	778	430	730	Fz=C2z*t^a*s^b*v^c	Fy=C2y*t^a*s^b*v^c	Fx=C2x*t^a*s^b*v^c	3344.7	1981.5	2975.6	2829.1	7780
14	64	2.5	.15	60	104	980	521	810	C2z	C2y	C2x	3338.7	2075.2	2989.7	2613.3	9800
15	74	2.5	.2	60	104	1180	605	950	4004.2	1259.5	1507.4	3239.9	2105	3198.1	2360	11800
16	84	2.5	.35	60	104	1850	750	1030	вРz	вРy	вРx	3338.4	2066	2955.2	2114.3	18500
17									.75	.47	.32					
18																
19																
20	94	2.5	.2	45	104	1270	674	1000	Fz=C3z*t^a*s^b*v^c	Fy=C3y*t^a*s^b*v^c	Fx=C3x*t^a*s^b*v^c	3330.1	2145	3009.1		
21	104	2.5	.2	60	104	1215	620	901	C3z	C3y	C3x	3336	2157.2	3033.1		
22	114	2.5	.2	80	104	1160	565	800	2301.4	2163.2	4473.7	3335	2149.2	3012.9		
23	124	2.5	.2	120	104	1090	500	682	вРz	вРy	вРx	3343.8	2156.7	3008.3		
24									-16	-31	-39					
25																
26																
27									Fz=C2z*t^a*s^b*v^c	Fy=C2y*t^a*s^b*v^c	Fx=C2x*t^a*s^b*v^c	3314				
28									Fy=C2y*t^a*s^b*v^c	Fx=C2x*t^a*s^b*v^c		2114				
29									Fz=C2z*t^a*s^b*v^c	Fy=C2y*t^a*s^b*v^c	Fx=C2x*t^a*s^b*v^c					30164
30																
31									вРz	вРy	вРx					
32	134	2.5	.2	60	-10	1460	1110	1619	1.2	1.6	1.8					
33	144	2.5	.2	60	0	1335	865	1259	1.1	1.4	1.4					
34	154	2.5	.2	60	10	1214	610	900	1	1	1					
35	164	2.5	.2	60	15	1150	525	765	.95	.85	.85					
36	174	2.5	.2	60	20	1090	430	630	.8	.7	.7					

наименьших квадратов. Для составляющей P_z — это формулы (11) и (12). При этом отличительной особенностью электронных таблиц в СУПЕРКАЛКЕ является то, что формулы, записанные в клетках таблицы, если не допущены какие-либо ошибки, не отображаются на экране, а рассчитываются. И вторая особенность состоит в том, что при изменении исходных данных происходит автоматический пересчет всей таблицы.

Зона 5 (колонки X , Y и Z) предназначена для размещения формул и результатов расчетов коэффициентов C_{pz} , C_{py} и C_{px} в обобщенных формулах (1), а сами формулы в виде текста записаны в клетках $T27$, $T28$, и $T29$.

После получения обобщенных формул интересно сопоставить результаты расчетов по этим формулам с экспериментальными данными, содержащимися в колонках H , I , J . Для размещения результатов расчетов в электронной таблице выделена зона 6, охватывающая колонки $AA-AC$. Эти данные также скрыты и на экран дисплея не выводятся, а отображаются только на графиках частных зависимостей, что более наглядно (см. приложение, с. 31—33).

Влияние переднего угла реза γ на составляющие силы резания учитывается, как отмечалось выше, введением в обобщенные формулы поправочных коэффициентов. Эти коэффициенты определяются по данным, полученным при проведении серии опытов с изменяющимися передними углами, и приведены в зоне 7, включающей блок клеток $T32:V36$.

Последней, 8-й зоной электронной таблицы является область, включающая колонки AE и AF . В этой зоне содержатся формулы и результаты расчетов удельной силы p и мощности резания N_p в зависимости от глубины резания t подачи S . Эти данные позволяют проверить, соответствуют ли результаты проведенного исследования закону об удельной силе резания.

Помимо указанных выше преимуществ, достоинством СУПЕРКАЛКА является возможность графического представления табличных данных. Применительно к описанной выше электронной таблице сформировано 6 графиков (см. приложение, с. 31—36). Три графика представляют собой частные зависимости составляющих P_z , P_y и P_x от глубины резания t , подачи S и скорости резания v . Эти графики построены в двойных логарифмических координатах. Четвертый график отражает зависимость

составляющих P_z , P_y и P_x от переднего угла резца. На пятом и шестом графиках показаны зависимости удельной силы и мощности от глубины резания и подачи. Графики могут быть выведены на дисплей или на принтер.

Для удобства пользования электронной таблицей (ЭТ) разработано меню макрокоманд, которое может быть вызвано одновременным нажатием клавиш $\langle Alt \rangle - \langle M \rangle$. Главное меню включает 6 команд:

- 1 — запись на диск,
- 2 — ввод исходных данных (в режиме этой команды можно вводить или корректировать исходные данные: зоны 1 и 2 ЭТ);
- 3 — графическое отображение результатов исследования на экране дисплея;
- 4 — печать графиков на принтере;
- 5 — печать ЭТ;
- 6 — выход в *Norton Commander*.

Кроме главного меню, предусмотрены также два нижних: $\backslash n$ и $\backslash k$. Команды первого позволяют просмотреть графики на экране дисплея. Для этого необходимо переместить курсор в положение, соответствующее нужному графику, и нажать клавишу $\langle Enter \rangle$. Команды второго меню позволяют вывести графики на принтер.

Использование ПЭВМ и табличного процессора СУПЕРКАЛК позволяет существенно упростить и автоматизировать процесс обработки экспериментальных данных и получения формул для расчета 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 отчета.
4. Провести четыре серии экспериментального исследования (серии глубин, подач, скоростей резания и передних углов) и измеренные значения составляющих силы резания занести в бланк отчета.

5. Построить графику 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. Указать частные зависимости на соответствующих графиках.

7. Рассчитать коэффициенты в обобщенных формулах. Привести результаты расчетов и записать обобщенные формулы для составляющих силы резания.

8. Используя данные, полученные в серии передних углов, определить поправочные коэффициенты к обобщенным формулам, а также привести результаты наблюдений за изменением характера стружки и степени ее деформации при изменении переднего угла резца.

9. Для разных значений глубины резания и подачи определить удельную силу p и мощность резания N_p . Сделать вывод о характере их изменения с увеличением глубины резания и подачи.

10. Используя электронную таблицу, с помощью меню макросов ввести исходные данные, получить распечатку ЭТ на принтере и приложить ее к отчету.

11. Просмотреть на экране дисплея графики зависимостей и дать заключение о их характере в отчете. Напечатать и приложить к отчету графики зависимостей составляющих силы резания от переднего угла резца и графики зависимостей удельной силы и мощности резания от подачи.

Оформленный отчет по лабораторной работе предъявляется преподавателю. Бланк отчета приведен в приложении на с. 27—30.

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. В чем 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 чем сущность графического метода обработки результатов эксперимента? Его основные преимущества и недостатки.

7. В чем 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 γ на составляющие силы резания.

10. Как получаются обобщенные формулы для расчета составляющих силы резания в зависимости от элементов режима резания и геометрии инструмента?

11. Что представляет собой удельная сила и мощность резания? Как они изменяются с увеличением глубины резания и подачи?

12. В чем заключается использование табличного процессора СУПЕРКАЛК для обработки результатов эксперимента и получения формул для расчета составляющих силы резания?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Лепилин В. И.* Режимы резания авиационных материалов при точении. Метод. указания /Куйбышев. авиац. ин-т. Куйбышев, 1988. — 44 с.
2. *Турчак Л. И.* Основы численных методов. М.: Наука 1987.— С. 32—34.
3. *Клевцова Т. П., Поручиков А. Н.* Введение в табличный процессор СУПЕРКАЛК: Метод. указания к лабораторной работе /Самар. аэрокосм. ун-т. Самара, 1992. — 15с.

ОТЧЕТ
по лабораторной работе
ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛ РЕЗАНИЯ ПРИ ТОЧЕНИИ
(однофакторный эксперимент)

1 Исходные данные и результаты однофакторного эксперимента.

Обрабатываемый материал:

Диаметр заготовки $D_{\text{заг}} =$

Резец: ; $\varphi =$; $\varphi_1 =$; $\gamma =$; $\alpha = \alpha_1 =$, $\lambda =$; $r_{\text{н}} =$

№ опыта	Серия опытов с изменением	Режим резания			Показания приборов			$P_z, Н$	$P_y, Н$	$P_x, Н$
		$t, мм$	$S, мм/об$	$v, м/мин$	P_z	P_y	P_x			
1 2 3 4	глубины резания									
5 6 7 8	подачи									
9 10 11 12	скорости резания									

2. Графики частных зависимостей составляющих силы резания от глубины t , подачи S и скорости резания V^* .

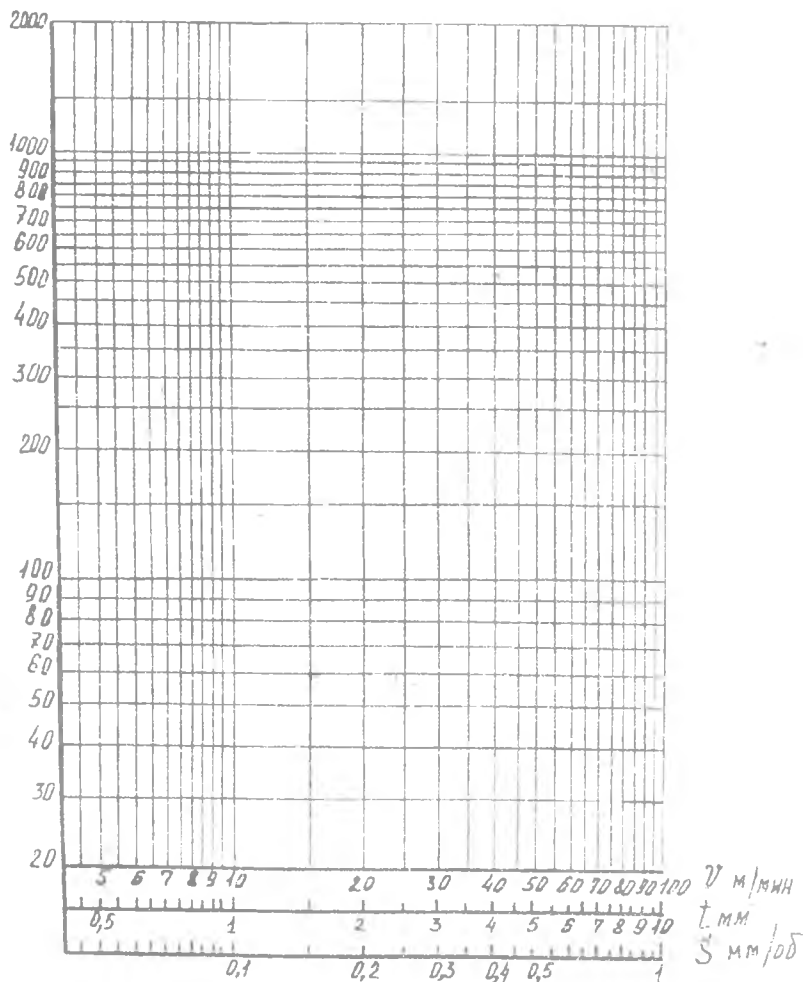


Рис. III. Логарифмическая сетка

Показатели степеней:

Коэффициенты:

3. Частные зависимости и обобщенные формулы для расчета составляющих силы резания:

*) Если значения составляющей больше 2000 Н, то числовые значения, отмеченные на оси ординат, следует увеличить на порядок.

4. Влияние переднего угла реза на составляющие силы резания, характер и степень деформации стружки. Расчет поправочных коэффициентов к обобщенным формулам.

Обрабатываемый материал:

Резец: ; $\varphi =$; $\varphi_1 =$; $\alpha = \alpha_1 =$; $\lambda =$; $r_B =$;

Элементы режима резания; $t =$; $S =$; $v =$

№ опы- та	Перед- ний угол γ	Показания приборов			P_z, H	P_y, H	P_x, H	$\alpha_1,$ мм	K_d
		P_z	P_y	P_x	$K_{\gamma Pz}$	$K_{\gamma Py}$	$K_{\gamma Px}$		
1									
2									
3									
4									
5									
6									

Характер стружки:

5. Расчет удельной силы и мощности резания. Заключение о соответствии результатов эксперимента закону об удельной силе резания.

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

Выполнил студент
Группа

Проверил

P_x \square
 P_y \triangle
 P_z \circ

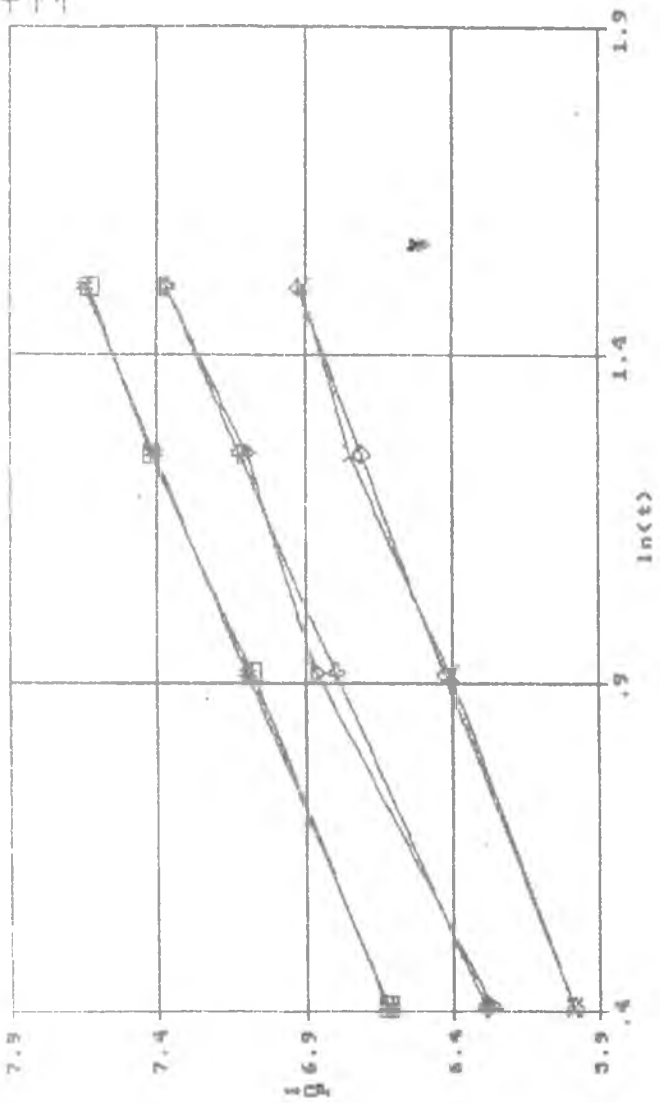


Рис. 112. Зависимость составляющих силы резания P_x , P_y и P_z от глубины резания t .

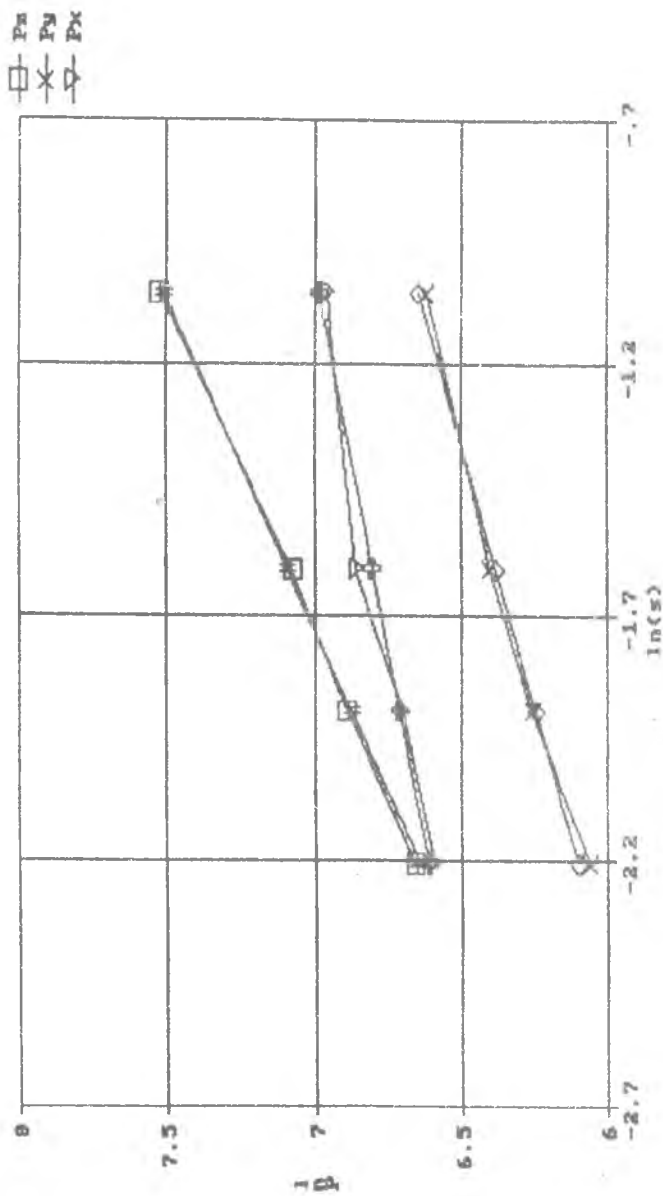


Рис. ПЗ. Зависимость составляющих силы резания P_z , P_y и P_x от подачи S .

P_z P_y P_x
 \square \ast \diamond

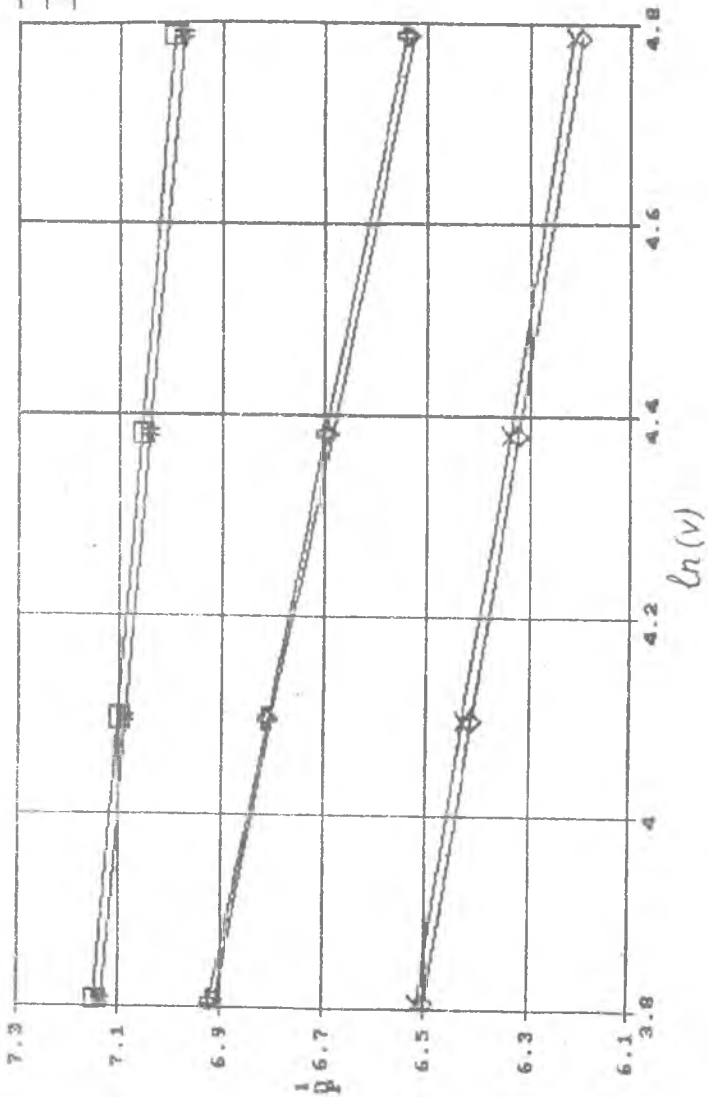


Рис. 14. Зависимость составляющих силы резания P_z , P_y и P_x от скорости резания v

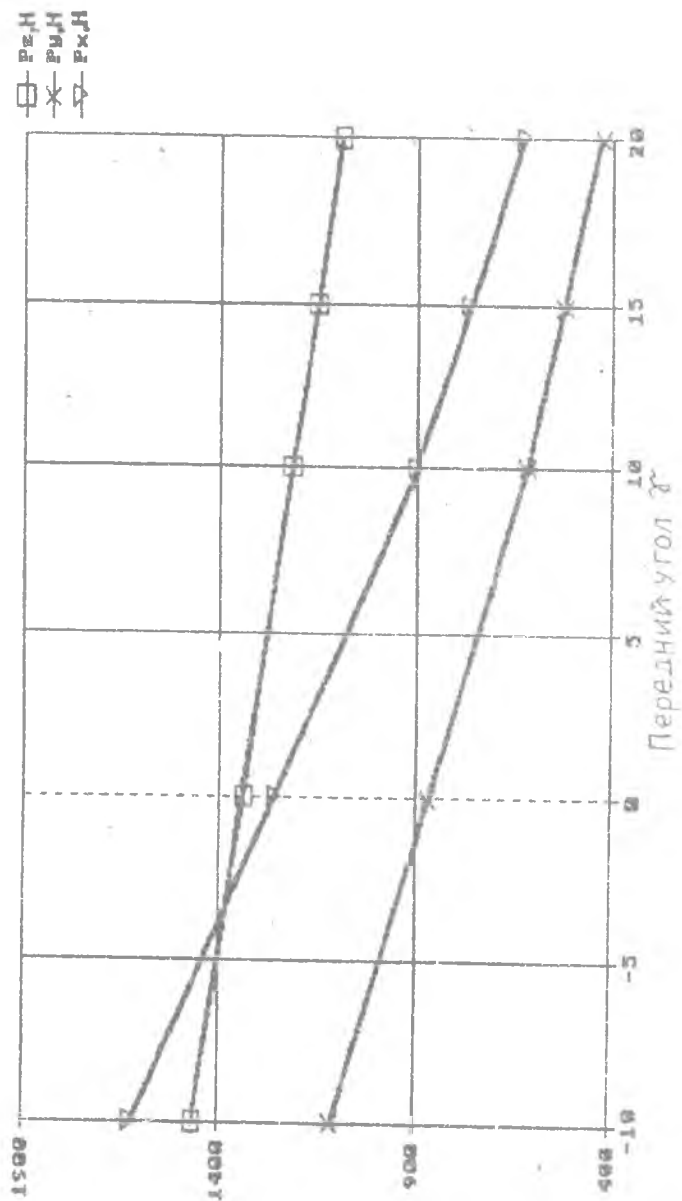


Рис. 115. Зависимость составляющих сил резания P_1 , P_2 и P_3 от переднего угла α .

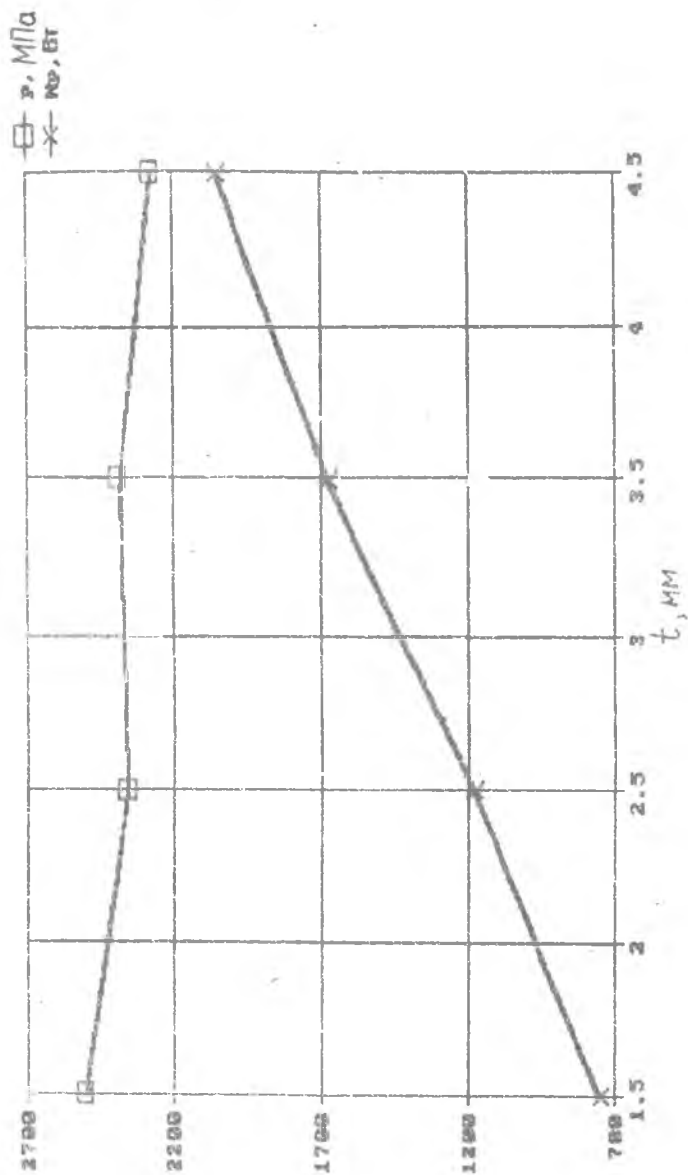


Рис. 16. Зависимость мощности N_p и удельной силы резания "р" от глубины резания t

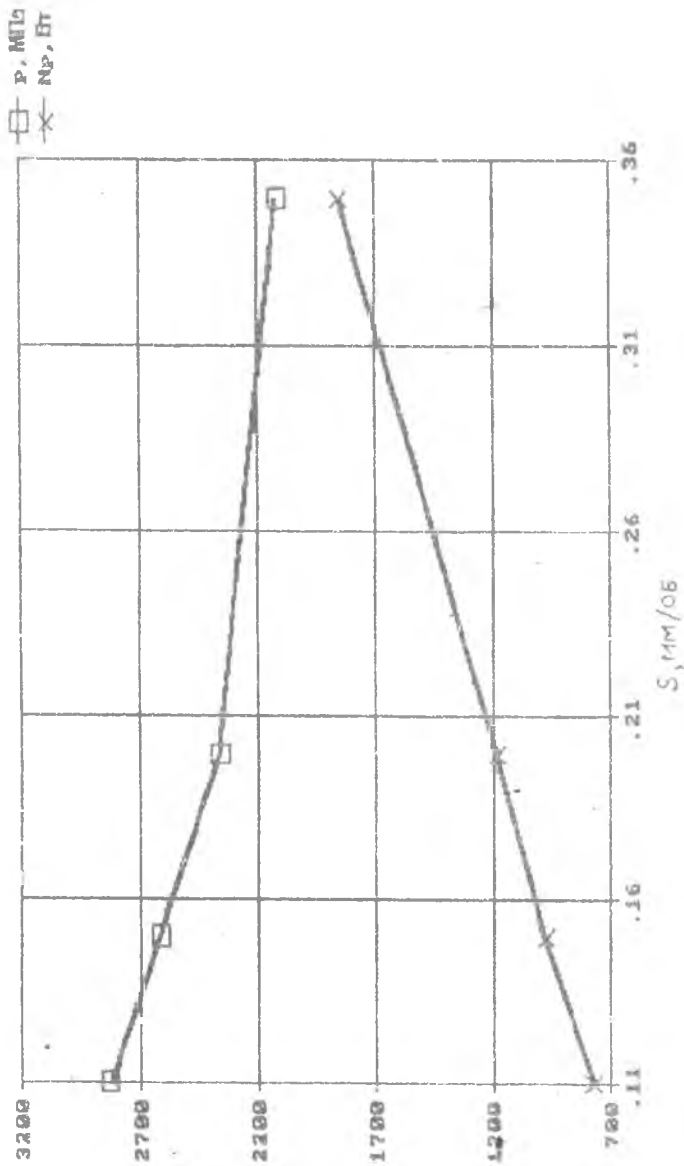


Рис. 117. Зависимость мощности N_p и удельной силы резания "р" от подачи S

**ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛ РЕЗАНИЯ
ПРИ ТОЧЕНИИ
(однофакторный эксперимент)**

Составители: *Бурмистров Евгений Васильевич,
Самыкин Виктор Николаевич*

Редактор **Т. К. К р е т и н и н а**
Техн. редактор **Н. М. К а л е н ю к**
Корректор **Т. И. Щ е л о к о в а**
Компьютерная верстка **Т. Ю. Д ы м у р а**

Подписано в печать 30.05.96. Формат 60X84 1/16. Бумага офсетная.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 2,09. Усл. кр.-отт. 2,21. Уч.-изд.л. 2,23.
Тираж 300 экз. Заказ 67. Арт. С— 37/96.
Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С. П. Королева
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

ИПО Самарского государственного аэрокосмического
университета

443001 Самара, ул. Ульяновская, 18