

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«УЛЬЯНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

В. П. Табаков, Д. И. Сагитов

ПРОЦЕССЫ И ОПЕРАЦИИ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ

Практикум по лабораторным работам
и практическим занятиям

Ульяновск
УлГТУ
2015

УДК 621.9.025 (076)

ББК 34.663 Я7

Т 12

Рецензент: Псигин Ю. В. кандидат технических наук,
доцент кафедры «Технология машиностроения»

*Рекомендовано научно-методической комиссией
машиностроительного факультета в качестве прак-
тикума по лабораторным работам и практическим
занятиям*

Табаков, В. П.

Т 12 Процессы и операции формообразования : практикум по лаборатор-
ным работам и практическим занятиям / В. П. Табаков, Д. И. Саги-
тов. – Ульяновск : УлГТУ, 2015. – 59 с.

Практикум предназначен для студентов высших учебных заведений, обуча-
ющихся по направлению 15.03.05 (151900.62) «Конструкторско-технологическое
обеспечение машиностроительных производств» при изучении дисциплины
«Процессы и операции формообразования» в соответствии с государственным
образовательным стандартом высшего профессионального образования (реги-
страционный № 827, утвержден 24.12.2009 г.). В практикуме представлены ла-
бораторные работы и практические занятия, охватывающие основные разделы
курса «Процессы и операции формообразования».

Работа подготовлена на кафедре «Металлорежущие станки и инструменты».

УДК 621.9.025 (076)

ББК 34.663 я7

© Табаков В. П., Сагитов Д. И., 2015

© Оформление. УлГТУ, 2015

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ	5
ОБРАБОТКА ОПЫТНЫХ ДАННЫХ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ	6
ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ	12
Лабораторная работа № 1. Геометрия рабочей части резцов.....	12
Лабораторная работа №2. Исследование влияния элементов режима резания на силы при точении.....	22
Лабораторная работа №3. Исследование влияния элементов режима резания на температуру при точении.....	28
Лабораторная работа №4. Исследование влияния элементов режима резания на коэффициент укорочения стружки	36
ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ	40
Практическое занятие № 1. Расчет элементов режима резания при токарной обработке	40
Практическое занятие № 2. Исследование шероховатости поверхности при токарной обработке.....	45
Практическое занятие № 3. Исследование силовых зависимостей при токарной обработке с продольной подачей	47
Практическое занятие № 4. Исследование теплообмена при обработке резанием.....	49
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	51
ПРИЛОЖЕНИЯ	52

ВВЕДЕНИЕ

Обработка резанием является наиболее распространенной операцией при изготовлении деталей из различных материалов и основным на сегодняшний день видом обработки металлов путем снятия стружки.

Знания, полученные при изучении курса «Процессы и операции формообразования» необходимы при конструировании металлорежущих станков, инструментов и приспособлений, а также при проектировании более совершенных технологических процессов обработки деталей.

Главной целью выполнения лабораторных работ и практических занятий является усвоение и закрепление теоретических знаний студентов, полученных на лекциях.

Лабораторные работы выполняются следующим образом. Вначале студенты изучают общие сведения по теме лабораторной работы и уясняют цель работы, а затем тщательно изучают методику ее выполнения. После обсуждения с преподавателем содержания лабораторной работы и правил по технике безопасности студенты выполняют экспериментальную часть работы в присутствии преподавателя.

Закончив экспериментальную часть работы, студенты обрабатывают результаты и составляют отчет по форме протоколов, приведенных в приложении. В заключение студенты должны защитить выполненную лабораторную работу, ответив преподавателю на вопросы и показав усвоение изученного материала.

Практические занятия проводятся с использованием персональных компьютеров со специальным программным обеспечением. После уяснения цели практического занятия студенты получают задание, которое выполняют на персональных компьютерах.

После выполнения всех заданий, оформляется протокол по форме, приведенной в приложении. Делаются выводы и производится защита работы путем ответа преподавателю на вопросы.

Методические указания составлены с использованием литературных источников [1-10].

1. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

С целью исключения травматизма, а также поломки оборудования и приборов, каждый студент должен ознакомиться с правилами техники безопасности при выполнении лабораторной работы.

При выполнении лабораторной работы запрещается:

- приступать к выполнению лабораторной работы без предварительного ознакомления с правилами техники безопасности;
- включать и выключать станок без разрешения учебного мастера;
- находиться в зоне отброса стружки и вращающейся детали;
- отводить или сметать стружку без применения специальных крючков и щеток;
- касаться движущихся и вращающихся частей станка, заготовки и инструмента;
- облокачиваться на станок и передавать чего-либо над станком или вращающейся деталью.

Обязанности студента:

- выполнять только ту работу, которая поручена ему преподавателем или учебным мастером;
- не мешать работе других студентов;
- быть внимательным и аккуратным во время выполнения работы;
- не отвлекаться самому и не отвлекать других посторонними разговорами;
- сдавать свое рабочее место чистым и в полном порядке;
- знать места расположения средств огнетушения и правила пользования ими.

2. ОБРАБОТКА ОПЫТНЫХ ДАННЫХ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Конечной целью любого эксперимента является установление функциональной связи между независимой и зависимыми переменными и описание этой связи математической формулой. Для получения формулы, описывающей связь между переменными величинами, результаты экспериментов подвергают обработке.

Обработка опытных данных может производиться различными способами. Рассмотрим некоторые из них, которые могут быть использованы при выполнении лабораторных работ. В качестве примера рассмотрим нахождение связи между силой резания P_z и элементами режима резания – глубиной t , подачей S и скоростью v .

Формула, связывающая эти параметры, имеет вид

$$P_z = C_{pz} \cdot t^{x_{pz}} \cdot S^{y_{pz}} \cdot V^{n_{pz}}. \quad (1)$$

В результате проведения серии опытов необходимо установить величину коэффициента C_{pz} и показателей степени x_{pz} , y_{pz} , n_{pz} .

Для определения такого вида зависимости, как правило, используется однофакторный эксперимент, когда варьируется тот фактор процесса резания, влияние которого изучается, а все остальные факторы во время опыта остаются постоянными. Так, например, если устанавливается влияние глубины резания на силу P_z , то изменяется только его глубина, а все остальные факторы процесса резания остаются постоянными: обрабатываемый и инструментальный материал, геометрия инструмента, подача и скорость резания, применяемая СОЖ. После проведения серии опытов по влиянию какого-либо параметра процесса резания (t , S , v) на силу резания, необходимо провести обработку результатов экспериментов и выразить взаимосвязь силы P_z от элементов режима резания математической зависимостью. При выборе аппроксимирующей функции необходимо руководствоваться следующими соображениями: выбранная формула должна с возможно большей точностью описывать устанавливаемую функциональную связь, быть простой и обеспечивать быстроту обработки опытных данных.

Как показывает опыт проведения исследований, монотонно возрастающие или убывающие зависимости хорошо изображаются кривыми параболического и гиперболического типа. Данные кривые наиболее удобно аппроксимировать степенной функцией вида $y = C \cdot x^k$, которая, будучи изображенной в декартовой системе координат с функциональными логарифмическими шкалами, представляет собой прямую линию. Так как пря-

мая линия является логарифмической анаморфозой параболы и гиперболы, то это облегчает определение неизвестных коэффициента C и показателя k . Прологарифмировав степенную функцию, получим уравнение прямой линии

$$\lg y = \lg C + k \lg x. \quad (2)$$

Частные зависимости силы P_z от элементов режима резания представляются в виде:

$$P_z = C'_{pz} \cdot t^{x_{pz}}, \quad (3)$$

$$P_z = C''_{pz} \cdot S^{y_{pz}}, \quad (4)$$

$$P_z = C'''_{pz} \cdot V^{n_{pz}}. \quad (5)$$

Прологарифмировав данные выражения, получим:

$$\lg P_z = \lg C'_{pz} + x_{pz} \cdot \lg t, \quad (6)$$

$$\lg P_z = \lg C''_{pz} + y_{pz} \cdot \lg S, \quad (7)$$

$$\lg P_z = \lg C'''_{pz} + n_{pz} \cdot \lg v. \quad (8)$$

Таким образом, полученные формулы, как и зависимость (2), представляют собой уравнения прямой линии, в которых угловой коэффициент, равный показателям степени x_{pz} , y_{pz} , n_{pz} , определяется как тангенс угла наклона прямой к соответствующей оси абсцисс.

Нахождение показателей x_{pz} , y_{pz} , n_{pz} и постоянных C'_{pz} , C''_{pz} и C'''_{pz} можно производить графо-аналитическим или аналитическим методами.

При графо-аналитическом методе в двойной логарифмической системе координат строятся зависимости $P_z = f(t)$, $P_z = f(S)$, $P_z = f(V)$ (рис. 1). Для построения графиков пользуются специальной логарифмической сеткой или размечают в одинаковом масштабе по оси абсцисс и ординат с помощью основной квадратной или кубической шкал логарифмической линейки. Через опытные точки проводят прямую линию так, чтобы возможно большее число точек равномерно группировалось вокруг прямой. Тогда показатели степени при глубине, подаче и скорости резания определяются как тангенс угла наклона прямых линий к соответствующей оси координат:

$$x_{pz} = \operatorname{tg} \alpha_1; \quad y_{pz} = \operatorname{tg} \alpha_2; \quad n_{pz} = \operatorname{tg} \alpha_3.$$

Постоянный коэффициент C_{pz} – в уравнении (1) определяется как среднеарифметическая величина трех-четырех значений при известных значениях P_z , t , S , v (из опытных данных) и полученных показателях степени x_{pz} , y_{pz} и n_{pz} .

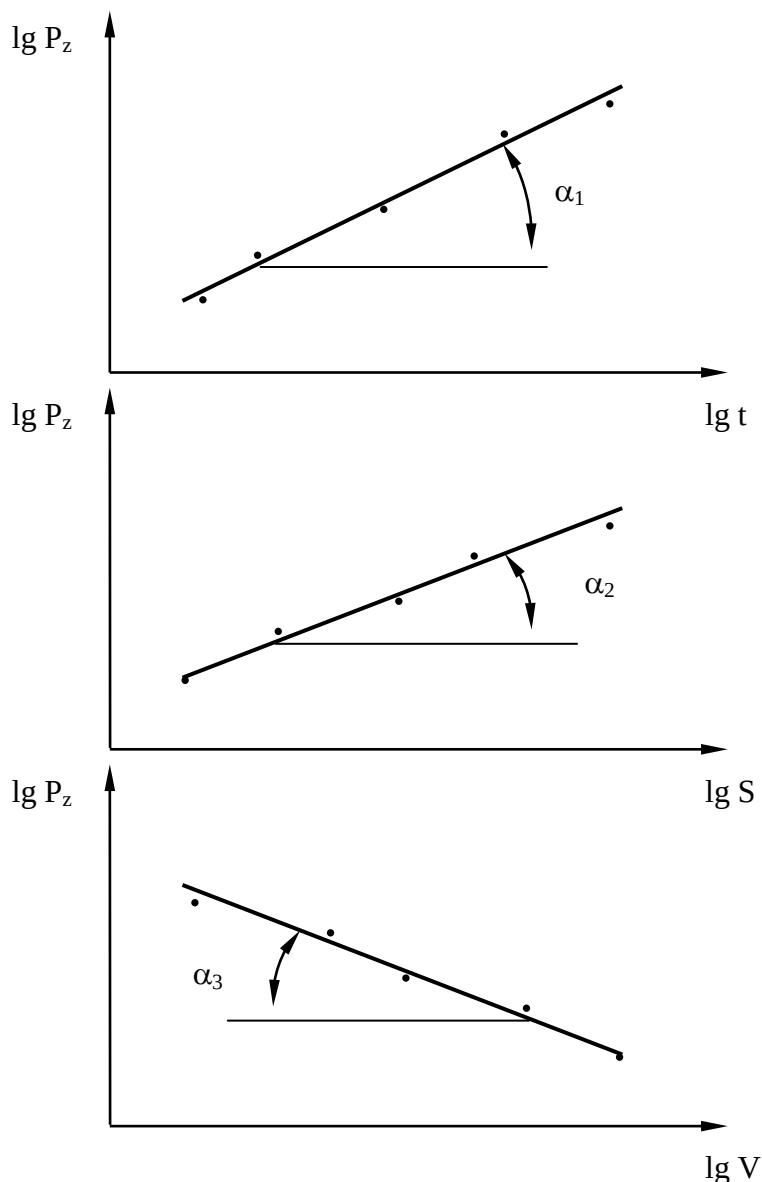


Рис. 1. Графическая обработка опытных данных

Графо-аналитическая обработка опытных данных дает хорошие по точности результаты только в том случае, когда экспериментальные точки лежат на одной прямой или достаточно плотно группируются вдоль нее. При большом рассеивании точек из-за погрешностей измерения положение прямой линии между точками становится неопределенным. В этом случае для определения показателей степени и постоянных в уравнениях

(3) – (5) применяется аналитический метод – метод наименьших квадратов. В основе метода лежит следующее положение: наилучшее приближение аппроксимирующей функции $y = f(x)$ к экспериментальным данным будет в том случае, когда сумма квадратов отклонений расчетных значений $f(x_1), f(x_2), \dots, f(x_n)$ от экспериментальных $y_1, y_2, \dots, y_n$ является минимальной, т.е.

$$\sum_{i=1}^n [y_i - f(x_i)]^2 = \min. \quad (9)$$

Для нашего случая, например, при изучении влияния глубины на силу P_z имеем

$$\sum_{i=1}^n [\lg P_{zi} - (\lg C'_{pz} + x_{pz} \cdot \lg t_i)]^2 = \min. \quad (10)$$

Показатель степени x_{pz} и постоянный коэффициент C'_{pz} можно определить по следующим формулам:

$$x_{pz} = \frac{n \sum_{i=1}^n \lg P_{zi} \cdot \lg t_i - \sum_{i=1}^n \lg t_i \cdot \sum_{i=1}^n \lg P_{zi}}{n \sum_{i=1}^n \lg^2 t_i - (\sum_{i=1}^n \lg t_i)^2}, \quad (11)$$

$$\lg C'_{pz} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{zi} \cdot \sum_{i=1}^n \lg^2 t_i - \sum_{i=1}^n \lg t_i \cdot \sum_{i=1}^n \lg P_{zi} \cdot \lg t_i}{n \sum_{i=1}^n \lg^2 t_i - (\sum_{i=1}^n \lg t_i)^2}. \quad (12)$$

Аналогично определяются показатели y_{pz} , n_{pz} и постоянные коэффициенты C''_{pz} и C'''_{pz} .

Коэффициент C_{pz} (см. уравнение (1)) определяется аналогично описанному выше способу и для графо-аналитического метода.

После получения частных зависимостей (3) – (5) необходимо проверить степень адекватности (соответствия) принятой математической модели описываемому процессу. Проверку адекватности модели производят по специальной методике.

Для установления функциональной связи между переменными величинами можно использовать метод полного факторного эксперимента, при

котором все уровни одного фактора комбинируются со всеми уровнями остальных факторов. Под уровнями варьирования какого-либо фактора понимаются его значения, которые принимают при постановке опытов. Обычно уровни варьирования находятся в граничных точках интервала варьирования, т.е. принимают максимальное или верхнее (+1) и минимальное или нижнее (–1) значения.

Рассмотрим применение метода полного факторного эксперимента типа 2^3 для определения зависимости (1). Преобразуем зависимость (1), прологарифмировав обе части:

$$\ln P_z = \ln C_{pz} + x_{pz} \cdot \ln t + y_{pz} \ln S + n_{pz} \ln v. \quad (13)$$

Данное уравнение можно записать в виде

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3. \quad (14)$$

Из этого уравнения нам необходимо определить коэффициенты b_0 , b_1 , b_2 , b_3 .

Порядок проведения эксперимента определяется матрицей планирования.

При составлении матрицы планирования натуральные значения факторов переводятся в кодированные. Для перевода применяют следующие формулы:

$$x_1 = \frac{2(\ln t - \ln t_{mzx})}{(\ln t_{mzx} - \ln t_{min})} + 1, \quad (15)$$

$$x_2 = \frac{2(\ln S - \ln S_{mzx})}{(\ln S_{mzx} - \ln S_{min})} + 1, \quad (16)$$

$$x_3 = \frac{2(\ln v - \ln v_{mzx})}{(\ln v_{mzx} - \ln v_{min})} + 1. \quad (17)$$

Из формул следует, что верхний уровень варьирования будет обозначен (+1), а нижний (–1).

Матрица планирования для полного факторного эксперимента типа 2^3 имеет вид, представленный в таблице 1.

Таблица 1

План полного факторного эксперимента 2^3

№ опыта	Независимые переменные				Y
	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃	
1	+1	-1	-1	-1	Y1
2	+1	+1	-1	-1	Y2
3	+1	-1	+1	-1	Y3
4	+1	+1	+1	-1	Y4
5	+1	-1	-1	+1	Y5
6	+1	+1	-1	+1	Y6
7	+1	-1	+1	+1	Y7
8	+1	+1	+1	+1	Y8

Вычисление коэффициентов регрессии b_0, b_1, b_2, b_3 производится по формуле:

$$b_i = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i}{n} \quad (18)$$

После определения коэффициентов регрессии производится статистический анализ математической модели [1].

Для получения окончательной формулы, выражающей связь между силой P_z и элементами режима резания, необходимо провести обратный перевод кодированных переменных в натуральные согласно формулам (15) – (17).

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1. ГЕОМЕТРИЯ РАБОЧЕЙ ЧАСТИ РЕЗЦОВ

Цель работы

Целью работы является изучение геометрических параметров и конструкций токарных резцов.

Общие сведения о геометрии токарных резцов

Для осуществления процесса резания режущий инструмент должен иметь определенную геометрию, которая представляет собой совокупность углов резца, формы режущих кромок и поверхностей режущего клина.

Геометрические параметры режущей части инструмента оказывают влияние на процесс стружкообразования, силы резания, качество обработанной поверхности и стойкость инструмента. Правильный выбор геометрии режущей части и конструкции инструмента является одним из путей повышения работоспособности режущих инструментов и качества обработанной поверхности.

Соответственно различают инструментальные, статические и кинематические углы.

Углы рассматриваются в трех системах координат:

- инструментальной (ИСК);
- статической (ССК);
- кинематической (КСК).

Инструментальная система – прямоугольная система координат с началом в вершине режущего инструмента и ориентированная относительно поверхностей инструмента принятых за базу. Применяется для изготовления, заточки и контроля инструмента.

Статическая система – прямоугольная система координат с началом в рассматриваемой точке режущей кромки и ориентированная относительно направления вектора скорости главного движения V (рис. 2). Применяется для приближенных расчетов углов инструмента и для учета их изменения при установке инструмента на станок.

Кинематическая система – прямоугольная система координат с началом в рассматриваемой точке режущей кромки и ориентированная относительно направления вектора скорости результирующего движения V_E (рис. 2).

Для определения углов рассматривают следующие плоскости:

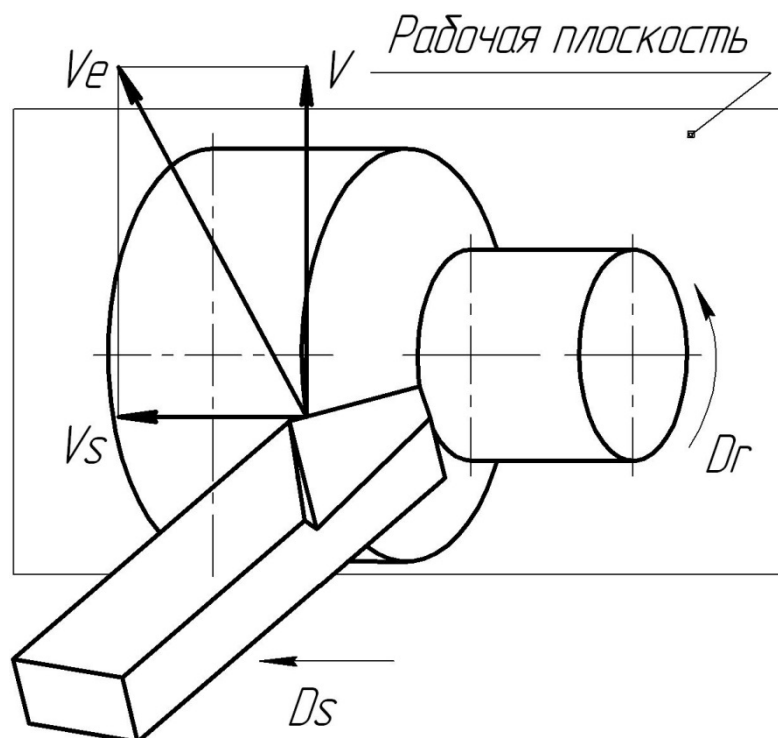


Рис. 2. Элементы движений в процессе резания при точении

1. Основная плоскость P_V – плоскость, проведенная через рассматриваемую точку режущей кромки перпендикулярно к направлению вектора скорости главного движения V (в ССК) или результирующего движения резания V_E (в КСК). В инструментальной системе координат за направление вектора скорости резания принимается перпендикуляр к конструкторской установочной базе резца (плоскость I , рис. 3). Основную плоскость в инструментальной системе координат будем обозначать P_{Vi} , в статической – P_{VC} , в кинематической – P_{VK} .
2. Плоскость резания P_n – плоскость, касательная к режущей кромке в рассматриваемой точке и перпендикулярная основной плоскости (соответственно – P_{ni} , P_{nc} , P_{nk}).
3. Главная секущая плоскость P_τ – плоскость, перпендикулярная линии пересечения основной плоскости и плоскости резания (перпендикулярная проекции главной режущей кромки на основную плоскость) (соответственно – $P_{\tau i}$, $P_{\tau c}$, $P_{\tau k}$).
4. Вспомогательная секущая плоскость $P_{\tau 1}$ – плоскость, перпендикулярная проекции вспомогательной режущей кромки на основную плоскость (соответственно – $P_{\tau 1 i}$, $P_{\tau 1 c}$, $P_{\tau 1 k}$).
5. Рабочая плоскость P_s – плоскость, в которой расположены векторы скоростей главного движения и движения подачи. В ИСК эта плоскость

Углы резца разделяются на главные (измеряются в главной секущей плоскости), вспомогательные углы (измеряются во вспомогательной секущей плоскости) и углы в плане (измеряются в основной плоскости).

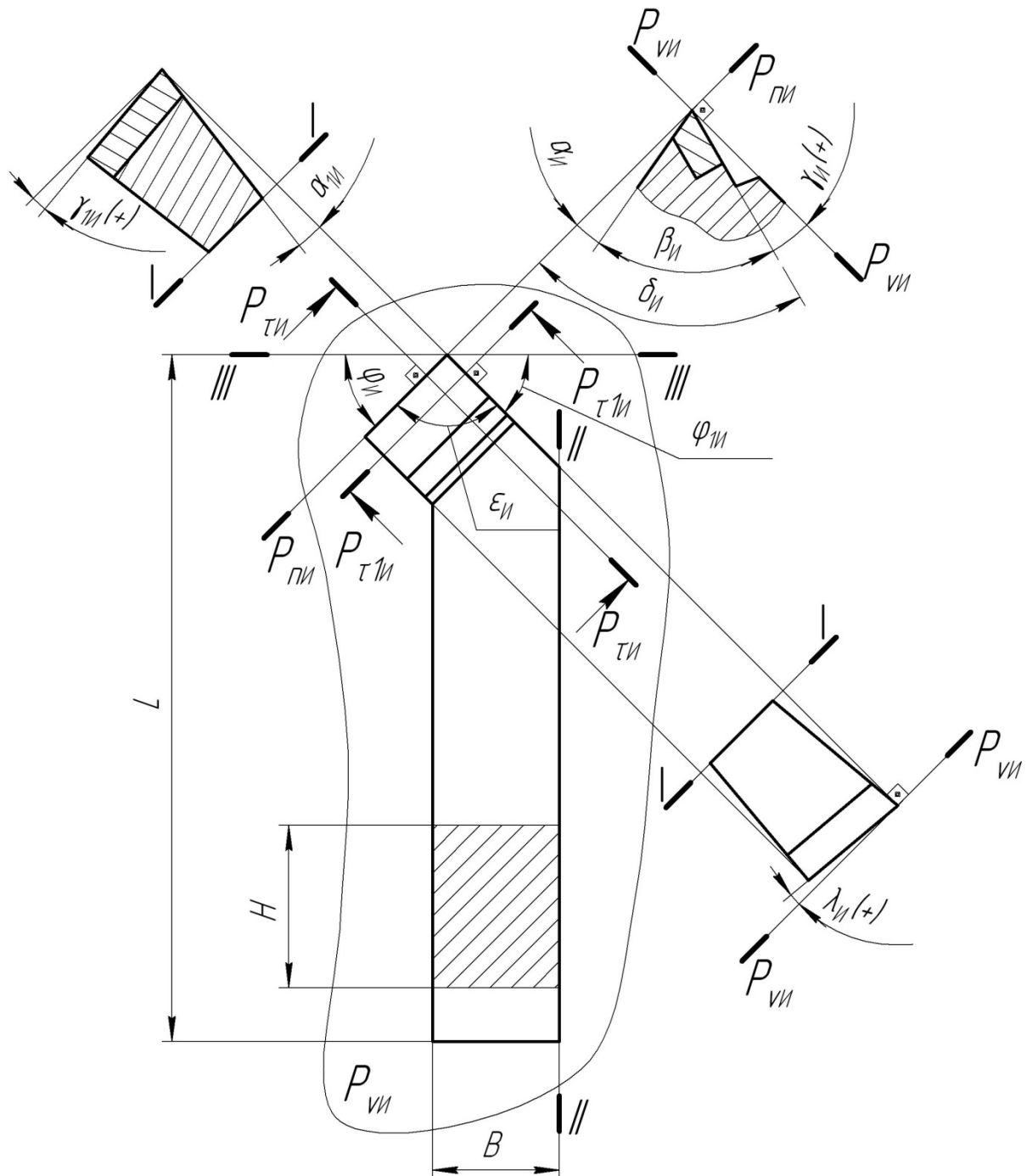


Рис. 3. Углы проходного резца в инструментальной системе координат

К главным углам относятся:

γ – передний угол;

α – главный задний угол;

δ – угол резания;

β – угол заострения.

К вспомогательным углам относятся:

γ_1 – вспомогательный передний угол;

α_1 – вспомогательный задний угол.

К углам в плане относятся:

φ – главный угол в плане;

φ_1 – вспомогательный угол в плане;

ε – угол при вершине.

Кроме того, рассматривают угол наклона главной режущей кромки λ , который измеряется в плоскости резания.

В различных системах координат определение углов аналогично углам и плоскостям, которые их образуют и в которых они рассматриваются, присваивается обозначение системы координат, например $\gamma_{ин}$, γ_c , γ_k и т.п.

Передний угол γ – угол между основной плоскостью и передней поверхностью инструмента (может быть положительным, отрицательным или равным нулю).

Главный задний угол α – угол между плоскостью резания и главной задней поверхностью.

Угол резания δ – угол между передней поверхностью и плоскостью резания.

Угол заострения β – угол между передней и главной задней поверхностью.

Главный угол в плане φ – угол между плоскостью резания и рабочей плоскостью.

Вспомогательный угол в плане φ_1 – угол между проекцией вспомогательной режущей кромки на основную плоскость и рабочей плоскостью.

Угол при вершине ε – угол между проекциями главной и вспомогательной режущих кромок на основную плоскость.

Угол наклона главной режущей кромки λ – угол между главной режущей кромкой и основной плоскостью (может быть положительным, отрицательным или равным нулю).

Вспомогательные задний угол α_1 и передний угол γ_1 – определения аналогичны определениям углов α и γ .

На рис. 4-8 показаны углы различных резцов в статической системе координат. Как можно видеть, например на рис. 5 и 6, углы резца определяются не только его конструкцией, но и направлением движений резца.

Содержание работы

Для выполнения лабораторной работы каждому студенту выдается три резца. После ознакомления с конструкцией резцов и принципом работы мерительного инструмента необходимо для данных резцов измерить геометрические параметры и полученные результаты занести в протокол (см. приложение 1). Измерение углов резца производится с помощью настольного и универсального угломеров.

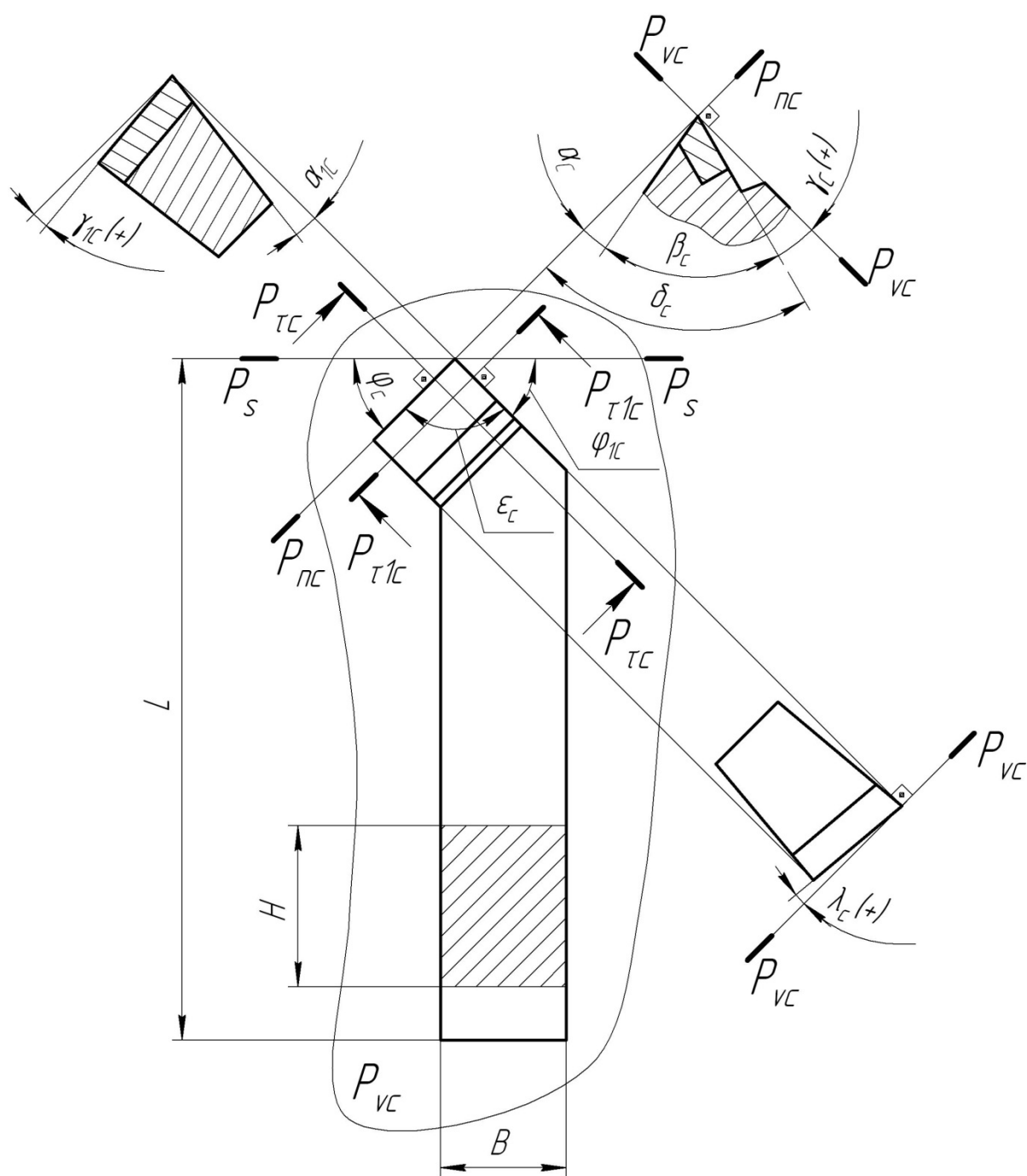


Рис. 4. Углы проходного резца в статической системе координат

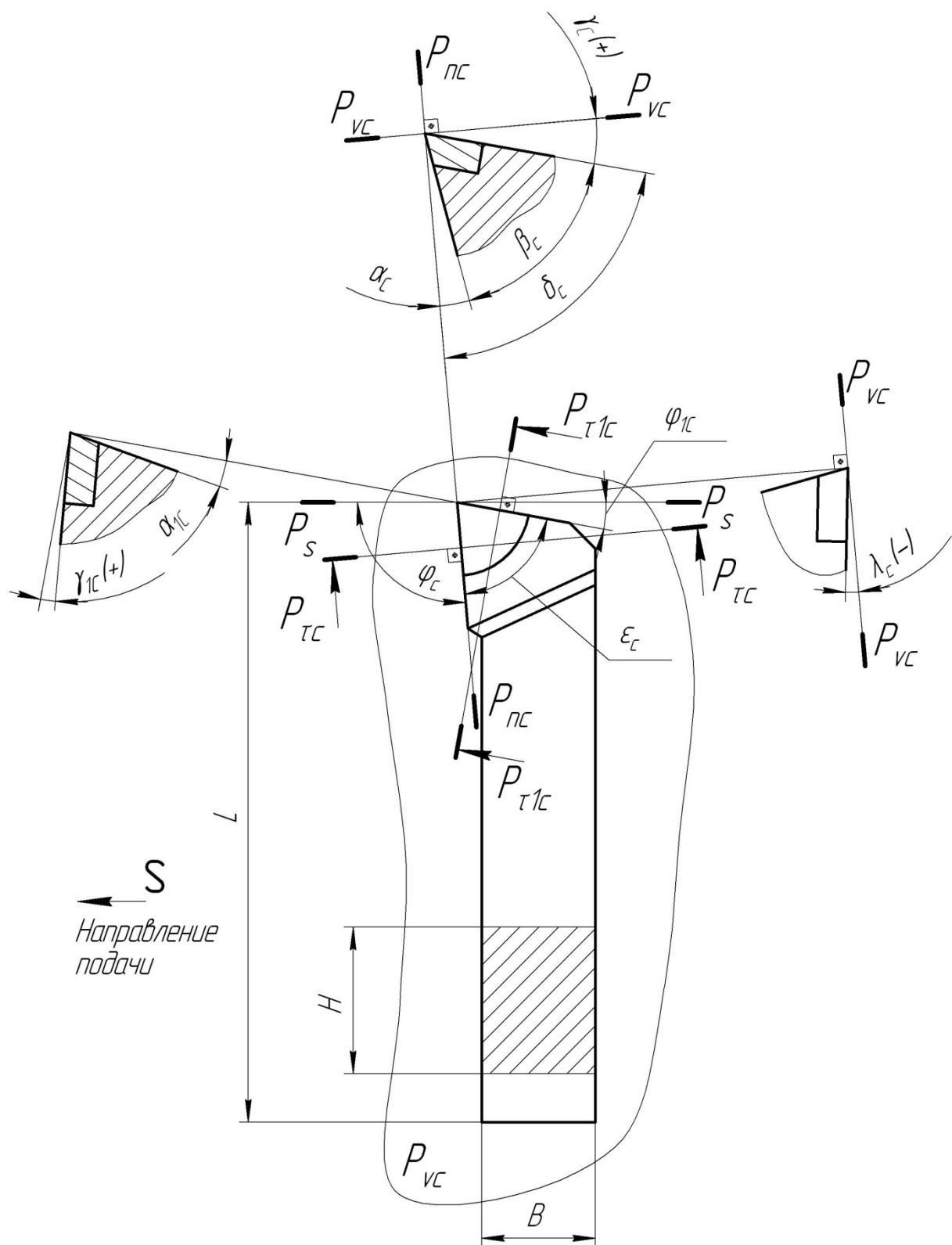


Рис. 5. Углы подрезного реза в статической системе координат (подача параллельна оси заготовки)

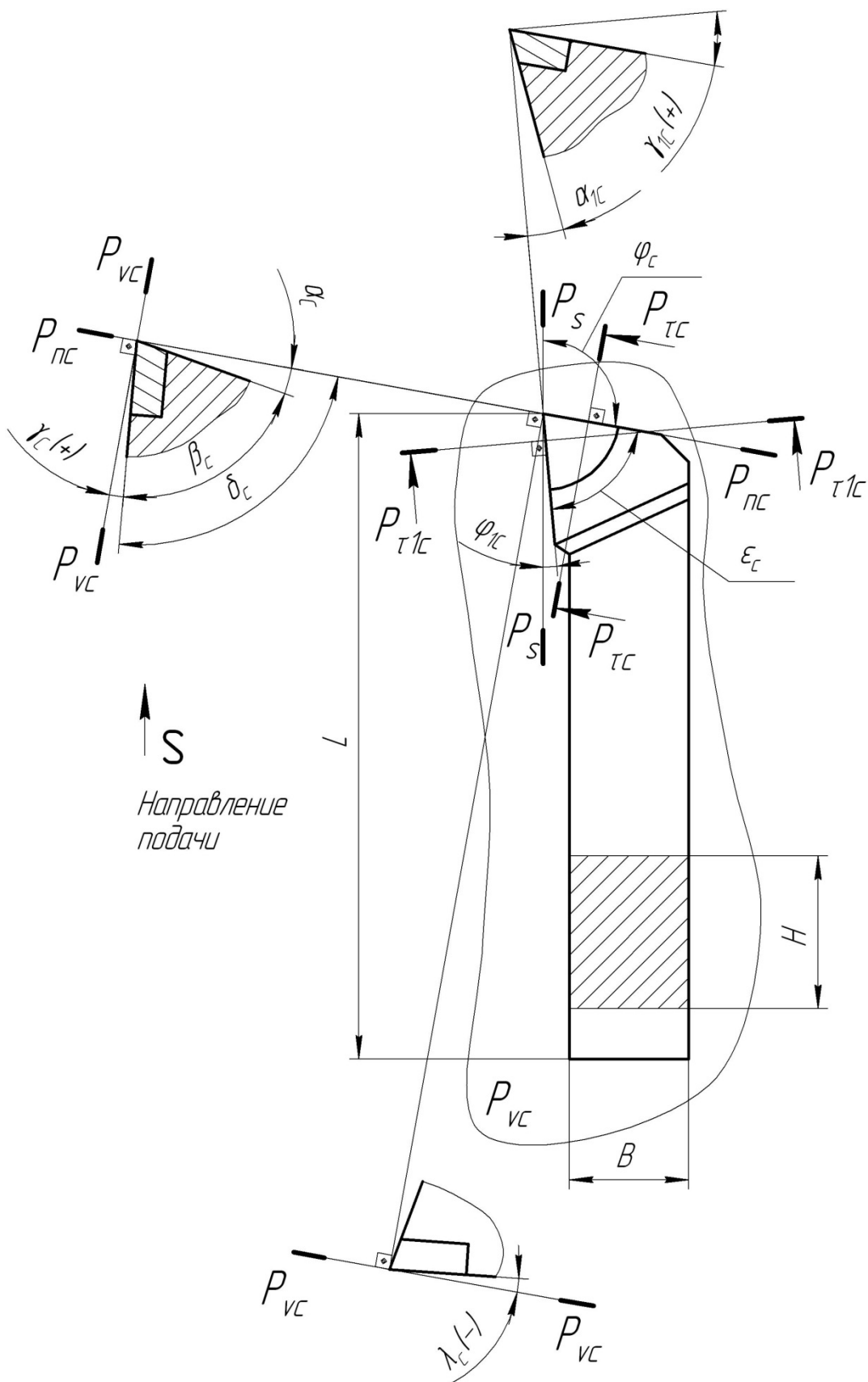


Рис. 6. Углы подрезного резца в статической системе координат
(подача перпендикулярна оси заготовки)

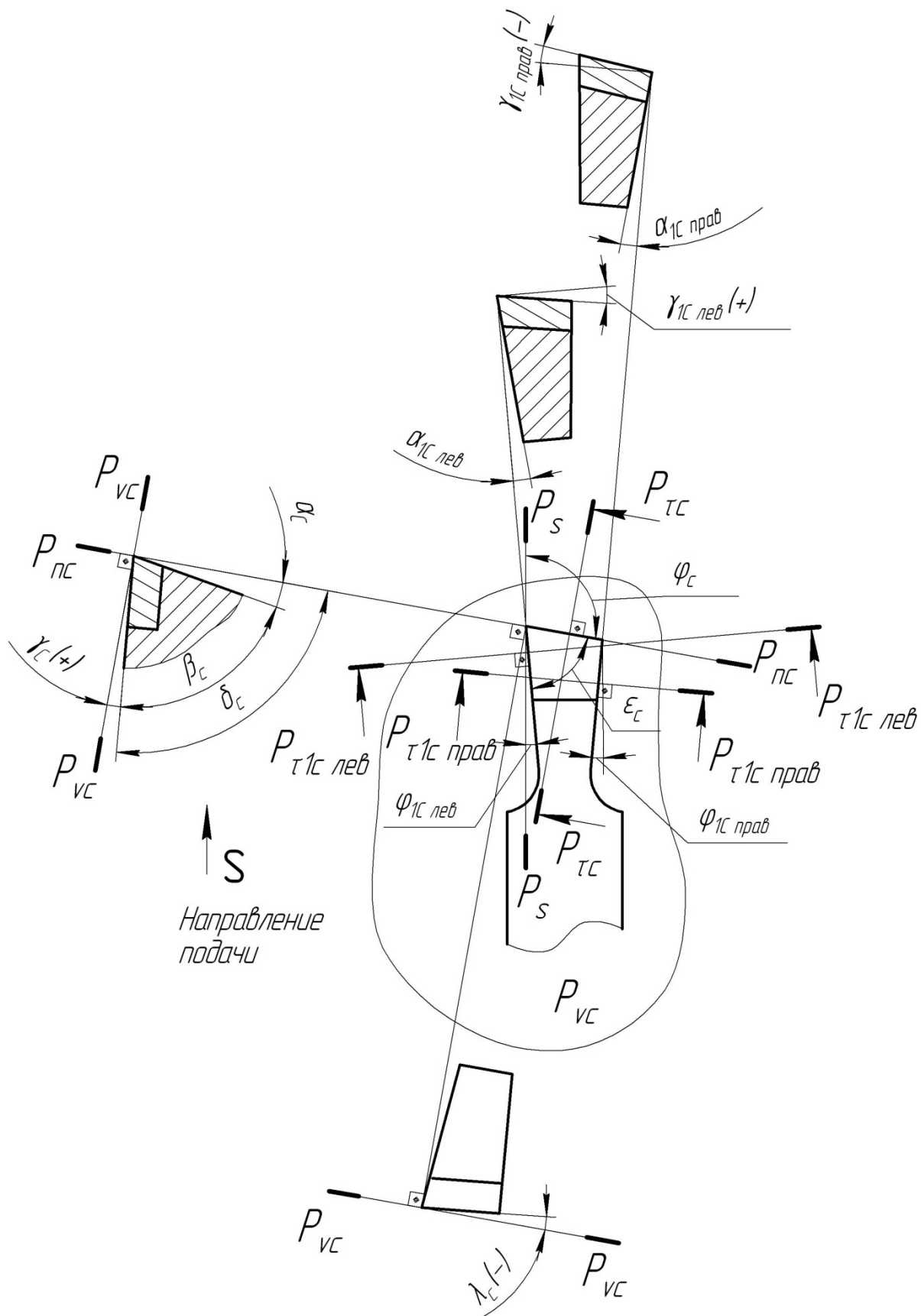
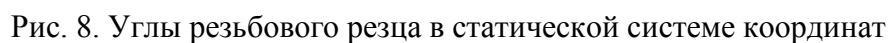


Рис. 7. Углы отрезного резца в статической системе координат



1. Ознакомиться с содержанием и методикой проведения работы.
2. Изучить геометрию и основные конструкции токарных резцов.
3. Измерить геометрические параметры резцов.
4. Зарисовать эскизы резцов с простановкой всех угловых и линейных размеров.

Вопросы для самоконтроля

1. Дайте определение и назначение инструментальной, статической и кинематической систем координат.
2. Дайте определение плоскостей, в которых измеряются главные углы, вспомогательные углы и углы в плане.
3. Дайте определение главных углов токарного резца.
4. Дайте определение вспомогательных углов токарного резца.
5. Дайте определение углов в плане токарного резца.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ РЕЖИМА РЕЗАНИЯ НА СИЛЫ ПРИ ТОЧЕНИИ

Цель работы

Целью работы является экспериментальное определение влияния элементов режима резания на силы резания при токарной обработке.

Общие сведения о силах, действующих на резец

Для того чтобы происходило резание со стороны режущего инструмента, на срезаемый слой должна действовать некоторая сила, которая должна преодолеть сопротивление металла разрушению.

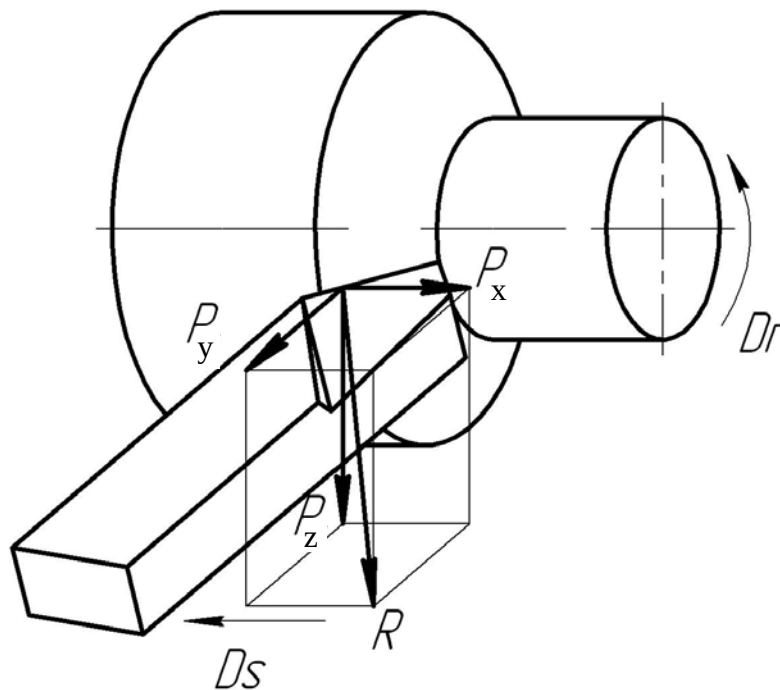


Рис. 9. Схема сил резания при точении

При токарной обработке равнодействующую R всех сил, действующих на резец со стороны обрабатываемого материала, можно разложить на три взаимно перпендикулярные составляющие (рис. 9): P_z – главную составляющую силы резания; P_y – радиальную составляющую, приложенную

перпендикулярно оси заготовки; P_x – осевую составляющую, действующую вдоль оси заготовки.

Силы резания, возникающие в процессе обработки, воспринимаются заготовкой, режущим инструментом и приспособлением. Зная величину и направление составляющих силы резания, можно проводить расчеты механизмов станка, инструментов и приспособлений. Реакция главной составляющей силы резания P_z создает момент сопротивления резанию:

$$M = \frac{P_z \cdot D}{2000},$$

где D – диаметр обрабатываемой поверхности, мм.

Для того, чтобы осуществлялся процесс резания, крутящий момент $M_{СТ}$, развиваемый станком при определенной частоте вращения шпинделя, должен быть больше крутящего момента резания, т.е. $M_{СТ} \geq M$. Эффективная мощность станка рассчитывается только по главной составляющей силы резания P_z . Сила P_z , действуя на резец, изгибает его в вертикальной плоскости, а ее реакция в вертикальной плоскости изгибает заготовку. Сила P_y стремится оттолкнуть резец от заготовки в направлении, перпендикулярном к ее оси, а реакция силы P_y изгибает заготовку в горизонтальной плоскости. По величине силы P_x рассчитывается на прочность механизм подачи станка. Кроме того, сила P_x изгибает резец в горизонтальной плоскости. Таким образом, под действием изгибающих сил P_z и P_x резец испытывает косой изгиб.

Силы P_z , P_y и P_x в общем случае неодинаковы. Величина силы P_z определяется в основном нормальной силой, действующей на передней поверхности резца. Силы P_y и P_x зависят от величины и направления силы трения. Поэтому соотношение между силами P_z , P_y и P_x изменяется при изменении обрабатываемого материала, геометрических параметров резца и элементов режима резания.

При $\varphi = 45^\circ$, $\lambda = 0^\circ$, $\gamma = 15^\circ$ и соотношении $t/S > 10$ можно пользоваться следующим приближенным соотношением:

$$P_z : P_y : P_x = 1 : (0,4 \div 0,5) : (0,25 \div 0,3).$$

Отсюда следует, что главная составляющая P_z по величине мало отличается от равнодействующей силы R резания:

$$R = \sqrt{P_z^2 + P_y^2 + P_x^2} = \sqrt{P_z^2 + [(0,4 \div 0,5)P_z]^2 + [(0,25 \div 0,3)P_z]^2} = (1,1 \div 1,15)P_z.$$

Зависимость силы P_z от процесса резания в общем виде выражается следующей зависимостью:

$$P_z = C_{pz} \cdot t^{x_{pz}} \cdot S^{y_{pz}} \cdot v^{n_{pz}} \cdot k_{pz},$$

где C_{pz} – постоянный коэффициент, зависящий от условий обработки и физико-механических свойств обрабатываемого материала;

x_{pz} , y_{pz} , n_{pz} – показатели степени, учитывающие влияние глубины резания, подачи и скорости резания на силу P_z ;

k_{pz} – общий поправочный коэффициент.

Силы P_y и P_x подсчитываются по аналогичным зависимостям. Основными факторами, влияющими на силу резания, являются физико-механические свойства обрабатываемого материала, геометрия инструмента, элементы режима резания и другие.

Механические свойства обрабатываемого материала весьма сложно и противоречиво влияют на составляющие силы резания. С одной стороны, повышение прочности и твердости обрабатываемого материала увеличивает угол сдвига, что уменьшает коэффициент укорочения стружки и величину относительного сдвига. В результате этого уменьшается работа деформации и стружкообразования и, как следствие, составляющие силы резания. С другой стороны, с повышением прочности и твердости обрабатываемого материала возрастают напряжения на условной плоскости сдвига, что приводит к увеличению работы деформации, стружкообразования и составляющих силы резания. В зависимости от того, что является преобладающим, силы P_z , P_y и P_x при увеличении прочности обрабатываемого материала могут и возрастать, и уменьшаться.

При увеличении глубины резания и подачи возрастает площадь сечения срезаемого слоя, что вызывает рост всех составляющих силы резания. Вследствие неодинакового влияния t и S на составляющие силы резания (большее влияние оказывает глубина резания) величина сил при постоянной площади сечения срезаемого слоя $t \times S$, но при различных отношениях t/S будет неодинакова. Поэтому при точении с прямыми срезаемыми слоями, для того чтобы при заданной площади сечения максимально уменьшить величину сил, необходимо уменьшить глубину резания за счет увеличения подачи, т.е. стремится работать с возможно меньшим отношением t/S . Различная интенсивность влияния глубины резания и подачи на главную составляющую силы резания вызвана их неодинаковым действием на степень пластической деформации срезаемого слоя.

Изменение скорости резания влияет на составляющие силы резания так, как оно влияет на изменение коэффициента укорочения стружки. При резании материалов, не склонных к наростообразованию, с увеличе-

нием скорости резания составляющие силы резания монотонно уменьшаются. При обработке материалов, склонных к наростообразованию, зависимость составляющих сил резания от скорости немонотонна и наличие «перегибов» на кривой $P_z=f(V)$ объясняется наличием и исчезновением нароста на передней поверхности резца.

Из геометрических параметров резца наибольшее влияние на составляющие силы резания оказывают передний угол и главный угол в плане.

Содержание работы

Опыты проводятся на токарно-винторезном станке мод.16K20. Силы резания измеряются динамометром УДМ-600 с комплектом аппаратуры. Схема включения динамометра и измерительной аппаратуры представлена на рис. 10.

Исследование влияния элементов режима резания на силы, возникающие в процессе обработки, заключается в определении влияния подачи, глубины и скорости резания на силы P_z , P_y и P_x . Эксперименты проводятся в следующей последовательности:

1. Определяется зависимость сил P_z , P_y и P_x от глубины резания t . Эксперименты проводятся при переменных значениях глубины резания t_1, t_2, t_3, t_4 и постоянных значениях скорости резания и подачи.
2. Определяется зависимость сил P_z , P_y и P_x от подачи S . По аналогии с первой серией опытов измерение составляющих сил резания проводится при постоянных значениях скорости резания, глубины резания и переменной подаче S_1, S_2, S_3, S_4 .
3. Определяется зависимость сил P_z , P_y и P_x от скорости резания V . По аналогии с предыдущими сериями опытов составляющие силы резания измеряются при переменных значениях скорости резания V_1, V_2, V_3 и V_4 , при постоянных значениях подачи и глубины.

Результаты полученных экспериментальных данных заносятся в протокол (см. приложение 2).

На основе полученных экспериментальных данных в двойной логарифмической системе координат строятся зависимости $P_z=f(t)$, $P_z=f(S)$, $P_z=f(V)$ (рис. 1). Через опытные точки проводят прямую линию так, чтобы возможно большее число точек равномерно группировалось вокруг прямой. Тогда показатели степени при глубине, подаче и скорости резания определяются как тангенс угла наклона прямых линий к соответствующей оси координат:

$$x_{pz} = \operatorname{tg}\alpha_1; y_{pz} = \operatorname{tg}\alpha_2; n_{pz} = \operatorname{tg}\alpha_3.$$

Постоянный коэффициент C_{pz} определяется как среднеарифметическая величина трех-четырех значений при известных значениях P_z , t , S , V (из опытных данных) и полученных показателях степени x_{pz} , y_{pz} и n_{pz} .

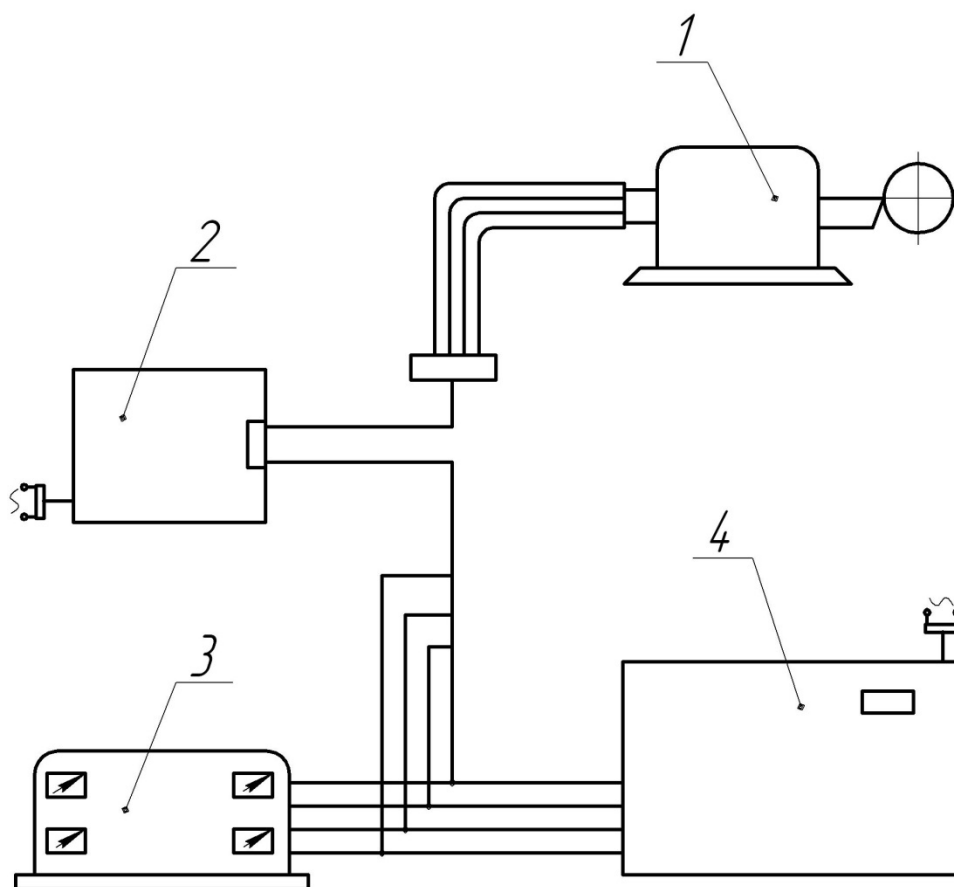


Рис. 10. Схема измерения сил резания при точении: 1 — динамометр; 2 — усилитель сигнала; 3 — показывающий прибор; 4 — записывающий блок

Задание для самостоятельного выполнения работы

Ознакомиться с аппаратурой, методикой и содержанием работы.

Выполнить эксперименты по изучению влияния элементов режима резания на составляющие силы резания P_z , P_y и P_x .

По результатам эксперимента построить графики функциональных зависимостей.

Получить формулы, связывающие силы резания P_z , P_y и P_x с элементами режима резания.

Сделать выводы о степени влияния элементов процесса резания на силы P_z , P_y и P_x и объяснить полученные результаты.

Вопросы для самоконтроля

1. Изобразите на эскизе схему действия сил резания при токарной обработке.
2. Перечислите силы, действующие на токарный проходной резец в процессе резания, дайте их определение и назначение.
3. Объясните влияние на составляющие силы резания элементов режима резания (скорости, подачи и глубины) и геометрических параметров режущей части токарного резца. Почему глубина оказывает большее влияние на силу резания, чем подача?
4. Напишите экспериментальные формулы для подсчета составляющих силы резания при точении и объясните их.
5. Объясните методики обработки экспериментальных данных графоаналитическим методом, методом наименьших квадратов и полного факторного эксперимента типа 2^2 и 2^3 .

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ РЕЖИМА РЕЗАНИЯ НА ТЕМПЕРАТУРУ ПРИ ТОЧЕНИИ

Цель работы

Целью работы является экспериментальное определение влияния элементов режима резания на температуру резания при точении.

Общие сведения о температуре резания

Теплота является одним из основных физических показателей процесса резания, в частности, большое влияние она оказывает на износ и стойкость инструмента и, следовательно, на производительность процесса обработки деталей.

Температура, возникающая в процессе резания, имеет двоякое значение. С одной стороны, она облегчает условия деформирования срезаемого слоя при резании, так как определяет интенсивность протекания процессов разупрочнения обрабатываемого материала. С другой стороны, непрерывное тепловое воздействие на рабочие поверхности инструмента приводит к износу инструмента. Таким образом, тепловыми процессами при резании необходимо управлять так, чтобы выделяющееся тепло облегчало процесс резания и вместе с тем не снижало стойкости инструмента и точности обработки. Высокая температура, возникающая в процессе резания, зависит от физико-механических и теплофизических свойств обрабатываемого и инструментального материалов, геометрии инструмента, элементов режима резания и ряда других факторов.

Формула, определяющая зависимость температуры резания $T^{\circ}\text{C}$ от элементов режима резания, в общем виде может быть представлена как

$$T^{\circ}\text{C} = C_T \cdot t^{x_T} \cdot S^{y_T} \cdot v^{n_T},$$

где C_T – коэффициент, зависящий от рода и механических свойств обрабатываемого материала, геометрических параметров инструмента и условий резания;

n_T , y_T , x_T – показатели степени влияния соответственно скорости резания, подачи и глубины резания на температуру.

Наибольшее влияние на температуру резания оказывает скорость резания, затем – подача и наименьшее – глубина резания.

Измерение температуры резания свидетельствует, что с увеличением отношения t/S температура резания уменьшается:

$$T^{\circ}\text{C} = \frac{C'_T}{(t/S)^{P_T}}.$$

Отсюда следует, что для снижения температуры резания при заданной площади сечения срезаемого слоя, необходимо работать с возможно большим отношением t/S .

Различное влияние подачи и глубины на температуру резания связано с различными условиями теплоотвода и стружкообразования при изменении S и t .

Уровень температуры резания зависит от рода и механических свойств обрабатываемого материала. С увеличением твердости и прочности обрабатываемого материала температура резания возрастает. Из геометрических параметров инструмента наибольшее влияние оказывает угол в плане, уменьшение которого на заданных глубине резания и подаче уменьшает температуру резания.

К методам непосредственного измерения температуры резания можно отнести методы искусственной, полуискусственной, естественной термопары и бесконтактный метод. Каждому из перечисленных методов непосредственного измерения температуры присущи свои преимущества и недостатки. Наиболее простым и доступным является метод естественной термопары.

Метод основан на том, что в процессе резания в месте соприкосновения передней поверхности инструмента со стружкой и задней поверхности с поверхностью резания естественным путем создаются термопары (рис. 11), электродами которых являются материал обрабатываемой заготовки и материал режущей части инструмента. Если обрабатываемую заготовку и инструмент включить в замкнутую электрическую сеть, то величина термоэлектродвижущей силы, возникающей в термоэлементе, будет пропорциональна температуре скользящего «спая» образовавшейся термопары. «Спай» термопары можно представить как большое количество параллельно соединенных термопар, имеющих различное внутреннее сопротивление $R_1, R_2, \dots, R_n$.

Различные точки площадок контакта нагреты неодинаково, а поэтому в каждом термоэлементе будет генерироваться различная термоэлектродвижущая сила $e_1, e_2, \dots, e_n$. Отсюда следует, что методом естественной термопары измеряется не максимальная, а некоторая средняя контактная температура на передней и задней поверхностях инструмента.

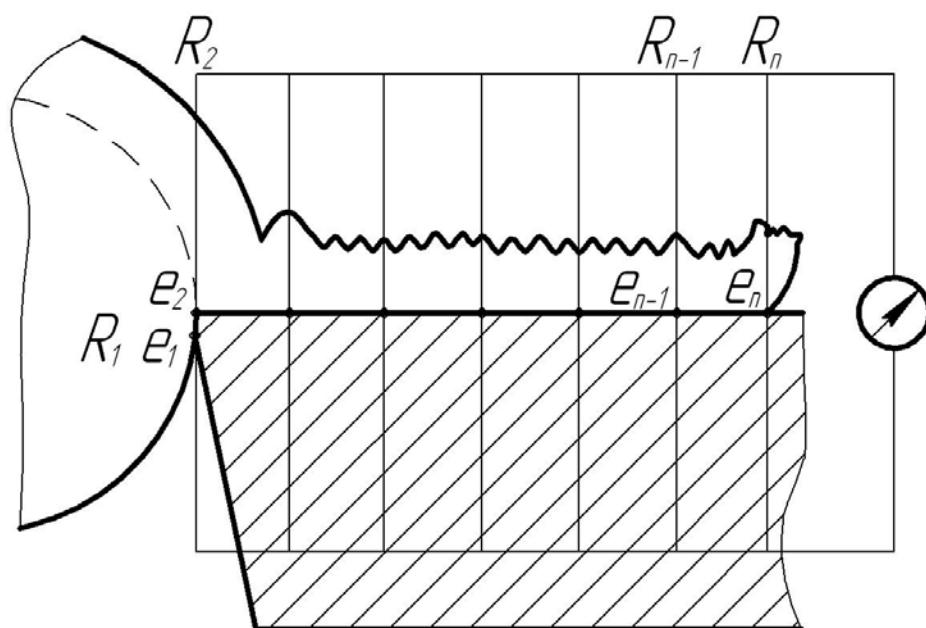


Рис. 11. Естественно образующаяся термопара

Схема измерения температуры при токарной обработке методом естественной термопары представлена на рис. 12. Обрабатываемая заготовка 1 изолирована от патрона 3 и центра задней бабки эбонитовыми прокладками и пробкой 5. Цельный резец 2 из быстрорежущей стали или твердого сплава изолирован от резцедержателя эбонитовыми прокладками 5. При использовании резцов с механическим креплением пластин изолируется пластина от корпуса державки. Заготовка медным проводником соединена с гибким валом 6, закрепленным в эбонитовой втулке, установленной в конце шпинделя станка 4. Контактный наконечник 7 гибкого вала опущен в ванночку с ртутью 8. Милливольтметр 9 одной клеммой соединен с резцом, а вторым – с ртутным токосъемником. Заготовку изолируют от станка для устранения влияния паразитных термопар, которые могут возникнуть между отдельными деталями станка. Однако роль паразитных термопар при высокой температуре контактных поверхностей инструмента незначительна, и за счет некоторого снижения точности измерения установку можно упростить, отказавшись от изоляции заготовки, сохранив изоляцию только резца.

При использовании любого из методов непосредственного измерения температуры, в том числе и метода естественной термопары, необходимо проводить тарировку термопары для перевода показаний милливольтметра в градусы Цельсия. Рассмотрим две схемы тарировки. При первом способе (рис. 13) тарировку производят в расплавленном металле. В электропечь 1 помещают тигель 2 с расплавленным металлом, имеющим низкую температуру плавления (свинцом, оловом, сурьмой, сплавом Вуда и

т.п.). Стержни 3 и 4 из обрабатываемого и инструментального материалов опускают на одинаковую глубину в расплавленный металл, а к их концам присоединяют милливольтметр 6, применяемый в опытах по изменению температуры при резании. Между стержнями помещают контрольную термопару 5, гальванометр 7 которой проградуирован в градусах. Нагревая и охлаждая расплавленный металл, сравнивают показания милливольтметра 6 в милливольтках и гальванометра 7 в градусах и строят тарировочный график $mV - C^{\circ}$.

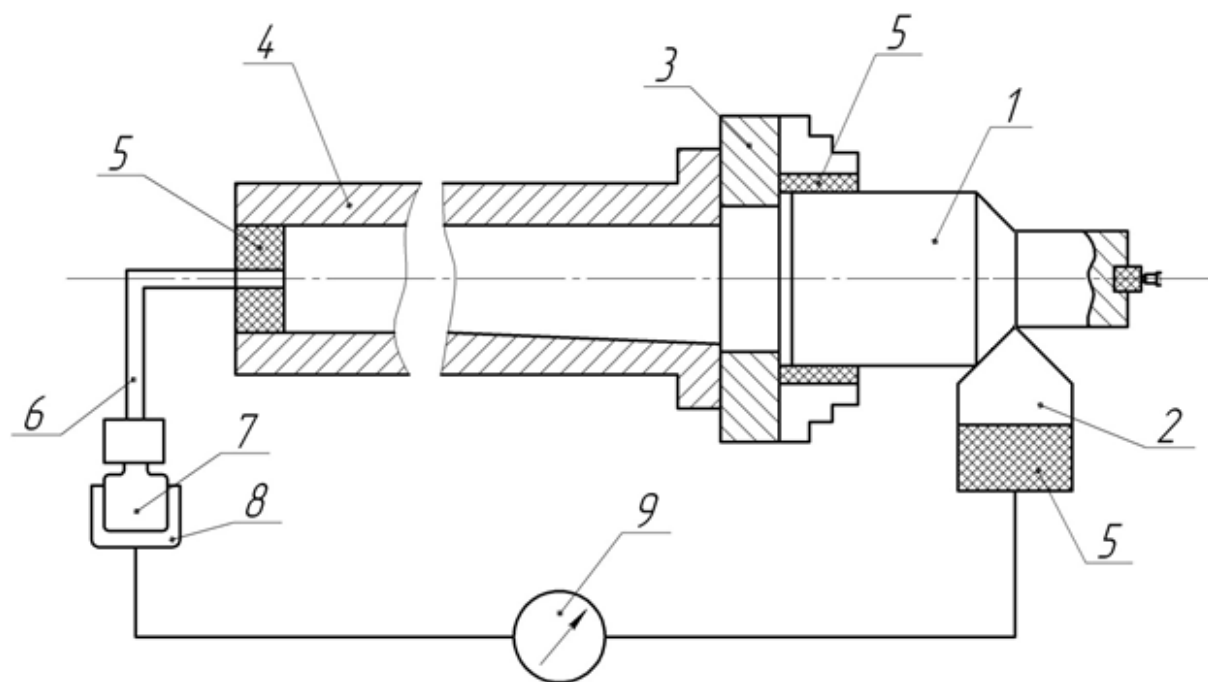


Рис. 12. Схема измерения температуры резания методом естественной термопары

При втором способе (рис. 14) для тарировки используют пластинчатый нагреватель. Стержни 1 и 2 из обрабатываемого и инструментального материалов с определенной силой прижимают к нихромовому нагревателю 3. К нагревателю приварены две тонкие пластинки, представляющие собой расплющенные концы проводов из меди и константана и образующие контрольную термопару 4. Нагрев пластины 3 осуществляется переменным током через трансформатор 7. Для регулирования температуры нагрева служит реостат 6. Задавая различную температуру нагрева торцов тарируемой термопары, сравнивают показания рабочего милливольтметра 5 с показаниями контрольного гальванометра 8 и строят тарировочный график.

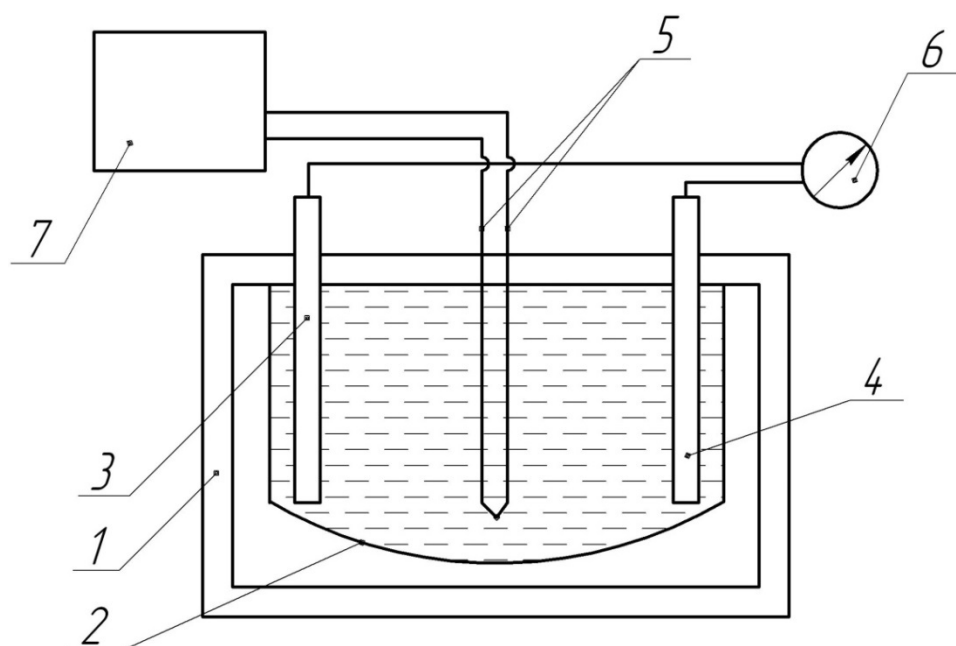


Рис. 13. Схема тарирования термопары в расплавленном металле

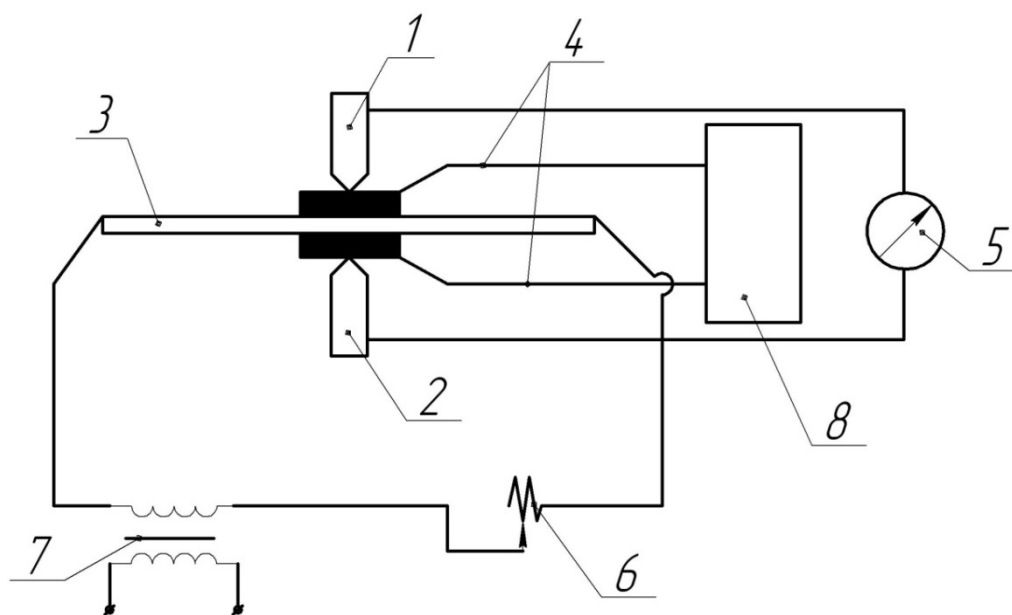


Рис. 14. Схема контактного способа тарирования термопары

Содержание работы

Опыты проводятся на токарно-винторезном станке мод.16K20 с использованием методики полного факторного эксперимента. Измерение температуры резания осуществляется методом естественной термопары.

Эксперименты проводятся в следующей последовательности:

1. Устанавливаются уровни варьирования параметров процесса резания: $t_{\max}$ и $t_{\min}$, $S_{\min}$, $V_{\max}$ и $V_{\min}$.
2. Определяется зависимость температуры резания $T^{\circ}\text{C}$ от глубины резания t . Эксперименты проводятся при переменных значениях глубины резания t_1, t_2, t_3, t_4 и постоянных значениях скорости резания и подачи.
3. Определяется зависимость $T^{\circ}\text{C}$ от подачи S . По аналогии с первой серией опытов измерение проводится при постоянных значениях скорости резания, глубины резания и переменной подаче S_1, S_2, S_3, S_4 .
4. Определяется зависимость $T^{\circ}\text{C}$ от скорости резания V . По аналогии с предыдущими сериями опытов $T^{\circ}\text{C}$ измеряется при переменных значениях скорости резания V_1, V_2, V_3 и V_4 , при постоянных значениях подачи и глубины.

Результаты полученных экспериментальных данных заносятся в протокол (см. приложение 3).

На основе полученных экспериментальных данных в двойной логарифмической системе координат строятся зависимости $T^{\circ}\text{C} = f(t)$, $T^{\circ}\text{C} = f(S)$, $T^{\circ}\text{C} = f(V)$ (рис. 15). Через опытные точки проводят прямую линию так, чтобы возможно большее число точек равномерно группировалось вокруг прямой. Тогда показатели степени при глубине, подаче и скорости резания определяются как тангенс угла наклона прямых линий к соответствующей оси координат:

$$x_T = \operatorname{tg} \alpha_1; y_T = \operatorname{tg} \alpha_2; n_T = \operatorname{tg} \alpha_3.$$

Постоянный коэффициент C_T определяется как среднеарифметическая величина трех-четырех значений при известных значениях $T^{\circ}\text{C}$, t , S , V (из опытных данных) и полученных показателях степени x_T , y_T и n_T .

Задание для самостоятельного выполнения работы

1. Ознакомиться с содержанием и методикой проведения работы.
2. Установить уровни варьирования элементов режима резания и составить матрицу планирования.
3. Выполнить экспериментальные исследования по влиянию скорости, подачи и глубины резания на температуру.
4. По результатам эксперимента построить графики функциональных зависимостей.

5. Получить формулу, связывающую температуру резания $T^{\circ}\text{C}$ с элементами режима резания.
6. Сделать выводы о степени влияния различных факторов на температуру резания.

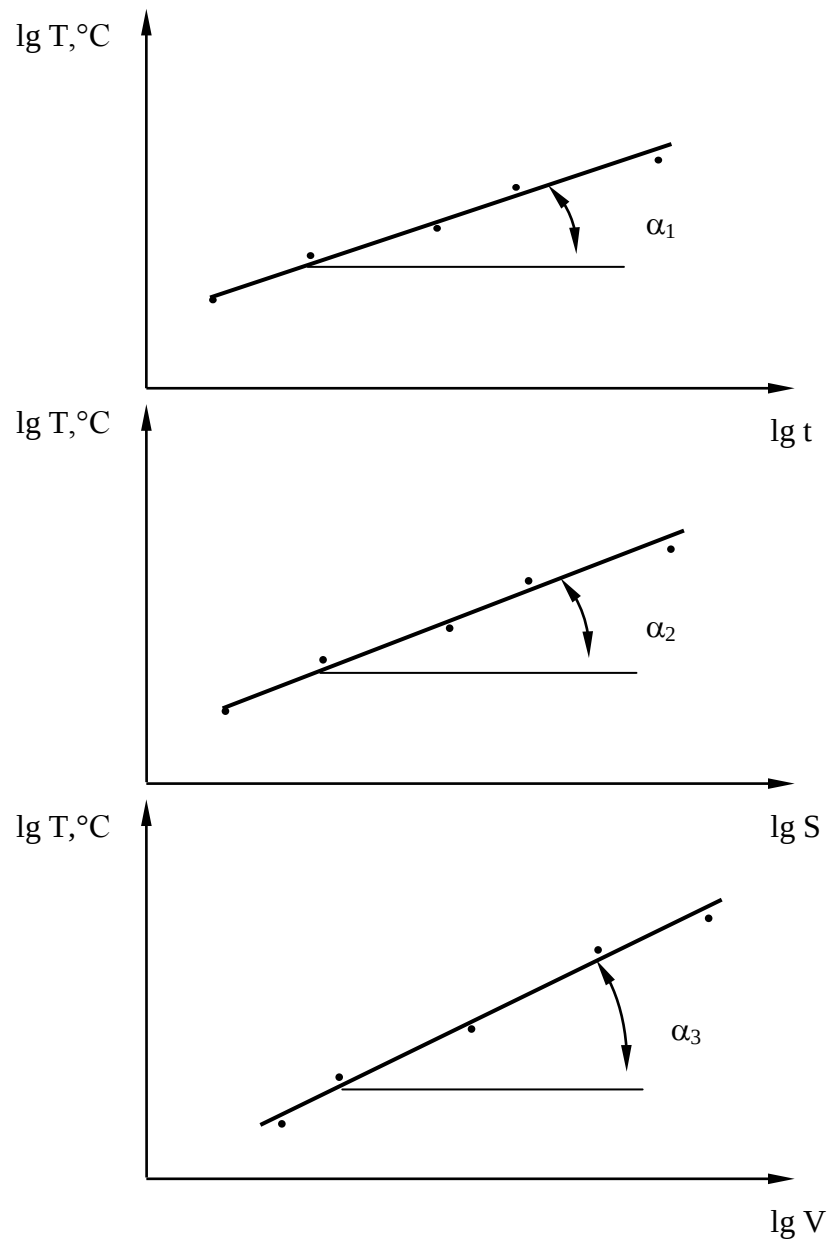


Рис. 15. Зависимости изменения температуры резания от глубины резания t , подачи S и скорости V

Вопросы для самоконтроля

1. Какие источники теплоты при резании Вам известны? Нарисуйте и объясните схему распределения тепловых потоков при лезвийной обработке.
2. Напишите уравнение теплового баланса при резании лезвийным инструментом. Объясните влияние скорости резания на количество теплоты, уходящей в резец, стружку и заготовку.
3. Перечислите методы изменения температуры при резании, укажите их достоинства и недостатки.
4. С какой целью проводится тарировка термопар? Какие способы тарировки термопар Вы знаете? Нарисуйте схемы способов тарировки и объясните их.
5. Объясните влияние элементов режима резания (скорости, подачи и глубины) и геометрических параметров режущей части токарного резца на температуру резания. Почему подача оказывает большее влияние на температуру резания, чем глубина?
6. Какова взаимосвязь температуры резания с износом инструмента и качеством обработанной поверхности?
7. Объясните методики обработки экспериментальных данных графо-аналитическим методом, методом наименьших квадратов и полного факторного эксперимента типа 2^2 и 2^3 .

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ РЕЖИМА РЕЗАНИЯ НА КОЭФФИЦИЕНТ УКОРОЧЕНИЯ СТРУЖКИ

Цель работы

Целью работы является экспериментальное определение влияния элементов режима резания на коэффициент укорочения стружки.

Общие сведения об укорочении стружки

Процесс образования стружки сопровождается двумя видами пластических деформаций: сжатием определенного объема металла, непосредственно примыкающего к передней поверхности режущего инструмента, и его сдвигом. Для того чтобы этот сдвиг произошел, необходимо, чтобы напряжения на плоскости сдвига превышали предел текучести материала.

Для качественной оценки степени пластической деформации срезаемого слоя при его превращении в стружку вводится понятие укорочения стружки.

В результате пластической деформации происходит увеличение размеров стружки по сравнению с размерами срезаемого слоя: стружка укорачивается, утолщается и уширяется. Степень изменения размеров стружки по сравнению со срезаемым слоем характеризуется тремя коэффициентами изменения формы:

- коэффициентом укорочения стружки ($K_L = L / l_c > 1$);
- коэффициентом утолщения стружки ($K_a = a_c / a > 1$);
- коэффициентом уширения стружки ($K_b = b_c / b > 1$).

Здесь L – длина срезаемого слоя, l_c – длина стружки, a и b – соответственно толщина и ширина срезаемого слоя, a_c и b_c – соответственно толщина и ширина стружки.

Так как объем срезаемого слоя равен объему стружки $L \cdot a \cdot b = l_c \cdot a_c \cdot b_c$, следовательно $K_L = K_a \cdot K_b$. Учитывая, что уширение стружки незначительно и составляет 5–15% от ширины срезаемого слоя, в то время как укорочение и утолщение оценивается в 250–600%, то при черновой обработке можно считать $K_L = K_a$. При чистовой обработке коэффициент K_b необходимо учитывать, поэтому коэффициент укорочения будет равен $K_L = K_a \cdot K_b$.

Коэффициент укорочения стружки можно определить двумя методами: измерением длины стружки и взвешиванием стружки.

При использовании первого метода длину стружки ограничивают разделением длины срезаемого слоя на отдельные части. Например, при токарной обработке на заготовке делают один или несколько пазов и фиксируют расстояние между ними. При прохождении резца через паз процесс резания прерывается. Стружку собирают и измеряют ее длину по контактной стороне. Коэффициент укорочения стружки подсчитывают по приведенной выше формуле. Если непрерывную стружку получить трудно, применяют весовой метод. Вес кусочка стружки равен:

$$Q = V \cdot \rho,$$

где Q – вес кусочка стружки, V – его объем, ρ – плотность.

Выразив объем кусочка стружки через параметры срезаемого слоя, получим:

$$\begin{aligned} Q &= L \cdot a \cdot b \cdot \rho = K_L \cdot l_c \cdot S \cdot t \cdot \rho; \\ K_L &= Q / (l_c \cdot S \cdot t \cdot \rho). \end{aligned} \quad (19)$$

Рассмотрим влияние различных факторов на коэффициент укорочения стружки.

Из элементов режима резания на коэффициент укорочения стружки K_L оказывают влияние подача S и скорость резания V .

С увеличением подачи (или толщины срезаемого слоя) уменьшается коэффициент трения по передней поверхности и, следовательно, уменьшаются размеры зоны вторичных пластических деформаций и деформация в ней. В результате уменьшается и общая деформация, которая характеризуется коэффициентом K_L . Глубина резания (или ширина срезаемого слоя) не оказывает практически влияния на коэффициент K_L .

Влияние скорости резания на коэффициент укорочения стружки наиболее сложное (рис. 16). При увеличении скорости резания от значения V_1 до V_2 растет высота нароста и, соответственно, фактический передний угол γ_{ϕ} . Это вызывает снижение степени пластической деформации и коэффициент укорочения стружки уменьшается. При повышении скорости резания со значения V_2 до V_3 высота нароста уменьшается и, соответственно, снижается фактический передний угол, что вызывает рост степени пластической деформации и коэффициент K_L увеличивается. Дальнейшее увеличение скорости резания ведет к снижению коэффициента трения на передней поверхности и, следовательно, к уменьшению размеров зоны вторичных пластических деформаций и деформации в ней. В результате коэффициент укорочения стружки K_L снижается.

Из геометрических параметров резца наибольшее влияние на коэффициент укорочения стружки K_L оказывают передний угол и главный угол в плане.

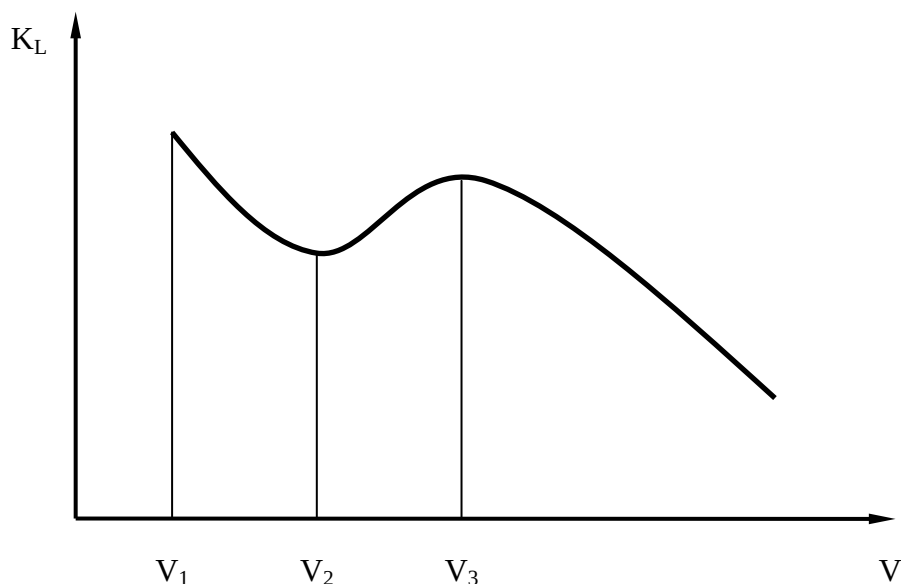


Рис. 16. Зависимость изменения коэффициента укорочения стружки K_L от скорости резания V

С увеличением переднего угла γ коэффициент укорочения стружки K_L уменьшается.

Влияние инструментального материала проявляется через его фрикционные и теплофизические свойства. С увеличением коэффициента трения между инструментальным и обрабатываемым материалами повышается степень пластической деформации и коэффициент укорочения стружки. При снижении теплопроводности твердого сплава коэффициент укорочения стружки уменьшается. Это объясняется ухудшением теплоотвода из зоны стружкообразования в тело инструмента, которое сопровождается ростом температуры в зоне резания. Рост температуры приводит к снижению прочности обрабатываемого материала и, соответственно, к снижению K_L .

Содержание работы

Опыты проводятся на токарно-винторезном станке мод.16K20. Измерение коэффициента укорочения стружки K_L осуществляется весовым методом.

Эксперименты проводятся в следующей последовательности:

1. Определяется зависимость коэффициента укорочения стружки K_L от подачи S . Эксперименты проводятся при постоянных значениях скорости резания, глубины резания и переменной подаче S_1, S_2, S_3, S_4 .
2. Определяется зависимость коэффициента укорочения стружки K_L от скорости резания V . По аналогии с предыдущей серией опытов K_L

измеряется при переменных значениях скорости резания V_1, V_2, V_3 и V_4 , при постоянных значениях подачи и глубины.

Результаты полученных экспериментальных данных заносятся в протокол (см. приложение 4).

На основе полученных экспериментальных данных строятся зависимости $K_L = f(S)$, $K_L = f(V)$.

Задание для самостоятельного выполнения работы

1. Ознакомиться с содержанием и методикой проведения работы.
2. Установить уровни варьирования элементов режима резания.
3. Выполнить экспериментальные исследования по влиянию подачи и скорости резания на коэффициент укорочения стружки K_L .
4. По результатам эксперимента построить графики функциональных зависимостей.
5. Сделать выводы о влиянии подачи и скорости резания на коэффициент укорочения стружки K_L .

Вопросы для самоконтроля

1. Изобразите схему зоны стружкообразования. Объясните причины возникновения дополнительных пластических деформаций стружки.
2. Дайте определение коэффициентов изменения формы стружки.
3. Перечислите методы определения коэффициента укорочения стружки K_L .
4. Выведите формулу расчета коэффициента укорочения стружки K_L весовым методом.
5. Объясните влияние элементов режима резания (скорости, подачи и глубины) на коэффициент укорочения стружки K_L .
6. Объясните влияние свойств инструментального материала на коэффициент укорочения стружки K_L .
7. Какие из геометрических параметров резца оказывают наибольшее влияние на коэффициент укорочения стружки K_L ?

4. ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 1. РАСЧЕТ ЭЛЕМЕНТОВ РЕЖИМА РЕЗАНИЯ ПРИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКЕ

Цель работы

Назначение элементов режима резания при токарной обработке.

Содержание работы

Расчет элементов режима резания проводится тремя способами:

- эмпирическими формулами, используя справочники [6, 8, 9];
- по таблицам нормативов и каталогам фирм производителей режущего инструмента [7, 10];
- на персональном компьютере с использованием программы [8] и программы «Sandvik CoroGuide» фирмы Сандвик Коромант.

Рассмотрим последовательность назначения элементов режима резания при механической обработке.

Режимом резания называется совокупность глубины резания, подачи, периода стойкости инструмента и скорости резания.

С целью установления последовательности выбора V , S , t и T определим влияние их на производительность обработки. Для этого необходимо выяснить, что выгоднее: увеличивать глубину резания за счет уменьшения подачи или наоборот – работать с большим сечением срезаемого слоя и меньшей скоростью резания или увеличивать скорость резания за счет уменьшения глубины резания и подачи.

Рассмотрим следующий пример: допустим, необходимо обработать валик длиной L , припуск на обработку h . В первую очередь выясним, что больше влияет на производительность: глубина резания или подача.

Обработку будем производить при двух режимах. Для первого режима припуск снимается за один проход и глубина резания $t_1=h=t$, а подача $S_{o1}=S_o$; для второго припуск снимается за два прохода и глубина резания $t_2=h/2=t/2$, а подача $S_{o2}=2 \cdot S_o$.

Производительность обработки, можно характеризовать основным технологическим временем, чем меньше оно, тем выше производительность обработки. Определим основное технологическое время для обоих режимов.

$$T_{o1} = \frac{L}{n_1 \cdot S_{o1}} = \frac{L}{n_1 \cdot S_o};$$

$$T_{o2} = \frac{L}{n_2 \cdot S_{o2}} = \frac{L}{n_2 \cdot S_o}. \quad (20)$$

Скорости резания при выбранном периоде стойкости для первого и второго режимов резания соответственно равны:

$$V_1 = \frac{C_v}{S_o^{y_v} \cdot t^{x_v}};$$

$$V_2 = \frac{C_v}{(2 \cdot S_o)^{y_v} \cdot \left(\frac{t}{2}\right)^{x_v}} = \frac{C_v}{S_o^{y_v} t^{x_v} 2^{y_v - x_v}} = \frac{V_1}{2^{y_v - x_v}}. \quad (21)$$

Отсюда видно, что частота вращения, для первого режима будет больше, чем для второго, а основное технологическое время – меньше.

Следовательно, с точки зрения производительности целесообразно работать с большей глубиной резания, нежели с большей подачей.

Выясним влияние на производительность обработки скорости резания и подачи. Производительность обработки можно выразить через количество заготовок N , обработанных за период стойкости T инструмента:

$$N = \frac{T}{T_o} = \frac{T \cdot 1000 \cdot V \cdot S_o}{L \cdot \pi \cdot D}. \quad (22)$$

Так как для конкретных условий обработки отношение $\frac{T \cdot 1000}{L \cdot \pi \cdot D}$ постоянно, то обозначая его через C , получим

$$N = C \cdot V \cdot S_o. \quad (23)$$

Для того чтобы выявить различное влияние скорости резания и подачи на производительность, поступим следующим образом. Выразим число обработанных за период стойкости деталей только через подачу. При $t = \text{const}$ имеем

$$N = C \cdot S_o \cdot \frac{C_v}{S_o^{y_v} \cdot t^{x_v}} = C \cdot C' \cdot S_o^{1-y_v}; \quad (24)$$

где $C' = \frac{C_v}{t^{x_v}}$.

Из выражения (24) следует, что с увеличением подачи число обработанных деталей возрастает.

Выразим число обработанных деталей за период стойкости только через скорость резания. Определив S_0 через V из выражения (22) и подставив ее значение в формулу (23), получим

$$N = C \cdot V \cdot \frac{(C')^{1/y_v}}{(V)^{1/y_v}} = \frac{C \cdot (C')^{1/y_v}}{(V)^{1/y_v - 1}}. \quad (25)$$

Из выражения (25) следует, что с увеличением скорости резания число заготовок не возрастает, а уменьшается. Таким образом, выгоднее увеличивать подачу, чем скорость резания.

Отсюда последовательность назначения элементов режима резания следующая: в первую очередь задаются максимальной и целесообразной глубиной резания, затем – максимально допустимой подачей и по выбранным глубине резания и подаче, задавшись определенной величиной периода стойкости, определяют допускаемую режущими свойствами инструмента скорость резания.

При токарной черновой (предварительной) обработке и отсутствии ограничений по мощности оборудования, жесткости технологической системы глубину резания принимают равной припуску на обработку. При чистовой (окончательной) обработке припуск снимается за два и более проходов. При параметре шероховатости обработанной поверхности $Ra = 3,2-6,3$ мкм ($Rz = 12,5-40$ мкм) окончательный проход рекомендуется выполнять с глубиной резания в пределах $0,5-2,0$ мм, при $Ra=2,5-0,63$ мкм – с глубиной $0,1-0,4$ мм. Подача на оборот S_0 при токарной черновой (предварительной) обработке принимается максимально допустимой по мощности оборудования, жесткости технологической системы, прочности державки и режущей пластины. Поэтому выбранную по таблицам соответствующих нормативов подачу при предварительной (черновой) обработке следует проверить по прочности державки резца и режущей пластины, жесткости державки резца и обрабатываемой заготовки и прочности механизма станка [1, 2, 3, 4]. Методика расчета подач, ограничивающих процесс резания при токарной обработке, приведена в [6]. Подача при чистовом точении выбирается исходя из требуемых параметров шероховатости обработанной поверхности и радиуса при вершине инструмента.

По известным значениям глубины резания и подачи и выбранному периоду стойкости режущего инструмента определяется допускаемая скорость резания. При токарной обработке по формуле [1]:

$$V_{\text{доп}} = \frac{C_v}{T^m \cdot S^{y_v} \cdot t^{x_v}} \cdot K_v. \quad (26)$$

Затем вычисляется частота вращения заготовки или инструмента, соответствующая данной скорости резания:

$$n = \frac{1000 \cdot V_{\text{доп}}}{\pi \cdot D},$$

где D – диаметр обрабатываемой поверхности или инструмента.

Полученную частоту вращения необходимо скорректировать по паспортным данным станка, выбрав ближайшее меньшее или большее значение $n_{\text{ст}}$ (большее значение не должно превышать 10%), и определить фактическую скорость резания

$$V_{\text{фак}} = \frac{\pi \cdot D \cdot n_{\text{ст}}}{1000}. \quad (27)$$

Сила резания и крутящий момент. Данные параметры определяются по эмпирическим зависимостям с учетом полученных фактических значений подач и скорости резания. Например, при токарной обработке сила резания определяется по формуле:

$$P_z = C_{pz} \cdot t^{x_{pz}} \cdot S^{y_{pz}} \cdot v^{n_{pz}} \cdot k_{pz}$$

Мощность, необходимую для процесса резания, определяют по формуле

$$N_{\text{рез}} = \frac{P_z \cdot V}{60 \cdot 1020}. \quad (28)$$

Расчетная мощность электродвигателя, которая обеспечивает возможность осуществления на выбранном станке процесса резания, определяется с учетом КПД станка η

$$N_{\text{Э}} = \frac{N_{\text{РЕЗ}}}{\eta}. \quad (29)$$

Для того, чтобы на выбранном станке возможно было осуществлять процесс резания, необходимо, чтобы мощность электродвигателя данного станка $N_{\text{СТ}}$ была больше (или, в крайнем случае равна) расчетной мощности, т.е.

$$N_{\text{СТ}} > N_{\text{Э}}. \quad (30)$$

Если данное условие не выполняется, то целесообразно уменьшить не подачу, а частоту вращения шпинделя станка, выбрав ближайшую меньшую по паспорту станка. Затем пересчитать значения V , P_z , $N_{\text{РЕЗ}}$ и $N_{\text{Э}}$ и проверить условие (30). Если уменьшение частоты вращения приведет к существенной потере производительности, целесообразно обработку провести за два и более прохода, разделив соответственно глубину резания, или, в крайнем случае, выбрать другой станок.

Расчет режима резания заканчивается определением основного технологического времени по формуле:

$$T_o = L/V_s, \quad (31)$$

где $L = l + y + \Delta$ – путь резания, мм;

l – длина обработанной поверхности, мм;

y – величина врезания инструмента, мм;

Δ – величина перебега инструмента, мм;

$V_s = S_o \cdot n$ – скорость движения подачи (минутная подача), мм/мин.

Задание для выполнения работы

1. Ознакомиться с методикой расчета элементов режима резания при токарной обработке и инструкцией по работе с компьютерными программами.

2. Рассчитать элементы режима резания при токарной обработке по методикам, указанным в содержании работы.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 2.

ИССЛЕДОВАНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКЕ

Цель работы

Исследование влияния элементов режима резания и геометрии режущей части инструмента на шероховатость обработанной поверхности.

Содержание работы

Работа выполняется на персональном компьютере с использованием программы «Шероховатость» [5]. Исследуется влияние элементов режима резания (скорость резания V , подача на оборот S_o , глубина резания t), геометрии режущей части инструмента (главный угол в плане ϕ , вспомогательный угол в плане ϕ_1) и радиуса при вершине r на параметры шероховатости Ra (среднее арифметическое отклонение профиля) и Rz (высота неровностей профиля) обработанной поверхности.

Диапазоны исследуемых параметров:

скорость движения подачи (минутная подача) V_s – 50-300 мм/мин с дискретностью 10 мм/мин;

частота вращения шпинделя детали n – 400-1250 об/мин с дискретностью 10 об/мин;

глубина резания t – 0,5-4,0 мм с дискретностью 0,1 мм;

диаметр заготовки D – 5-50 мм с шагом 0,1 мм;

главный угол в плане ϕ – 30-80°, вспомогательный угол в плане ϕ_1 – 10-60° – с дискретностью 1°;

радиус при вершине инструмента r – 0-1 мм с шагом 0,05 мм.

Исследования по программе проводятся в форме однофакторного эксперимента, когда выявляется влияние одного параметра на исследуемую функцию при постоянстве всех других. Особенностью данной программы является то, что скорость резания в ней задается не в явном виде, а пересчитывается в зависимости от изменения диаметра заготовки. Поэтому при исследовании шероховатости обработанной поверхности в функции скорости резания, которая зависит от n и D ($V = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000}$), необходимо из-

менять диаметр D заготовки, так как изменение частоты вращения n приведет к изменению скорости движения подачи V_s . Аналогично, при исследовании зависимости шероховатости от подачи на оборот S_o , нужно изменять скорость движения подачи V_s , которая связана с S_o и n ($V_s = S_o \cdot n$), так

как изменение частоты вращения n приведет к изменению скорости резания, что нарушит условия однофакторного эксперимента.

Результаты исследований заносятся в протокол (см. приложение 5).

Задание для выполнения работы

1. Ознакомиться с содержанием работы и инструкцией по работе с программой.

2. Подготовить таблицы исходных данных для исследования параметров шероховатости обработанной поверхности.

3. Выбрать материал заготовки.

4. Провести исследование по влиянию скорости резания и подачи на оборот на параметры шероховатости обработанной поверхности.

5. Провести исследование по влиянию радиуса при вершине токарного резца при различных значениях главного угла в плане на параметры шероховатости обработанной поверхности.

6. Построить графики зависимостей параметров шероховатости от скорости резания, подачи на оборот, радиуса при вершине токарного резца.

7. Проанализировать влияние исследуемых параметров на параметры шероховатости обработанной поверхности.

Вопросы для самоконтроля

1. Объясните влияние скорости резания на параметры шероховатости обработанной поверхности.

2. Объясните влияние подачи на оборот и главного угла в плане на параметры шероховатости обработанной поверхности.

3. Объясните влияние радиуса при вершине инструмента на параметры шероховатости обработанной поверхности.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 3.

ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛОВЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ПРИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКЕ С ПРОДОЛЬНОЙ ПОДАЧЕЙ

Цель работы

Исследование влияния элементов режима резания, геометрии режущей части токарного резца и обрабатываемого материала на составляющие силы резания при токарной обработке с продольной подачей.

Содержание работы

Работа выполняется на персональном компьютере с использованием программы «Точение» [5]. Исследуется влияние элементов режима резания (скорость резания V , подача на оборот S_o , глубина резания t), геометрии режущей части токарного резца (передний угол γ , угол наклона главной режущей кромки λ , главный ϕ и вспомогательный ϕ_1 углы в плане) на главную составляющую P_z , радиальную составляющую P_y и осевую составляющую P_x силы резания при точении различных обрабатываемых материалов.

Исследования проводятся по методике однофакторного эксперимента, когда последовательно изменяется один исследуемый параметр при постоянных значениях всех других параметров.

Диапазоны исследуемых параметров:

скорость резания V – 10-200 м/мин с дискретностью 1 м/мин;

подача на оборот S_o – 0,05-0,5 мм/об с дискретностью 0,1 мм/об;

глубина резания t – 0,2-4 мм;

главный угол в плане ϕ – 30-90°, передний угол γ – 0-15°, угол наклона главной режущей кромки λ – -5 ... +5° все с дискретностью 1°;

вспомогательный угол в плане ϕ_1 принимается постоянным и выбирается в пределах 30-60°.

Результаты исследований заносятся в протокол (см. приложение 6).

Задание для выполнения работы

1. Ознакомиться с содержанием работы и инструкцией по работе с программой.

2. Подготовить таблицы исходных данных для исследования составляющих силы резания при токарной обработке с продольной подачей.

3. Выбрать материал режущей части токарного резца и материал заготовки.

4. Провести исследование по влиянию скорости резания, подачи на оборот и глубины резания на составляющие силы резания.

5. Провести исследование по влиянию переднего угла, главного угла в плане и угла наклона главной режущей кромки на составляющие силы резания.

6. Провести исследование по влиянию марки обрабатываемого материала на составляющие силы резания.

7. Построить графики зависимостей составляющих силы резания от скорости резания, подачи на оборот, глубины резания, переднего угла, главного угла в плане и угла наклона главной режущей кромки.

8. Проанализировать влияние исследуемых параметров на составляющие силы резания.

Вопросы для самоконтроля

1. Перечислите составляющие силы резания при токарной обработке с продольной подачей и объясните их назначение.

2. Объясните выбор инструментального материала режущей части токарного резца для обработки выбранного материала заготовки.

3. Объясните влияние элементов режима резания (скорости резания, подачи на оборот и глубины резания) на составляющие силы резания.

4. Объясните влияние переднего угла, главного угла в плане и угла наклона главной режущей кромки на составляющие силы резания.

5. Объясните влияние обрабатываемого материала на составляющие силы резания.

6. Объясните, что больше влияет на главную составляющую силы резания P_z глубина резания или подача на оборот.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ОБРАБОТКЕ РЕЗАНИЕМ

Цель работы

Исследование влияния элементов режима резания, геометрии режущей части на температуру в режущем клине токарного резца и в заготовке.

Содержание работы

Работа выполняется на персональном компьютере с использованием программы «Тепло» [5]. Исследуется влияние элементов режима резания (скорость резания V , подача на оборот S_o , глубина резания t), геометрии режущей части (передний угол γ , главный задний угол α , главный угол в плане ϕ) на распределение температуры по передней поверхности токарного резца и диаметра обрабатываемой поверхности на температуру в заготовке.

Исследования проводятся по методике однофакторного эксперимента, когда последовательно изменяется один исследуемый параметр при постоянных значениях всех других параметров.

Диапазоны исследуемых параметров:

скорость резания V – 80-160 м/мин с дискретностью 10 м/мин;

подача на оборот S_o – 0,2-0,8 мм/об с дискретностью 0,1 мм/об;

глубина резания t – 0,1-3,0 мм;

главный угол в плане ϕ – 30-90° с шагом 5°;

передний угол γ и главный задний угол α – 0-15° с шагом 1°;

диаметр заготовки D – 16-40 мм с шагом 1 мм.

Результаты исследований заносятся в протокол (см. приложение 7).

Задание для выполнения работы

1. Ознакомиться с содержанием работы и инструкцией по работе с программой.

2. Подготовить таблицы исходных данных для исследования распределения температуры на передней поверхности токарного резца и в заготовке.

3. Выбрать материал режущей части токарного резца и материал заготовки.

4. Провести исследования по влиянию элементов режима резания (скорости, подачи на оборот и глубины резания) и геометрии режущей части токарного резца (переднего угла, главного угла в плане) на распределение температуры по передней поверхности.

5. Провести исследования по влиянию диаметра обрабатываемой поверхности на температуру в заготовке при различных значениях элементов режима резания (скорости, подачи на оборот и глубины резания) и геометрии режущей части токарного резца (переднего угла, главного угла в плане).

6. Построить графики распределения температуры по передней поверхности токарного резца и температуры в заготовке для различных условий резания (скорости резания, подачи на оборот, глубины резания, переднего угла и главного угла в плане) и диаметра заготовки.

7. Проанализировать влияние исследуемых параметров на распределение температуры по передней поверхности токарного резца и на температуру в заготовке.

Вопросы для самоконтроля

1. Назовите основные источники образования теплоты при резании.
2. Объясните роль температуры при обработке материалов резанием.
3. Объясните выбор инструментального материала режущей части токарного резца для обработки выбранного материала заготовки.
4. Объясните влияние элементов режима резания (скорости резания, подачи на оборот и глубины резания) на температуру резания.
5. Объясните влияние переднего угла, главного заднего угла и главного угла в плане на температуру резания.
6. Объясните влияние диаметра заготовки на температуру резания.
7. Объясните, что больше влияет на температуру резания – глубина резания или подача на оборот.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Верещака, А. С. Резание материалов: учебник для вузов / А. С. Верещака. – М.: Высшая школа, 2009. – 535 с.
2. Ящерицын, П. И. Теория резания: учебник для вузов / П. И. Ящерицын. – Минск : Новое знание, 2005. – 512 с.
3. Резание материалов : учебник для вузов / Е. Н. Трембач [и др.] – 3-е изд., перераб. и доп. – Старый Оскол : ТНТ, 2009. – 511 с.
4. Рыжкин, А. А. Обработка материалов резанием : учеб. пособие для вузов / А.А. Рыжкин. – Ростов н/ Д : Феникс, 2008. – 411 с.
5. Петраков, Ю. В. Моделирование процессов резания : учебное пособие / Ю. В. Петраков, О. И. Драчев. – Старый Оскол : ТНТ, 2011. – 240 с.
6. Справочник технолога-машиностроителя : В 2 т. / под ред. А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1985. – Т. 2. – 495 с.
7. Общемашиностроительные нормативы режимов резания : справочник. – М. : Машиностроение, 1991. – Т. 1. – 640 с. : ил.
8. Карев, Е. А. Автоматизация расчета режимов резания при механической обработке заготовок : учебное пособие / Е. А. Карев, В. П. Табаков, Н. В. Еремин. – Ульяновск : УлГТУ, 2003. – 103 с.
9. Справочник технолога-машиностроителя : В 2 т. / под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. А. Н. Малова. – 3-е изд., перераб. – М. : Машиностроение, 1972. – Т. 2. – 568 с.
10. Режимы резания металлов : справочник / Науч.-исслед. ин-т технологии автомоб. пром-ти ; под ред. Ю. В. Барановского. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1972. – 407 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Протокол к лабораторной работе №1

ГЕОМЕТРИЯ РЕЖУЩЕЙ ЧАСТИ РЕЗЦОВ

№ резца	Наименование резца	Сечение резца ВxН	Углы резца в градусах								При вершине в плане
			Главные				Вспомогательные				
			Передний	Задний	Резания	Заострения	Угол наклона гл. ре- жущей кромки	В плане	Задний	В плане	
			γ	α	δ	β	λ	φ	α_1	φ_1	ε
1											
2											
3											

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Протокол к лабораторной работе №2

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ РЕЖИМА РЕЗАНИЯ НА СИЛЫ ПРИ ТОЧЕНИИ

Станок _____

Геометрия резца _____

Обрабатываемый материал _____

Инструментальный материал _____

№ эксперимента	Диаметр обрабатываемой поверхности D_0 , мм	Диаметр обработанной поверхности D , мм	Глубина t , мм	Подача S , мм/об	Частота вращения n , об/мин	Скорость V , м/мин	P_z		P_y		P_x	
							мА	Н	мА	Н	мА	Н
1												
2												
3												
4												
5												
6												
7												
8												

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Протокол к лабораторной работе №3

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ РЕЖИМА РЕЗАНИЯ НА ТЕМПЕРАТУРУ ПРИ ТОЧЕНИИ

Станок _____

Геометрия резца _____

Обрабатываемый материал _____

Инструментальный материал _____

№ эксперимента	Диаметр обрабатываемой поверхности D_0 , мм	Диаметр обработанной поверхности D , мм	Глубина t , мм	Подача S , мм/об	Частота вращения n , об/мин	Скорость V , м/мин	Температура резания T	
							mA	°C
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Протокол к лабораторной работе №4

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ РЕЖИМА РЕЗАНИЯ НА КОЭФФИЦИЕНТ УКРОЧЕНИЯ СТРУЖКИ

Станок _____

Геометрия резца _____

Обрабатываемый материал _____

Инструментальный материал _____

№ эксперимента	Диаметр обрабатываемой поверхности D_0 , мм	Диаметр обработанной поверхности D , мм	Глубина t , мм	Подача S , мм/об	Частота вращения n , об/мин	Скорость V , м/мин	Коэффициент укорочения стружки K_L
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

Протоколы к практическому занятию №2

ИССЛЕДОВАНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКЕ

№	Скорость резания V , м/мин	Подача на оборот S_o , мм/об	Глубина резания t , мм	R_a , мкм	R_z , мкм
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					

№	Главный угол в плане φ	Вспомо- гатель- ный угол в плane φ_1	Радиус при вершине R , мм	R_a , мкм	R_z , мкм
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					

ПРИЛОЖЕНИЕ 6

Протоколы к практическому занятию №3

ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛОВЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ПРИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКЕ С ПРОДОЛЬНОЙ ПОДАЧЕЙ

№	Скорость резания V , м/мин	Подача на оборот S_o , мм/об	Глубина резания t , мм	P_z , Н	P_y , Н	P_x , Н
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						

№	Главный угол в плане ϕ	Передний угол γ	Угол наклона главной режущей кромки λ	P_z , Н	P_y , Н	P_x , Н
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						

ПРИЛОЖЕНИЕ 7

Протоколы к практическому занятию №4

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ОБРАБОТКЕ РЕЗАНИЕМ

Температура на передней поверхности										
C_γ V, S_o, t										

Температура в заготовке										
$D_{\text{заг}}$ V, S_o, t										

Учебное издание

ТАБАКОВ Владимир Петрович
САГИТОВ Дамир Ильдарович

**ПРОЦЕССЫ И ОПЕРАЦИИ
ФОРМООБРАЗОВАНИЯ**

Практикум по лабораторным работам
и практическим занятиям

Редактор М.В. Теленкова
Подписано в печать 17.07.2015. Формат 60×84/16.
Усл. печ. л. 3,49. Тираж 20 экз. Заказ 623.

Ульяновский государственный технический университет
432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, д. 32.

ИПК «Венец» УлГТУ, 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, д. 32.