

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«КАЛИНИНГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

С. Б. Перетятко, Б. П. Борисов

ПРОЦЕССЫ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ И ИНСТРУМЕНТ

Учебно-методическое пособие по выполнению лабораторных работ для
студентов бакалавриата по направлению подготовки
15.03.01 Машиностроение

Калининград
Издательство ФГБОУ ВО «КГТУ»
2024

УДК 621.76

Рецензенты:

кандидат технических наук, доцент Альшевская М.Н.

Перетятко, С. Б.

Процессы формообразования и инструмент: учеб. -методич. пособие по выполнению лабораторных работ для студ. бакалавриата по напр. подг. 15.03.01 Машиностроение / С. Б. Перетятко, Б. П. Борисов. – Калининград: Издательство ФГБОУ ВО «КГТУ», 2024. – 138 с.

В учебно-методическом пособии изложена методика проведения лабораторных работ по ряду разделов дисциплины «Процессы формообразования и инструмент». Лабораторные работы дополняются практическими занятиями, позволяющими получить студентам навыки практических расчётов, связанных с определением статических и кинематических углов резания, с размерным износом инструмента, с оптимизацией режимов резания. Каждая работа содержит теоретический материал, необходимый для её выполнения, варианты заданий, контрольные вопросы.

Табл. 18, рис. 75, список лит. 8 наименований

Учебно-методическое пособие рассмотрено и одобрено кафедрой Инжиниринга технологического оборудования ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет» 20 февраля 2024 г., протокол № 5

Учебно-методическое пособие рекомендовано к изданию в качестве локального электронного методического материала для использования в учебном процессе методической комиссией Института агроинженерии и пищевых систем ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет» 30 апреля 2024 г., протокол № 4

УДК 621.76

© Федеральное государственное
бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Калининградский государственный
технический университет», 2024 г.
© Перетятко С. Б., Борисов Б. П., 2024 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
Методические указания к проведению лабораторных занятий	6
Техника безопасности при выполнении лабораторных работ	7
Лабораторная работа № 1. Измерение геометрических параметров токарных резцов в инструментальной системе координат	8
Лабораторная работа № 2. Расчет статических и кинематических углов резания	20
Лабораторная работа № 3. Изучение процесса стружкообразования	33
Лабораторная работа № 4. Исследование шероховатости обработанной поверхности при фрезеровании одиночными резцами при фрезеровании одиночным резцом	45
Лабораторная работа № 5. Исследование геометрических параметров спирального сверла в статической и кинематической системах коорди- нат	57
Лабораторная работа № 6. Исследование функциональной взаимосвязи скорости резания от стойкости резцов при точении	77
Лабораторная работа № 7. Определение зависимости размерного износа резца от пути резания	90
Лабораторная работа № 8. Расчет погрешности обработки при точении от размерного износа резца и определение его периода стойкости	105
Лабораторная работа 9. Исследование силовых зависимостей при точе- нии	114
Лабораторная работа № 10. Оптимизация режимов резания	123
Список литературы	137

ВВЕДЕНИЕ

Изучение дисциплины «Процессы формообразования и инструмент», студентами, обучающимися по направлениям подготовки 15.03.01 Машиностроение, сопровождается проведением лабораторного практикума.

Целью дисциплины «Процессы формообразования и инструмент» является формирование знаний по кинематике, динамике, термодинамике формообразования поверхностей резанием и основным видам режущих инструментов для различных методов обработки деталей машин.

Также в процессе изучения студенты получают знания об основных понятиях в области процессов формообразования, принципов выбора инструмента, правил использования стандартов, а также проводится практическая подготовка студентов к использованию нормативной документации, соблюдению действующих норм, правил и стандартов, решения задач по выбору процессов формообразования и соответствующего инструмента в машиностроительном производстве.

Задачами изучения дисциплины являются:

- приобретение студентами представлений о процессах формообразования и инструменте в области машиностроения;
- формирование понимания студентами основных положений в области процессов формообразования и выбора соответствующего инструмента;
- развитие умения выполнения и чтения чертежей деталей узлов машин и сборочных чертежей, умения выбирать процессы формообразования поверхностей деталей и выбирать соответствующий инструмент в зависимости от точности геометрических размеров детали и заданных требований к ней.

Целью лабораторного практикума является познание физической сущности процессов формообразования, методов и средств выбора инструмента, влияющих на точность изготовления деталей с заданными требованиями к поверхностям. Задачи лабораторного практикума: глубокое усвоение лекционного курса, развитие навыков самостоятельного научного исследования, а также овладение методикой выбора инструмента.

Лабораторные занятия способствуют получению умений и навыков для использования их в дальнейшей профессиональной деятельности. После изучения курса и выполнения лабораторных работ студент должен:

уметь:

- выбирать оптимальный метод формообразования резанием для конкретной технологической операции, обеспечивающий максимальную производительность при заданном качестве обработки и уровне экономичности;
- назначать инструментальный материал и метры лезвия режущих инструментов исходя из требований производительности, качества обработанной поверхности, экономической эффективности;
- обеспечивать технологичность изготовления деталей машин в части инструментального оснащения технологических процессов; в том числе и автоматизированных;

– квалифицированно использовать справочную литературу, стандарты и другие нормативные документы по резанию материалов, режущему инструменту и методам формирования резанием;

владеть:

– навыками выбора режущего инструмента по нормативной и справочной литературе с назначением геометрических параметров лезвия;

– методиками и приемами контроля и проверки углов заточки на инструменте;

– методикой проектирования простых фасонных инструментов.

Методические указания к каждой лабораторной работе включают теоретические сведения о данном процессе, описание лабораторной установки, указания по организации работы, по технике работы и форме записи результатов. Приведены методика обработки полученных данных, порядок оформления работы и ее защиты. Прежде чем приступить к выполнению работы, студенты должны изучить методические указания к ней, ознакомиться со схемой установки, подготовить форму для записи результатов измерений, ответить на контрольные вопросы и затем начинать проведение работы.

Обработка материалов резанием, со снятием с заготовки припуска в виде стружки, является одной из самых распространённых операций в машиностроении. Широкое использование современного автоматизированного металлообрабатывающего оборудования требует всё более глубокого, научно обоснованного, подхода в изучении процессов, происходящих при резании. Сложность этих процессов, их комплексный и взаимообусловленный характер до сих пор оставляют широкое поле исследований в различных научных направлениях. Повышение эффективности обработки материалов резанием является важным резервом повышения эффективности машиностроительного производства.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ПРОВЕДЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ ЗАНЯТИЙ

Содержание лабораторного практикума

Лабораторный практикум охватывает основные разделы курса и включает десять работ. На выполнение каждой работы требуется 3 ч.

Настоящий практикум позволяет выполнить лабораторные работы и без предварительного прослушивания лекций. С этой целью перед каждой работой, посвященной изучению определенного процесса, дается теоретический материал, в котором поясняются сущность и области применения процесса, а также излагаются основные теоретические положения и основы расчета, необходимые для выполнения работы.

Каждая лабораторная работа описана по единому плану: цель работы, задачи, теоретическая часть, оборудование, приборы, инструменты, порядок проведения работы, порядок оформления отчета, контрольные вопросы. Для записи экспериментальных и расчетных данных приводятся формы протоколов испытаний. В конце каждой работы даны контрольные вопросы для самоконтроля и закрепления изучаемого материала.

Порядок выполнения лабораторных работ

Студент в результате подготовки к выполнению работы должен усвоить назначение, сущность и особенности изучаемого процесса; цель работы; физический смысл процесса, методику выполнения работы.

По схеме в практикуме студент должен разобраться в устройстве и работе средства измерения, в назначении отдельных его элементов, выяснить назначение, принцип работы и порядок проведения измерений.

Перед началом работы каждый студент подвергается опросу преподавателем для выяснения степени его теоретической подготовки. Студенты, допущенные к работе, приступают к ее выполнению в соответствии с методикой, изложенной в практикуме.

Замеры всех необходимых параметров (величин) каждый студент в процессе работы записывает в подготовленный протокол. Со всеми вопросами, возникающими в процессе работы, студент должен сразу же обращаться к преподавателю.

Отчет по выполненной работе должен содержать: цель работы, задачи, схему установки и краткое описание ее работы, физический смысл определяемых величин, расчеты, необходимые графики, диаграммы, таблицы, схемы, анализ полученных данных, выводы по результатам работы.

Без сдачи оформленного отчета по выполненной работе студент не допускается к выполнению очередной работы.

Каждую лабораторную работу (по мере выполнения) студент защищает в течение семестра, а в конце семестра при успешной защите всех работ получает зачет по лабораторному практикуму.

ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

При работе в лаборатории необходимо строго соблюдать правила охраны труда и техники безопасности. Без инструктажа по технике безопасности и проверки знаний студенты к выполнению работы не допускаются.

Общие требования техники безопасности. Выполнение лабораторных работ, проводятся только в присутствии преподавателя или заведующего лабораторией. Работа, с включенными приборами и аппаратами, одного человека в помещении лаборатории запрещается. Студенты должны помнить, что в лаборатории можно столкнуться со следующими опасностями: электрическим током, статическим электричеством, падением тяжелого предмета и др.

Требования безопасности перед началом работы. Перед проведением лабораторных работ преподаватель проверяет наличие заземления измерительных приборов и установок. Студенты могут приступать к выполнению работ только с разрешения преподавателя. Перед началом работ необходимо проверить инструмент, который должен всегда находиться в исправном состоянии.

Требования безопасности во время работы. Не оставлять рабочее место без разрешения преподавателя. Размещать приборы, оборудование таким образом, чтобы исключить их падение или опрокидывание. При проведении работ не допускать предельных нагрузок измерительных приборов.

Требования безопасности в аварийных ситуациях. При обнаружении неисправности электроинструмента, перерыва в подаче электроэнергии и других непредвиденных обстоятельствах, выключить все электроприборы. В случае поражения электрическим током необходимо: отключить оборудование лаборатории от питания общим рубильником, оказать доврачебную медицинскую помощь пострадавшему, вызвать врача для оказания медицинской помощи.

В случае возникновения пожара: произвести отключение питания лаборатории, вызвать пожарную охрану по телефону 01; с сотового телефона 112. При тушении пожара применять только углекислотные огнетушители.

Требования безопасности по окончании работы. По окончании работы выключить все измерительные приборы и устройства. Рабочее место сдать преподавателю. Обо всех нарушениях в работе устройств сообщить преподавателю.

Лабораторная работа № 1

Измерение геометрических параметров токарных резцов в инструментальной системе координат

1. Цель и задачи работы

Цель работы: получение практических умений и навыков работы с инструментальной системой координат и измерением в этой системе геометрических параметров резцов различного типа.

В задачи работы входит: ознакомление с методикой и инструментарием при измерении геометрических параметров резцов; получение практических навыков работы с измерительными инструментами и приспособлениями; получение навыков оформления эскизов режущей части резцов с указанием необходимых геометрических параметров в инструментальной системе координат.

2. Инструментальная система координат и геометрические параметры токарного резца

2.1 Координатные плоскости при резании материалов

Для измерения и расчета геометрических параметров инструмента используется система координатных плоскостей (рисунок 1.1) (см. так же ГОСТ 25762-83)

Основная плоскость P_v – координатная плоскость, проведенная через рассматриваемую точку режущей кромки перпендикулярно направлению скорости главного или результирующего движения в этой точке.

Плоскость резания P_n – координатная плоскость, касательная к режущей кромке в рассматриваемой точке и перпендикулярная к основной плоскости. Если режущая кромка является прямолинейной (рисунок 1.1), она целиком лежит в плоскости резания.

Главная секущая плоскость P_τ – координатная плоскость, перпендикулярная к линии пересечения основной плоскости и плоскости резания.

Кроме трех вышеперечисленных основных плоскостей в практике инструментального производства и металлообработки используется рабочая P_s и нормальная секущая плоскость P_H

Рабочая плоскость P_s – это плоскость, содержащая одновременно вектор скорости резания V и вектор подачи V_s и перпендикулярная основной плоскости.

Нормальная секущая плоскость P_H – это плоскость перпендикулярная режущей кромке в рассматриваемой точке.

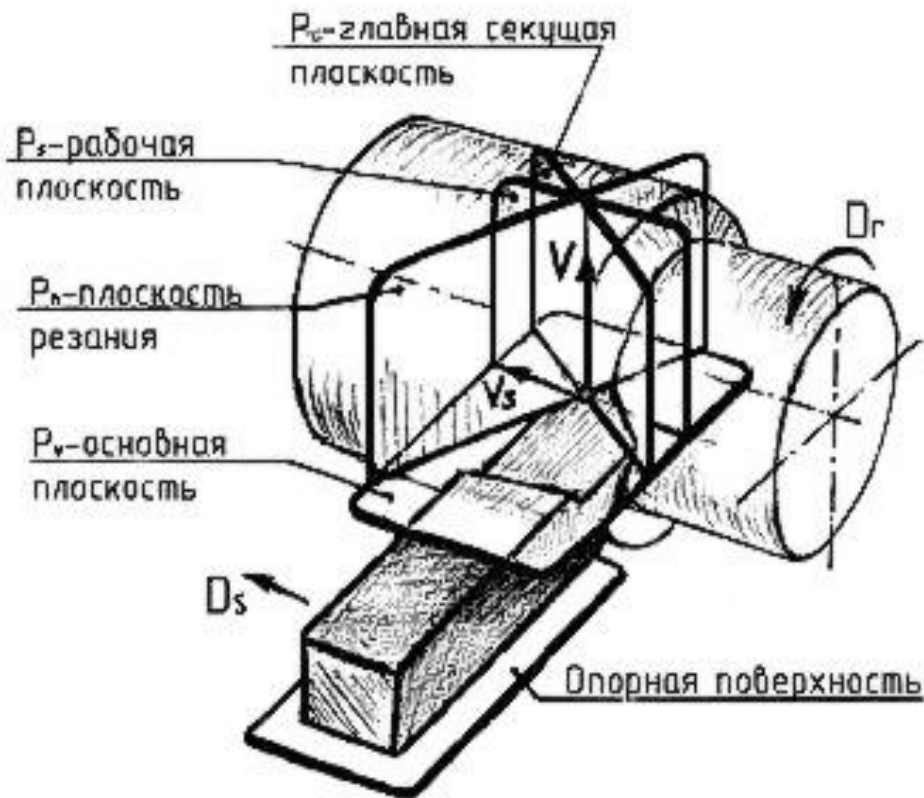


Рисунок 1.1. Координатные плоскости прямого проходного реза

2.2 Инструментальная система координат

На стадии проектирования инструмента, а также в процессе его изготовления, необходимо выбрать такую систему координат, которая позволила бы составить наиболее рациональный чертеж инструмента и обеспечила бы точное изготовление и контроль его геометрических параметров. Такая система координат называется инструментальной. Система включает в себя три координатные плоскости: $P_{ви}$, $P_{ни}$, $P_{ти}$. Здесь индекс «и» в обозначении плоскостей говорит о том, что плоскости относятся к инструментальной координатной системе.

Основная плоскость $P_{ви}$ перпендикулярна принятому для данного инструмента направлению скорости главного движения V . Для проходных токарных резцов принято, что вектор V направлен перпендикулярно к конструкторской установочной базе, то есть перпендикулярно опорной поверхности (1.2, а). Для долбежных и фасонных призматических резцов вектор V считают параллельным установочной базе (1.2, б). У дисковых фасонных резцов, сверл, зенкеров, разверток, фрез вектор V направляют по касательной к траектории вращательного движения (1.2, в).

Что касается плоскости резания P_n и главной секущей плоскости P_τ , то они ориентированы относительно основной плоскости P_v так, как указано в п. 2.1.

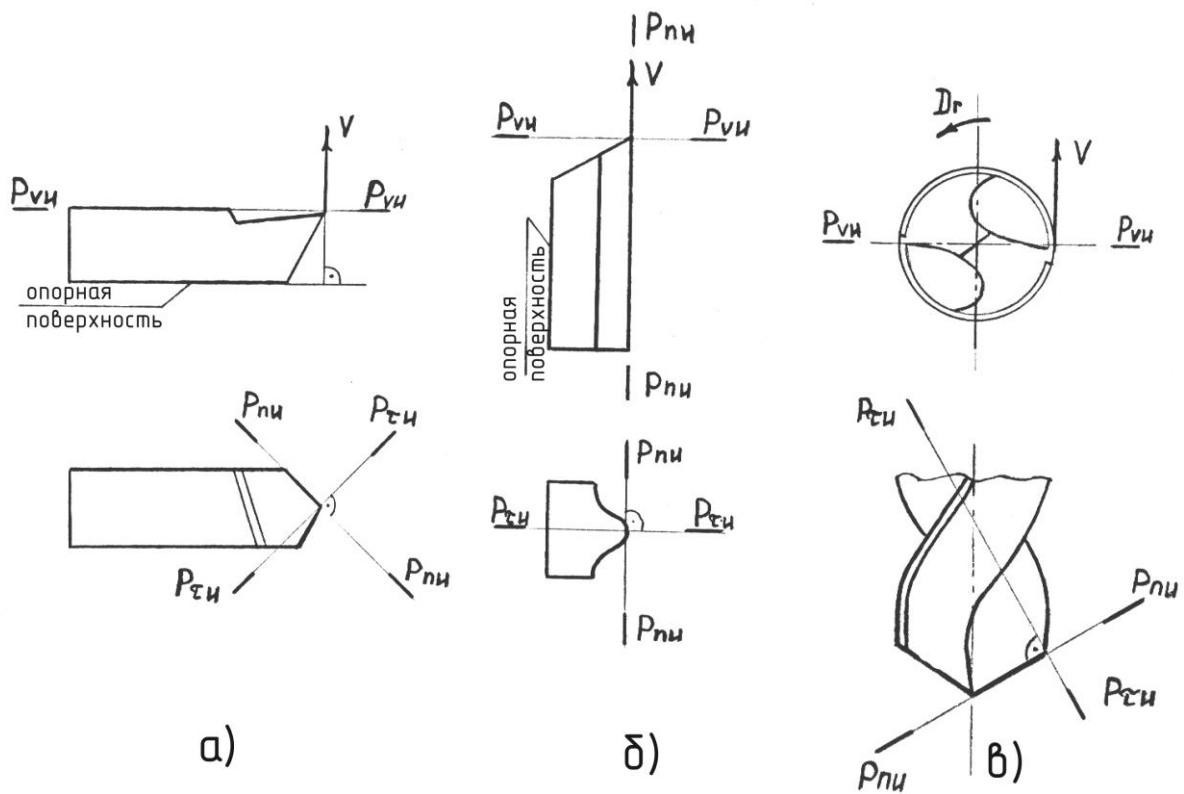


Рисунок 1.2. Инструментальная система координат:
а – проходной резец; *б* – фасонный призматический резец; *в* – сверло

Таким образом, инструментальная система координат (ИСК) в целом ориентирована относительно геометрических элементов инструмента, принятых за базу: для резцов с прямоугольным сечением державки – это опорная поверхность, для осевого инструмента – ось вращения, материализованная цилиндрической или конической поверхностью хвостовика.

Геометрические параметры инструмента в инструментальной системе координат называются инструментальными, обозначаются на чертежах без индекса, например γ , но и могут иметь в своём обозначении индекс «и». Например: $\gamma_{и}$ – инструментальный передний угол.

2.3 Геометрические параметры резца в инструментальной системе координат

Резец состоит из рабочей части (головка) и крепежной части (державка, корпус) (рисунок 1.3).

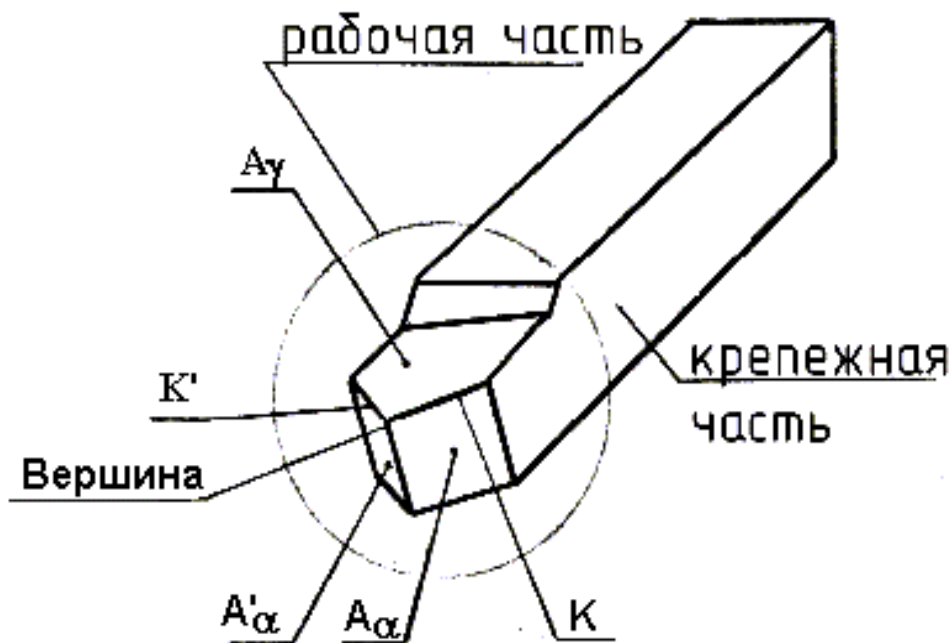


Рисунок 1.3. Конструктивные элементы резца

Рабочая, режущая, часть резца по сути представляет собой режущий клин (лезвие) и включает в свой состав ряд элементов: A_γ – передняя поверхность – по ней сходит стружка; A_α – главная задняя поверхность, контактирует с поверхностью резания на заготовке; A'_α – вспомогательная задняя поверхность, обращена к обработанной поверхности на заготовке; K – главная режущая кромка – пересечение передней поверхности с главной задней; K' – вспомогательная режущая кромка – пересечение передней поверхности с вспомогательной задней поверхностью; вершина режущего клина (лезвия) – место сопряжения главной и вспомогательной режущих кромок.

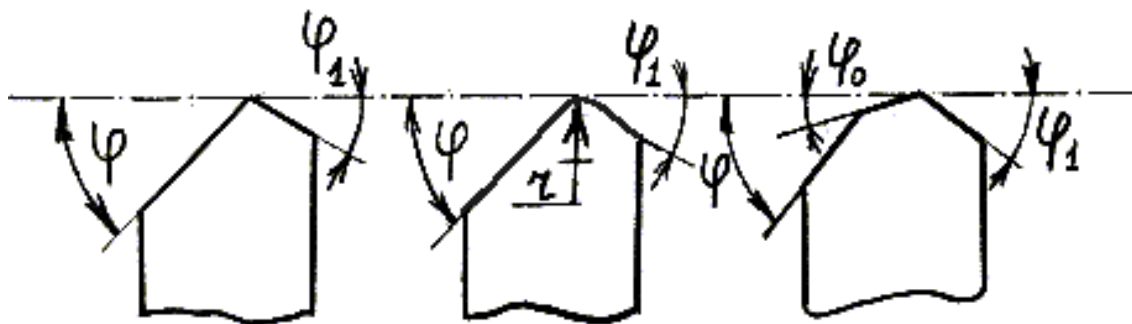


Рисунок 1.4. Виды сопряжения главной и вспомогательной режущих кромок

Главная и вспомогательная режущие кромки могут сопрягаться не только в точке, но по радиусу или посредством переходной режущей кромки (рисунок

1.4). Геометрические параметры прямого проходного резца в инструментальной системе координат представлены на рисунке 1.5.

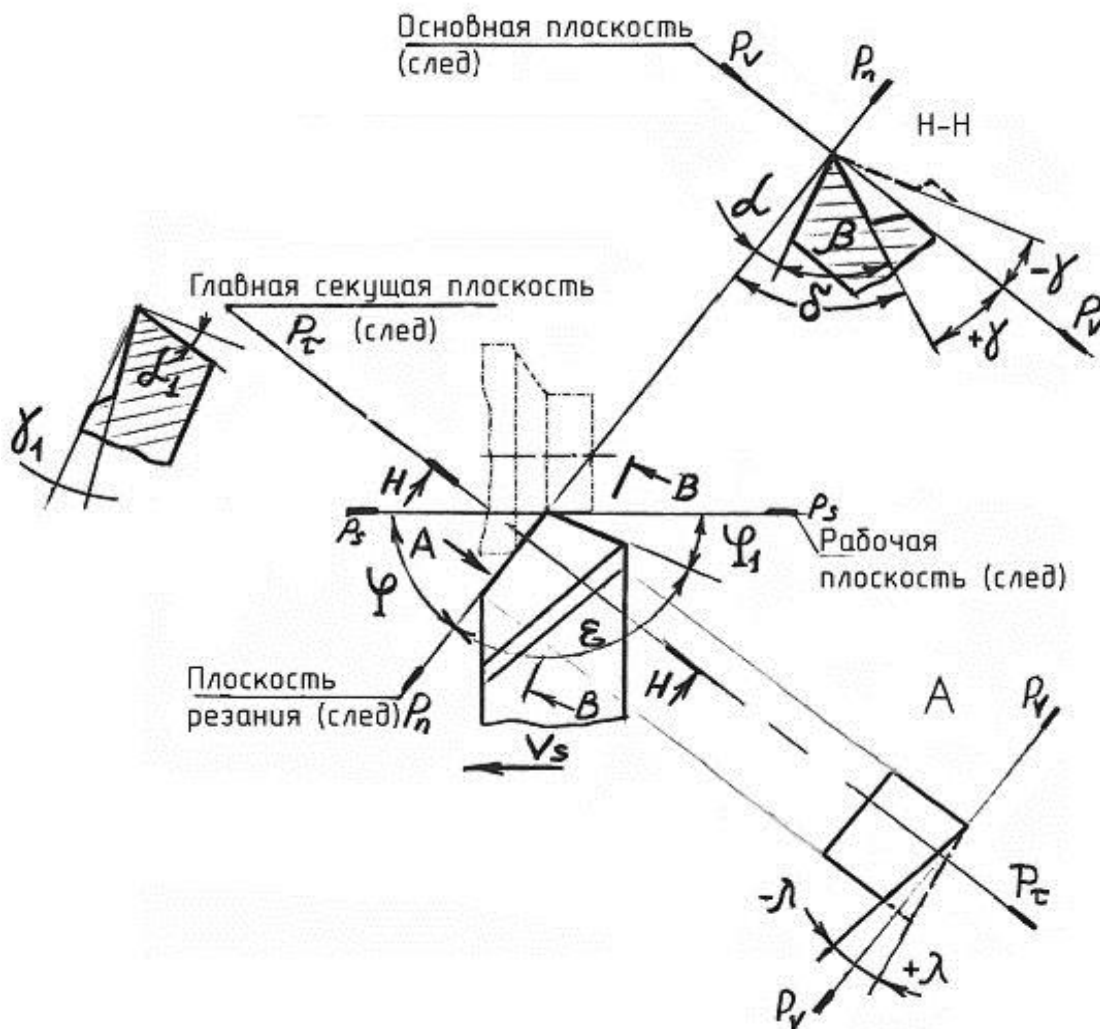


Рисунок 1.5. Геометрические параметры резца в инструментальной системе координат

Различают главные углы и вспомогательные углы. Главные углы задают и измеряют в главной секущей плоскости P_τ , (сечение Н-Н, перпендикулярное проекции главной режущей кромки на плоскость чертежа). К ним относятся: главный задний угол α – угол между главной задней поверхностью и плоскостью резания $P_n - P_n$; передний угол γ – угол между передней поверхностью и основной плоскостью резания P_v ; угол заострения β – угол между передней и задней поверхностями; угол резания δ – угол между передней поверхностью и плоскостью резания.

При положительных значениях γ , т. е. $+\gamma$, между углами существуют следующие зависимости: $\alpha + \beta + \gamma = 90^\circ$; $\alpha + \beta = \delta$ (рисунок 1.5). При отрицательном переднем угле $-\gamma$ имеем $\delta > 90^\circ$.

Вспомогательные углы рассматриваются во вспомогательной секущей плоскости – сечение В-В, перпендикулярное проекции вспомогательной режущей кромки на плоскость чертежа. К ним относятся: вспомогательный задний угол α_1 – угол между вспомогательной задней поверхностью и плоскостью, проходящей через вспомогательную режущую кромку перпендикулярно основной плоскости P_v ; вспомогательный передний угол γ_1 – угол между передней поверхностью и основной плоскостью.

В основной плоскости P_v (совпадает с плоскостью чертежа) задаются и измеряются углы в плане. Главный угол в плане φ – угол между плоскостью резания и рабочей поверхностью или, что тоже самое, угол между проекцией главной режущей кромки на основную плоскость и направлением подачи. Вспомогательный угол в плане φ_1 – угол между проекцией вспомогательной режущей кромки на основную плоскость и направлением подачи. Угол при вершине в плане β – угол между проекциями главной и вспомогательной режущих кромок на основную плоскость. Из рисунка 1.5 видно, что $\varphi + \varepsilon + \varphi_1 = 180^\circ$.

В плоскости резания P_n задается и измеряется угол наклона главной режущей кромки λ – угол между главной режущей кромкой и основной плоскостью P_v . Угол λ может быть положительным (вершина резца – низшая точка кромки), нулевым (кромка параллельна P_v), и отрицательным (вершина резца – наивысшая точка кромки).

Иногда, например, при заточке, необходимо задавать и контролировать углы в сечении (X–X), параллельном рабочей плоскости P_s (поперечные углы, так как рассматриваются в поперечном сечении резца) и в сечении (Y–Y), перпендикулярном рабочей плоскости (продольные углы) (рисунок 1.6).

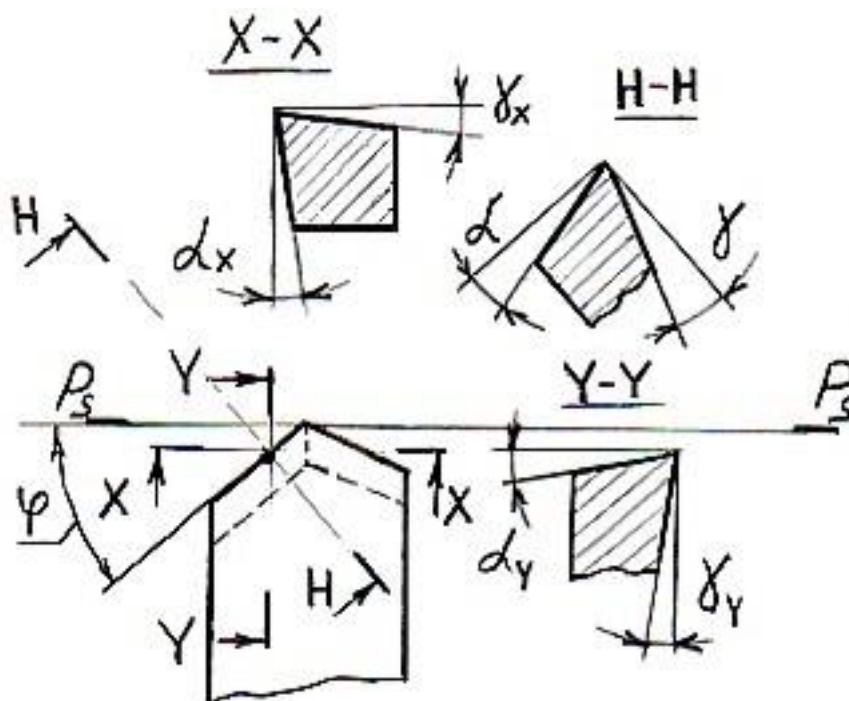


Рисунок 1.6. Углы резца в плоскости, параллельной $P_s - P_s$ и в плоскости, перпендикулярной $P_s - P_s$

Без учета угла наклона режущей кромки λ можно считать:

$$tg\gamma_y = tg\gamma \cdot \cos\varphi; \quad (1.1) \quad tg\gamma_x = tg\gamma \cdot \sin\varphi; \quad (1.2)$$

$$tg\alpha_y = \frac{tg\alpha}{\cos\varphi}; \quad (1.3) \quad tg\alpha_x = \frac{tg\alpha}{\sin\varphi}. \quad (1.4)$$

3 Оборудование, приборы, инструменты

3.1 Токарные резцы:

- проходной упорный;
- проходной отогнутый;
- подрезной
- отрезной;
- расточной, для сквозных отверстий;
- расточной, для глухих отверстий.

3.2 Угломер настольный.

3.3 Угломер универсальный.

3.4 Штангенциркуль.

3.5 Линейка металлическая.

4 Порядок выполнения работы

4.1 Измерить с помощью штангенциркуля, линейки, настольного и универсального угломеров геометрические параметры резца. Каждому студенту или бригаде студентов преподавателем выдается резец определенного типа.

Схема измерения углов α и γ представлена на рисунке 1.7. При этом кронштейн с сектором 1 поворачивают и фиксируют на колонке таким образом, чтобы плоскость ножа 2 лежала в секущей плоскости резца, то есть перпендикулярно главной режущей кромке. При измерении α_1 и γ_1 плоскость ножа должна быть перпендикулярна вспомогательной режущей кромке. При измерении λ плоскость ножа лежит в плоскости резания, по сути, в той же плоскости, что и главная режущая кромка.

Измерение главного Φ и вспомогательного Φ_1 углов в плане осуществляется с помощью универсального угломера (рисунок 1.8).

Измерение геометрических параметров резца возможно так же с помощью специальных шаблонов. Размеры державки (длина, ширина, высота) измеряются штангенциркулем и линейкой. Результаты измерений занести в таблицу (образец – таблица 1.1).

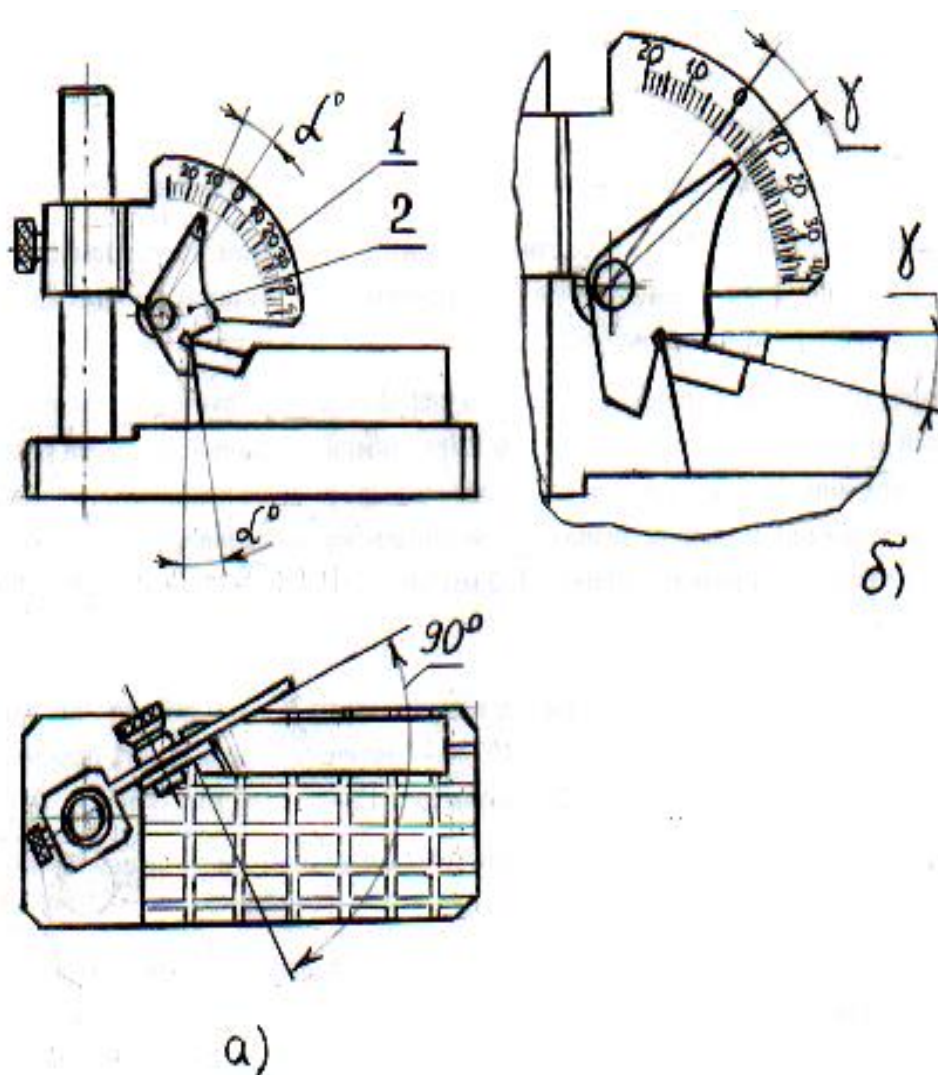


Рисунок 1.7. Схема контроля настольным угломером углов заточки резца:
a – измерение заднего угла α ; *б* – измерение переднего угла γ

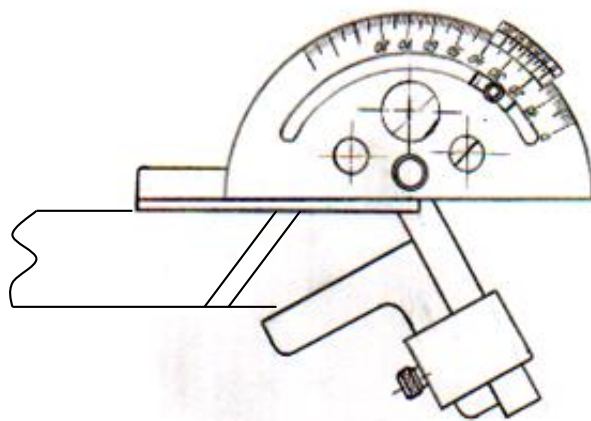


Рисунок 1.8. Измерение углов в плане

Таблица 1.1. Результаты измерения геометрических параметров резца

Наименование резца	Материал режущей части	L	B	H	α°	α_y°	α_1°	$\alpha_1^{\circ'}$	γ°	φ°	φ_1°	λ°

5 Оформление отчета

В отчёте необходимо представить следующее:

5.1 Наименование работы. Цель и задачи.

5.2 Индивидуальное задание (тип резца, выданного для измерения геометрических параметров).

5.3 Результаты измерений геометрических параметров резца (таблица 1.1).

5.4 Эскиз резца согласно индивидуальному заданию (образцы оформления эскизов представлены в таблице 1.2). На эскизе указать координатные плоскости (следы), обозначить все сечения, проставить конкретные значения измеренных геометрических параметров (пример обозначения плоскостей – рисунок 1.5). Под эскизом указать обозначение материала рабочей (режущей) части резца и материала державки. Дать расшифровку обозначений.

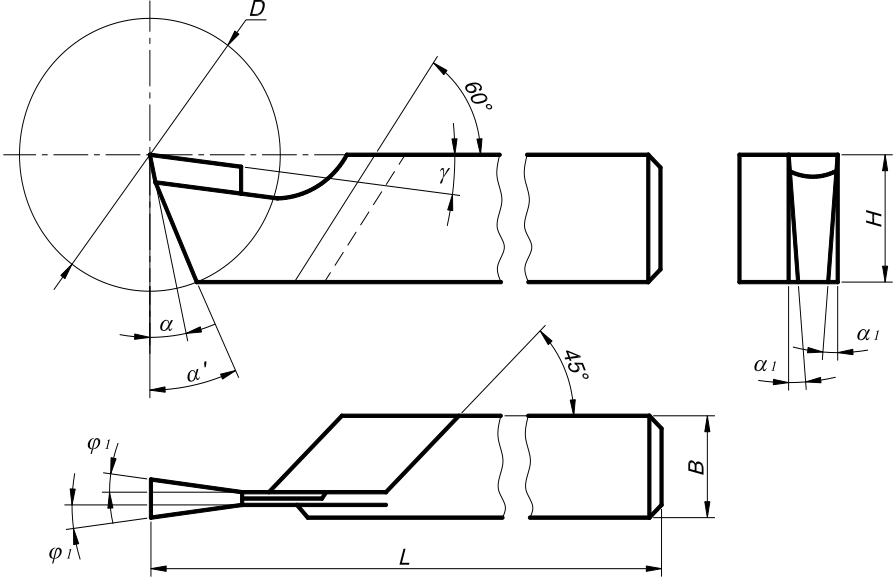
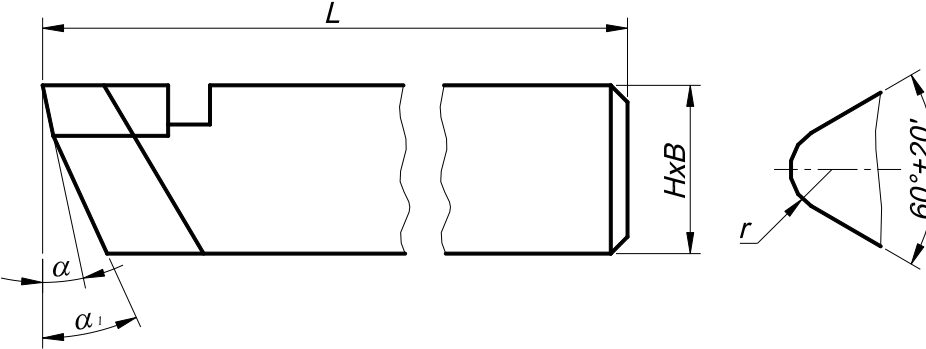
Дать формулировку для углов α , β , α_1 , γ_1 , φ , φ_1 , λ (см. п. 2.3).

Таблица 1.2. Примеры оформления эскизов токарных резцов

Наименование, тип, конструктивные особенности	Эскиз
Резцы токарные проходные отогну-	

Наименование, тип, конструктивные особенности	Эскиз
<p>тые с $\varphi = 45^\circ$ для обтачивания по наружному диаметру, подрезки торцов, расточки коротких отверстий больших диаметров; $\gamma = 0$ или 10° (ГОСТ 18877-73*) Пластины типов 01; 02; 61; 62 (ГОСТ 25395-82)</p>	
<p>Резцы токарные проходные прямые для обтачивания, подрезки торцов, расточки, $\gamma = 0$ или 10°; $\varphi = 45, 60$ или 75°; $\varphi_1 = 45, 30$ или 15° соответственно (ГОСТ 18878-73*) Пластины типов 07, 67 (ГОСТ 25426-82)</p>	

Наименование, тип, конструктивные особенности	Эскиз
<p>Резцы токарные подрезные, отогнутые для обтачивания ступенчатых деталей, деталей с большим отношением длины к диаметру, подрезки торцов, буртиков; $\gamma = 0$ или 10° (ГОСТ 18880-73*)</p> <p>Пластины типов 06; 66 (ГОСТ 25397-82)</p>	
<p>Резцы токарные расточные для растачивания глухих отверстий диаметром $D = 10-110$ мм (ГОСТ 18883-73*); $\varphi = 95^\circ$ для резцов типа 1</p> <p>Пластины типов 06;66 (ГОСТ 25379-82)</p>	

Наименование, тип, конструктивные особенности	Эскиз
<p>Резцы токарные отрезные для резки цилиндрических заготовок (ГОСТ 18884-73)</p> <p>Диаметр резки $D_{\max} = 30 \dots 135$ мм (в зависимости от размера резцов)</p> <p>Пластины типа 13 (ГОСТ 17163-82)</p>	
<p>Резцы токарные резьбовые (ГОСТ 18885-73)</p> <p>Для нарезания наружных резьб: метрических с шагом $0,5 \dots 6$ мм.</p> <p>Пластины типа II (ГОСТ 25398-82)</p>	

6 Контрольные вопросы

6.1 Дайте формулировку координатных плоскостей и укажите, каким образом они ориентированы относительно вектора скорости резания и инструмента. Представьте соответствующий эскиз.

6.2 Отобразите на упрощённых эскизах инструментальную систему координат для: а) проходного резца; б) фасонного призматического резца; в) отрезного резца; г) расточного резца.

6.3 Назовите конструктивные элементы резца, покажите их на натуральных образцах резцов различного типа (проходной отогнутый, проходной прямой, подрезной, расточной, отрезной).

6.4 Дайте формулировку инструментальной системы координат. Используя натуральный образец проходного токарного резца, покажите положение координатных плоскостей и основные инструментальные параметры резца; то же самое выполнить для отрезного резца.

6.5 Составьте эскиз рабочей части инструмента и покажите на нем основные геометрические параметры и координатные плоскости: для проходного отогнутого резца; проходного прямого резца; расточного резца; отрезного резца; подрезного резца.

6.6 Дайте формулировку геометрических параметров резца α , γ , β , α_1 , γ_1 , φ , φ_1 , λ .

6.7 Составьте эскиз и обозначьте поперечные и продольные задние и передние углы.

Лабораторная работа № 2

Расчет статических и кинематических углов резания

1 Цель и задачи

Цель – получение практических умений и навыков расчета кинематических и статических углов резания при токарных операциях.

Задачи: уяснить степень влияния погрешности установки резца относительно оси заготовки на статические задние и передние углы; уяснить степень влияния подачи и скорости резания на кинематические (действительные) задние углы.

2 Статическая и кинематическая системы координат

При установке инструмента на станок, а также непосредственно в процессе резания, его фактические геометрические параметры, например, передний и задний угол, могут существенно отличаться от исходных значений, полученных при изготовлении, то есть в инструментальной системе координат.

Для правильной оценки этих изменений и их расчета в практике производства и эксплуатации инструмента кроме инструментальной используется также статическая и кинематическая системы координат.

Статическая и кинематическая системы координат, также, как и инструментальная система, включают в свой состав три координатные плоскости: основную плоскость P_v , плоскость резания P_n , главную секущую плоскость P_\square . Однако ориентация в пространстве этих плоскостей имеет свои особенности по отношению к инструментальной системе. Координатные плоскости и инструментальная система координат рассмотрены в лабораторной работе № 1, п 2.1, 2.2.

2.1 Статическая система координат

В отличие от инструментальной системы координат (смотри лаб. работу № 1), которая «привязана» к «договорному» направлению вектора скорости резания, статическая система учитывает фактическое направление вектора \mathbf{V} при установке инструмента на станок. При этом положение вектора \mathbf{V} по отношению к базовым поверхностям инструмента может отличаться от принятого в инструментальной системе, что существенным образом влияет на геометрические параметры режущего лезвия, прежде всего на передний и задний углы. В конечном итоге это ведет к изменению условий и результатов резания.

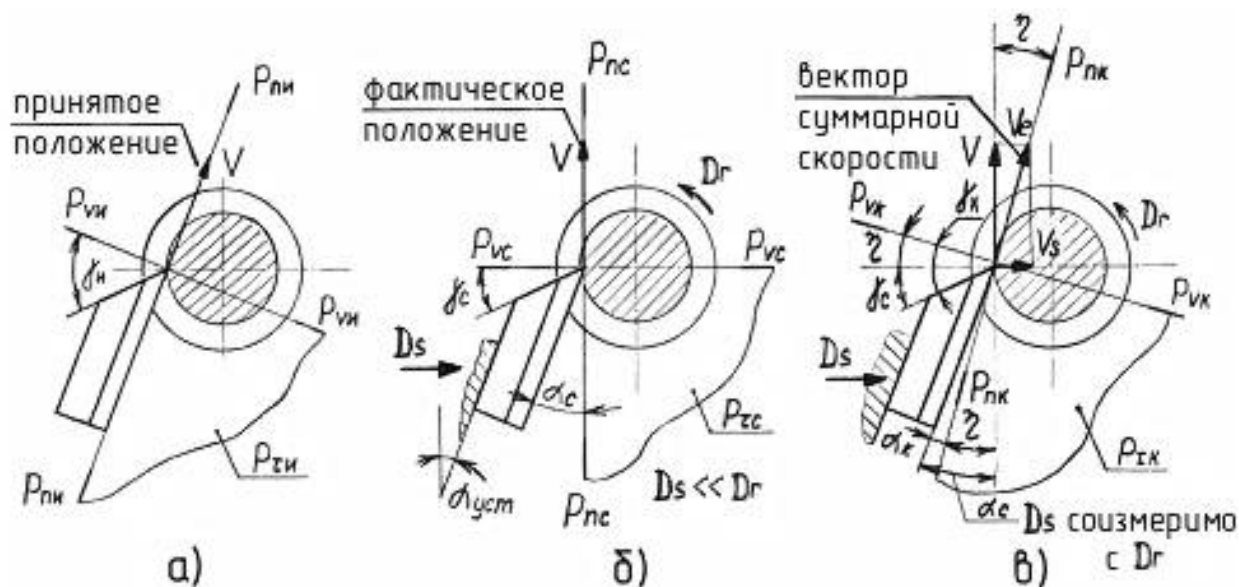


Рисунок 2.1. Координатные плоскости и системы координат при точении призматическим фасонным резцом:

a, б, в – инструментальная, статическая, кинематическая системы координат соответственно

Например, рисунок 2.1, *a* для данного призматического резца в инструментальной системе координат, согласно принятому направлению \mathbf{V} параллельно опорной поверхности, имеем передний инструментальный угол γ_u и задний инструментальный угол $\alpha_u = 0$. При установке резца на станок он закрепляется не вертикально, а под некоторым установочным углом $\alpha_{уст}$, (рисунок 2.1, *б*). При этом вектор скорости резания \mathbf{V} направлен по касательной к траектории, по которой перемещают точки заготовки во вращательном движении, т.е. по касательной к окружности (при всех рассуждениях и расчетах считается, что перемещается инструмент относительно заготовки). Согласно определению (см. работу № 1) основная плоскость P_v должна быть перпендикулярна вектору скорости главного движения, что и отражено в виде ее следа $P_{vc} - P_{vc}$ на вертикальной плоскости (рисунок 2.1, *б*). Остальные плоскости, т.е. P_{nc}, P_{tc} ориентированы по отношению к P_{vc} . В результате имеем статиче-

ский передний угол $\gamma_c < \gamma_{и}$ и статический задний угол $\alpha_c \neq 0$; при этом $\alpha_c = \alpha_{уст}$ (для данного резца).

Таким образом, статическая система координат (ССК) – это прямоугольная система координат с началом в рассматриваемой точке режущей кромки, ориентированная относительно фактического направления вектора скорости резания, которое он имеет в процессе обработки заготовки. Плоскости, входящие в данную систему, и геометрические параметры инструмента, измеряемые в ней, называются статическими и имеют индекс «с».

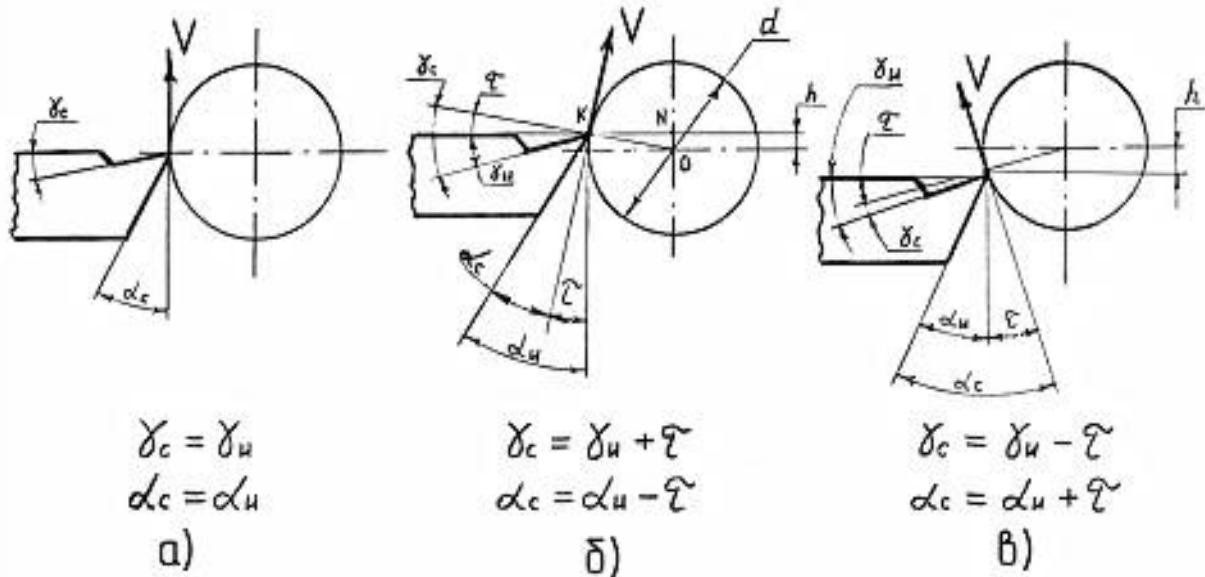


Рисунок 2.2. Влияние установки вершины резца по отношению к оси заготовки на статические углы γ_c и α_c : при наружном точении:

а – вершина на оси центров; б – вершина выше оси; в – вершина ниже оси

Статические углы, в частности γ_c и α_c для токарных резцов, существенно изменяются в зависимости от установки инструмента относительно оси центров токарного станка. Положение инструмента относительно оси центров в этом случае может быть охарактеризовано величиной h и углом τ .

Угол τ определяют из треугольника ОКН (рисунок 2.2, б):

$$\sin \tau = \frac{h}{OK} = \frac{2h}{d}. \quad (2.1)$$

Угол τ определен из условия, что режущая кромка параллельна оси заготовки и главная секущая плоскость $P_{\tau c}$ лежит в плоскости чертежа. Если же режущая кромка будет составлять с осью заготовки некоторый угол φ (главный угол в плане), то с достаточной степенью точности можно считать, что:

$$\operatorname{tg} \tau_{\varphi} = \operatorname{tg} \tau \cdot \cos \varphi \quad (2.2)$$

Тогда:

$$\tau_{\varphi} = \arctg(\operatorname{tg} \tau * \cos \varphi). \quad (2.3)$$

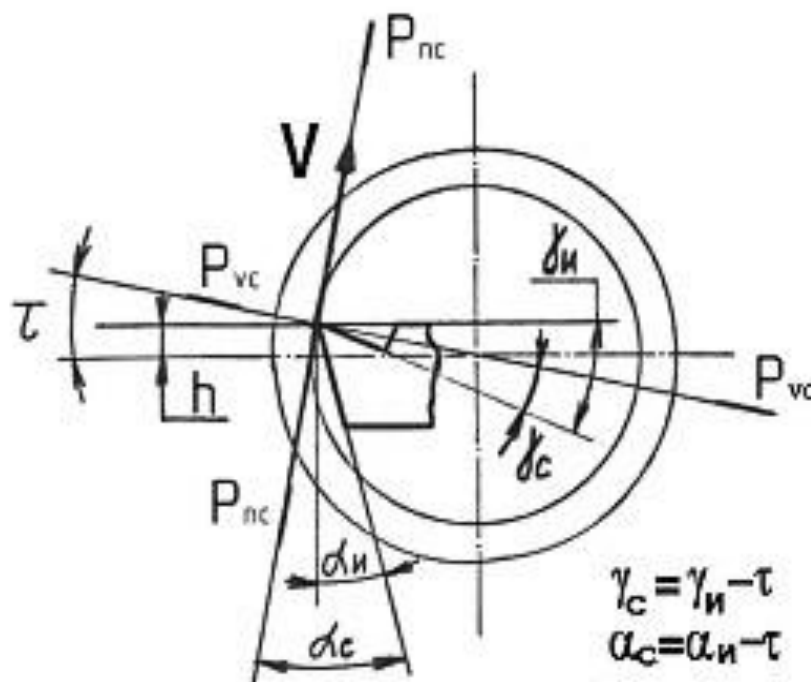


Рисунок 2.3. Статические углы при расточке отверстий

При расточке отверстий углы γ_c и α_c будут изменяться в зависимости от положения вершины резца относительно оси центров противоположным образом по отношению к наружной проточке (рисунок 2.3).

Из рисунков 2.2, 2.3 видно, что за счет величины h можно, не перетачивая инструмент, получать различные значения γ_c и α_c . Этим пользуются на практике. При черновом наружном точении резец устанавливают выше оси центров, принимая $h=(0,02 \dots 0,03)d$. При этом уменьшается сила резания и вибрации инструмента. При растачивании отверстий, при относительно низкой жесткости резца, его вершина опускается за счет прогиба тела резца, что приводит к увеличению диаметра обрабатываемого отверстия. Во избежание этого при тонком чистовом растачивании резец устанавливается выше оси расточки. В большинстве остальных случаев надо стремиться, чтобы h было равно нулю или крайне незначительно. Чем меньше диаметр заготовки, тем больше степень влияния h на характер стружкообразования и качество обработки.

В зависимости от установки резца в горизонтальной плоскости по отношению к оси заготовки статические главный φ_c и вспомогательный φ_{1c} углы в плане могут отличаться от своих инструментальных значений. Например, при проточке фаски проходным отогнутым резцом (рисунок 2.4, а) поворот тела резца в резцедержателе (или вместе с ним) на угол τ вызовет изменение угла в плане и, соответственно, угла самой фаски: $\varphi_c = \varphi_n - \tau$.

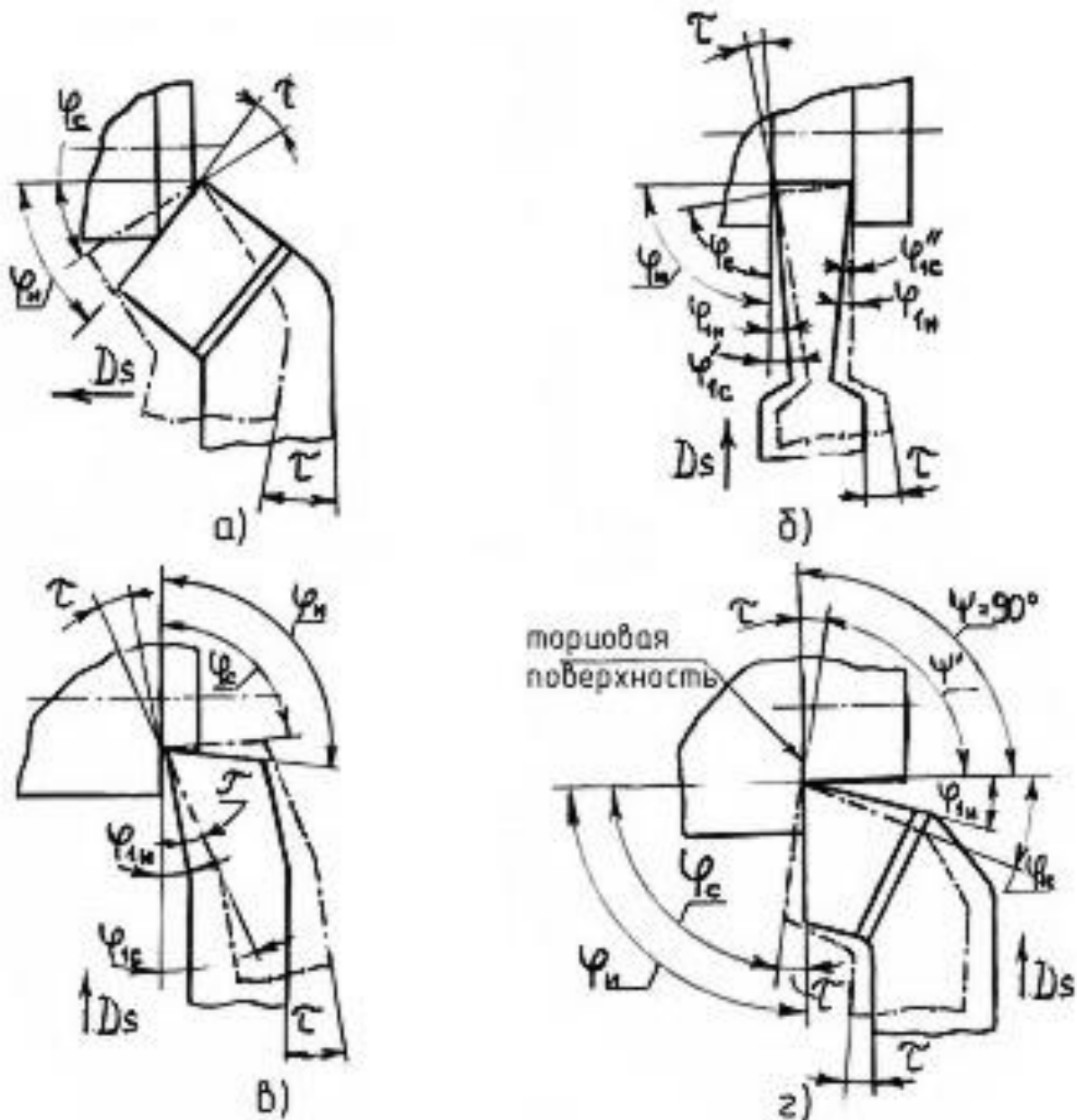


Рисунок 2.4. Влияние установки резца на статические углы в плане при различных видах обработки:

a) проточка фаски проходным отогнутым резцом; *б)* отрезка заготовки отрезным резцом или проточка канавки канавочным резцом; *в)* подрезка торца подрезным резцом; *г)* проточка наружной цилиндрической поверхности проходным упорным резцом с одновременной обработкой торцевой поверхности

При обработке точных фасок или точных коротких конических поверхностей τ выступает как погрешность. С другой стороны, за счет поворота резцедержателя вместе с инструментом, можно резцом, имеющим, например, $\varphi_{и} = 45^\circ$, протачивать фаски, угол которых не равен 45° .

При отрезке заготовки отрезным резцом или прорезке канавки канавочным резцом (рисунок 2.4, б) даже незначительная погрешность установки инструмента, когда $\varphi = 1^\circ \dots 1^\circ 30'$, может привести к тому, что один из вспомогательных углов в плане (на рисунке 2.4, б это угол $\varphi''_{1с}$) может стать равным

нулю или даже примет отрицательное значение. Это вызовет заклинивание резца в канавке, поломку инструмента, производственный брак.

При подрезке торца подрезным резцом (рисунок 2.4, в) поворот инструмента на угол τ , изменяя значение углов в плане, может нарушить нормальный процесс резания. Но, с другой стороны, за счет τ можно корректировать инструментальные значения углов $\varphi_{и}$ и $\varphi_{1и}$, которые, по каким-либо причинам, не удовлетворяют нормальному процессу стружкообразования.

При проточке наружной поверхности проходным упорным резцом (рисунок 2.4, г) часто, одновременно с проточкой цилиндра, обрабатывают и торцовую поверхность. В этом случае неточность установки резца в виде угла τ приведет к браку, так как не будет выдержана, например, заданная перпендикулярность торцовой поверхности к оси заготовки, вместо $\psi = 90^\circ$ имеем

$$\psi' = \psi - \tau \neq 90^\circ.$$

Во всех рассмотренных случаях при значениях погрешности $\pm \tau$ имеем:

$$\varphi_c = \varphi_u \pm \tau ; \quad (2.4)$$

$$\varphi_{1c} = \varphi_{1u} \pm \tau . \quad (2.5)$$

2.2 Кинематическая система координат

Кинематическая система координат (КСК) – прямоугольная система координат с началом в рассматриваемой точке режущей кромки, ориентированная относительно вектора скорости результирующего движение резания:

$$\vec{V}_e = \vec{V} + \vec{V}_s .$$

Так же как и предыдущие, кинематическая система включает в себя три основные плоскости: P_{vk} – кинематическая основная плоскость, перпендикулярная скорости результирующего движения; P_{nk} – кинематическая плоскость резания, перпендикулярная P_{vk} ; $P_{\tau k}$ – кинематическая главная секущая плоскость, перпендикулярная P_{nk} и P_{vk} .

Необходимость использования кинематической системы обусловлено тем, что действительные, кинематические, углы резания, реализуемые в процессе стружкообразования, отличаются от статических углов. Это отличие тем больше, чем больше суммарная скорость резания V_e отличается от скорости главного движения V . Данное отличие характерно тогда, когда скорость подачи V_s соизмерима с V .

Рассмотрим в качестве примера случай поперечного точения (подрезка торца) резцом с $\varphi = 90^\circ$ и $\lambda = 0^\circ$ (рисунок 2.5).

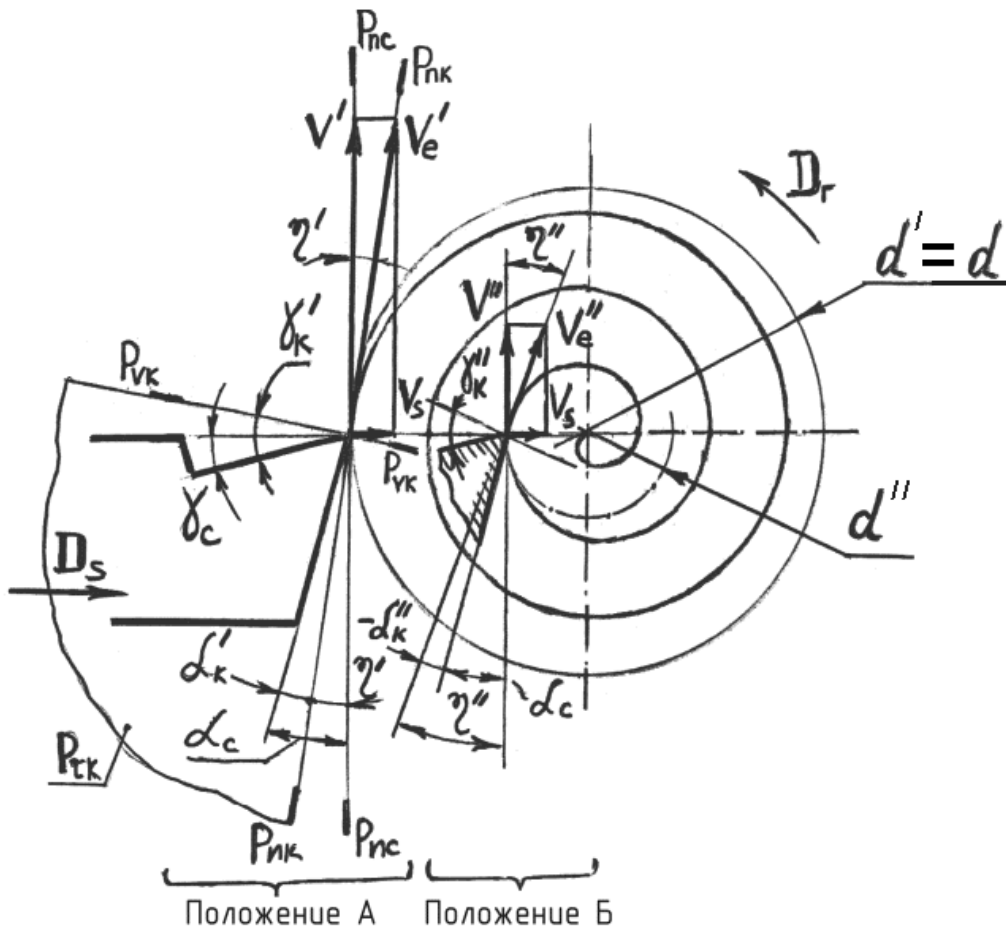


Рисунок 2.5. Кинематическая система координат и изменение кинематических углов в процессе поперечного точения

Если не учитывать скорость подачи, то за основу принимают вектор V и тогда имеем углы резания γ_c и α_c в статической системе координат. При этом плоскость резания $P_{nc} - P_{nc}$ является касательной к цилиндрической поверхности резания диаметром d и проходит через вектор V' (см. рисунок 2.5 положение инструмента А).

Однако фактическая поверхность резания, при наличии поперечной подачи V_s , вовсе не является цилиндрической, а представляет собой сложную поверхность, поперечное сечение которой есть архимедова спираль. Плоскость резания $P_{nk} - P_{nk}$ в этом случае является касательной к архимедовой спирали в рассматриваемой точке режущей кромки (вершина резца) и включает вектор V_e' . То есть можно считать, что кинематическая плоскость резания P_{nk} повернута относительно статической плоскости резания P_{nc} на угол η' . При этом:

$$\operatorname{tg} \eta = \frac{V_s}{V} = \frac{s}{\pi d}, \quad (2.6)$$

С учетом угла наклона главной режущей кромки, т. е. когда $\varphi \neq 90^\circ$:

$$\operatorname{tg} \eta = \frac{S}{\pi d} \cdot \sin \varphi, \quad (2.7)$$

где S – подача, в мм/об; d – диаметр проточки в рассматриваемый момент резания, мм; φ – главный угол в плане.

Соответственно повернуты и остальные координатные плоскости.

Из рисунка 2.5 видно, что фактические, т. е. кинематические углы резания, в положении А составляют:

$$\gamma'_k = \gamma_c + \eta' \quad (2.8); \quad \alpha'_k = \alpha_c - \eta'' \quad (2.9)$$

Все сказанное выше относится и к положению инструмента Б, когда резец, в процессе поперечной подачи, выходит в точку с диаметром обточки d'' (см. рисунок 2.5 положение Б). Поскольку $d'' < d$, то при $\eta = \text{const}$, $V'' < V'$. Поскольку скорость V_s не менялась, т. е. одинакова для положений А и Б, то $\eta'' > \eta'$.

В этом случае задний угол α''_k принимает отрицательное значение, что, по сути, означает, что нормальный процесс резания невозможен и переходит в процесс пластического деформирования (смятия) инструментом материала заготовки. Таким образом, ясно, что полученный при изготовлении резца угол α_u , который, по сути, в статической системе есть угол α_c , не обеспечивает нормального процесса резания при выбранных значениях V и V_s . Необходимо либо увеличить α_u , что ограничено прочностью режущего клина, либо уменьшать V_s по мере уменьшения диаметра проточки.

Что касается кинематического переднего угла, то видно, что по мере уменьшения d он возрастает. Кинематическая система координат, применительно к точению фасонным призматическим резцом, представлена на рисунке 1.3, в.

Выявленные выше для поперечного точения отличия кинематических углов от статических сохраняются и при продольном точении с учетом того, что на данном конкретном проходе диаметр проточки d не меняется.

То есть имеем $d = \text{const}$ и $\eta = \text{const}$. При продольном точении расчет кинематических углов и соответствующая коррекция углов инструментальных или статических делается лишь при так называемом силовом резании (с большими подачами) и при нарезании резьб с большим шагом. Более подробно эти случаи рассмотрены в литературе. При работе с обычными подачами $\eta \approx 1^\circ$ и им можно пренебречь.

3 Примеры расчёта

3.1 Расчёт статических углов резания при наружном точении и растачивании отверстий

Условия задачи. При растачивании отверстий диаметром d вершина расточного резца установлена ниже оси центров станка (оси заготовки) на $h=1,5$ мм. Определить статические углы резания для двух значений диаметра расточки: $d = 200$ мм и $d = 20$ мм. Оценить значимость погрешности установки резца на процесс резания. Главный угол в плане $\varphi = 45^\circ$. Инструментальные углы: $\gamma_{и} = 5^\circ$; $\alpha_{и} = 8^\circ$.

Решение. Составляем расчётную схему (рисунок 2.6).

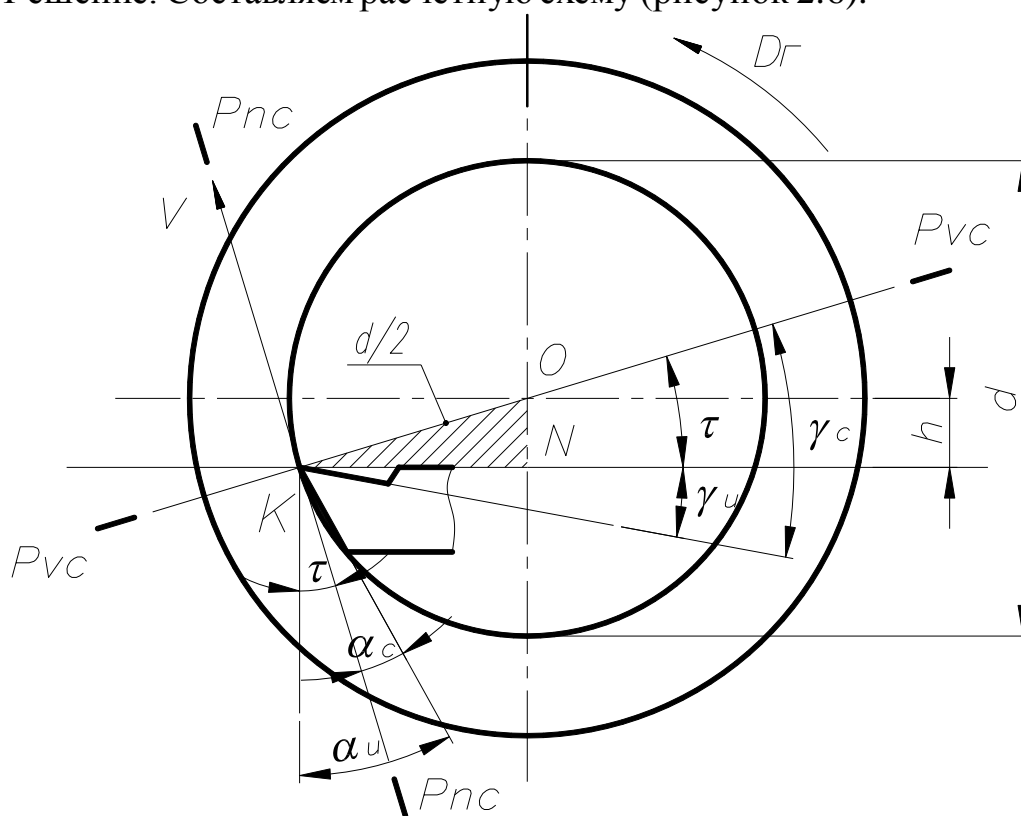


Рисунок 2.6. Расчётная схема

Вектор скорости резания V направлен из вершины резца по касательной к окружности d . Проводим статическую основную плоскость $P_{vc}-P_{vc}$ через вершину перпендикулярно вектору V и плоскость резания $P_{nc}-P_{nc}$ — перпендикулярно основной плоскости, т. е. по сути вектор V лежит в плоскости резания.

Согласно определению заднего и переднего углов (см. лаб. работу № 1, п. 2.3), обозначаем на чертеже их статические значения α_c и γ_c . Из схемы видно, что статические углы равны: $\gamma_c = \gamma_{и} + \tau$; $\alpha_c = \alpha_{и} - \tau$.

Однако схема построена в предположении, что главный угол в плане $\varphi = 0^\circ$. Поскольку в задании $\varphi = 45^\circ$, то для расчёта статических углов необходимо использовать угловую погрешность не τ , а τ_s , которая определяется через величину t по формуле (2.3).

Используя формулы (2.1), (2.2), (2.3) и указанные выше зависимости для γ_c и α_c последовательно определяем статические углы для диаметра растачиваемого отверстия $d = 200$ мм и $d = 20$ мм.

При $d = 200$ мм:

$$\tau = \arcsin \frac{2h}{d} = \arcsin \frac{2 \cdot 1,5}{200} = \arcsin 0,015 \approx 1^\circ ;$$

$$\tau_\varphi = \arctg(\operatorname{tg} \tau \cdot \cos \varphi) = \arctg(\operatorname{tg} 1^\circ \cdot \cos 45^\circ) = \\ = \arctg(0,0175 \cdot 0,707) = \arctg(0,0124) \approx 0^\circ 40'$$

$$\gamma_c = \gamma_u + \tau_\varphi = 15^\circ + 0^\circ 40' = 15^\circ 40' ;$$

$$\alpha_c = \alpha_u - \tau_\varphi = 8^\circ - 0^\circ 40' = 7^\circ 20' .$$

При $d = 20$ мм:

$$\tau = \arcsin \frac{2h}{d} = \arcsin \frac{2 \cdot 1,5}{20} = \arcsin 0,15 \approx 8^\circ 36' ;$$

$$\tau_\varphi = \arctg(\operatorname{tg} \tau \cdot \cos \varphi) = \arctg(\operatorname{tg} 8^\circ 36' \cdot \cos 45^\circ) \\ = \arctg(0,1512 \cdot 0,707) = \arctg(0,1069) \approx 6^\circ$$

$$\gamma_c = \gamma_u + \tau_\varphi = 15^\circ + 6^\circ = 21^\circ ;$$

$$\alpha_c = \alpha_u - \tau_\varphi = 8^\circ - 6^\circ = 2^\circ .$$

Анализ расчётов показывает, что при $d = 200$ мм, то есть когда погрешность установки вершины резца более чем на порядок меньше диаметра расточки, статические углы весьма незначительно отличаются от инструментальных. С принципиальной точки зрения, процесс резания может быть осуществлён, поскольку $\alpha_c = 7^\circ 20'$ вполне обеспечивает нормальный процесс стружкообразования. Однако и в этом случае резец надо устанавливать относительно оси центров как можно точнее, так как погрешность h влияет не только на механику процесса резания, но и на точность обрабатываемого отверстия, интенсивность вибраций, качество поверхности.

При расточке отверстия малого диаметра, когда погрешность h становится соизмеримой с d , её влияние на процесс резания становится решающим. Действительно, значение статического заднего угла $\alpha_c = 2^\circ$ нельзя признать приемлемым, поскольку уже в начальный момент резания трение по задней поверхности режущего клина будет чрезвычайно высоко и попытка эксплуатации резца в этих условиях приведёт к браку изделия (резкое увеличение вибраций, крайне низкое качество обрабатываемой поверхности) или вообще к поломке режущего клина.

3.2 Расчёт кинематических углов резания при отрезке заготовке

Условия задачи. Рассчитать кинематические углы резания α_k и γ_k при отрезке заготовки диаметром $d = 60$ мм отрезным резцом с геометрическими инструментальными параметрами: $\varphi = 0^\circ$; $\lambda = 0^\circ$; $\alpha = 8^\circ$; $\gamma = 10^\circ$; поперечная пода-

ча $S_n = 0,6$ мм/об. Расчёт кинематических углов делать для двух положений резца: а) в начале обработки; б) для момента, когда кинематический задний угол, в процессе отрезки заготовки, станет равным его инструментальному значению.

При расчёте принять, что погрешности установки резца отсутствуют, то есть статические углы резания равны инструментальным.

Решение. Схема резания при отрезке заготовки отрезным резцом при $\varphi = 0^\circ$ и $\lambda = 0^\circ$ полностью совпадает со схемой, представленной на рисунке 2.5.

В начальный момент (положение резца А) кинематические углы резания определяются на основании формул (2.6) и (2.9).

$$\operatorname{tg} \eta' = \frac{S_n}{\pi d} = \frac{0,6}{3,14 \cdot 60} = 0,0032 ; \eta' \approx 0^\circ 12' ;$$

$$\gamma'_k = \gamma_c + \eta' = 10^\circ + 0^\circ 12' = 10^\circ 12' ;$$

$$\alpha'_k = \alpha_c - \eta' = 8^\circ - 0^\circ 12' = 7^\circ 48' .$$

Видно, что кинематические углы резания в начальный момент обработки практически не отличаются от статических углов.

По мере поперечного врезания резца в заготовку диаметр проточки (диаметр шейки) постоянно уменьшается от $d' = d$ до d'' . При этом величина поперечной подачи S_n остаётся постоянной. В связи с уменьшением d и при $S_n = \text{Const}$ угол η растёт, см. формулу (2.6), и какой-то момент времени η станет равным статическому заднему углу, т. е. $\eta'' = \alpha_c$. Но тогда, на основании формулы (2.9), а также схемы на рисунке 2.5, имеем:

$$\alpha''_k = \alpha_c - \eta'' = 0^\circ .$$

Очевидно, с этого момента времени резание, как таковое, осуществлено быть не может, и задняя поверхность резца уже не режет, а пластически деформирует, сминает, оставшуюся шейку диаметром d'' , соединяющую отделяемую часть заготовки с основной массой, зажатой в патроне станка. Если резец продолжает поперечное врезание с той же подачей S_n . и после этого момента, то возможно его разрушение. Но обычно этого не происходит, так как к моменту, когда $\alpha_k = 0$, диаметр шейки становится настолько мал, что под силовым воздействием резца шейка разрушается (гнётся и ломается) и в виде цилиндрической бобышки диаметром d'' остаётся на торце отрезанной заготовки. Это вызывает необходимость дополнительной технологической операции: зачистки торца заготовки от бобышки. Сведение диаметра бобышки до практически незначимого диаметра возможно счёт уменьшения поперечной подачи S_n к моменту окончания отрезки заготовки. Но это требует соответствующей коррекции технологических режимов.

Таким образом, определение диаметра бобышки, т. е. диаметра d'' , осуществляется по формуле (2.6) исходя из условия, что $\eta'' = \alpha_c$. Тогда:

$$\operatorname{tg} \eta'' = \frac{S_n}{\pi \cdot d''};$$

$$d'' = \frac{S_n}{\pi \cdot \operatorname{tg} \eta''} = \frac{S_n}{\pi \cdot \operatorname{tg} \alpha_c} = \frac{0,6}{3,14 \cdot \operatorname{tg} 8^\circ} = \frac{0,6}{3,14 \cdot 0,145} = 1,3 \text{ мм}$$

Что касается кинематического переднего угла, то к моменту разрушения бобышки он равен:

$$\gamma_k'' = \gamma_c + \eta'' = \gamma_c + \alpha_c = 10^\circ + 8^\circ = 18^\circ$$

Таким образом, видно, что к моменту окончания отрезки кинематический (действительный) задний угол становится решающим фактором процесса резания и его значение, по сути, определяет диаметр бобышки.

Наличие бобышки на отрезанной части заготовки требует введения дополнительной технологической операции по её зачистке. В любом случае необходимо стремиться к как можно меньшему диаметру бобышки, что возможно: за счёт снижения подачи S_n к моменту окончания отрезки, за счёт специальной заточки резца, за счёт того и другого.

4 Содержание отчёта

Согласно индивидуальному заданию, представленному в таблицах 2.1, 2.2, необходимо представить в отчёте следующее.

4.1. Наименование практического занятия, номер индивидуального задания (вариант), цель и задачи.

4.2. Расчётную схему, условие задачи по расчёту статических углов резания, все необходимые числовые данные.

4.3. Решение задачи по определению статических углов резания с пояснениями и выводами. Пример оформления – см. п. 3.1. Формулы выписывать в буквенном виде, затем вместо буквенных обозначений подставлять их числовые значения и указывать полученный результат. Промежуточные расчёты опускаются. Пояснения к расчётам обязательны.

4.4. Расчётную схему, условие задачи по расчёту кинематических углов резания, все необходимые данные.

4.5. Решение задачи по определению кинематических углов резания. Пример решения – см. п. 3.2. Все остальные пояснения – см. п. 4.3.

Таблица 2.1. Индивидуальные задания по расчёту статических углов резания

№ п/п	Схема обработки и условия задачи	d, мм		h, мм	α°	γ°	φ°
1	Схема обработки – см. рис. 2.2 б. Протоочить наружную поверхность диаметром d. Вершина резца установлена выше оси центров станка на h, мм.	300	25	1,8	8	5	30
2		250	18	1,5	10	8	45
3		280	30	1,2	8	5	40
4		240	20	1,6	8	10	35
5		280	18	1,0	8	10	40
6		300	20	1,4	10	15	45
7		250	25	1,5	8	10	30
8		320	20	1,3	10	5	40
9		280	25	1,0	8	8	45
10		250	20	1,3	10	10	45
11		260	25	1,6	10	5	30
12		270	25	1,3	8	15	30
13		290	18	1,5	10	10	40

№ п/п	Схема обработки и условия задачи	d, мм		h, мм	α°	γ°	φ°
1	Схема обработки – см. рис 2.б. Расточить отверстие диаметром d. Вершина резца ниже оси центров станка на h, мм.	350	25	1,3	8	10	45
2		320	20	1,2	10	5	30
3		300	30	1,8	8	5	30
4		280	20	1,5	8	15	45
5		250	25	1,4	10	10	40
6		300	20	1,2	8	5	45
7		350	18	1,3	10	10	30
8		290	22	1,6	8	5	30
9		340	18	1,4	8	10	45
10		270	20	1,3	10	15	40
11		290	24	1,7	10	10	45
12		320	25	1,4	8	10	30
13		340	22	1,3	8	5	45

Примечание: для всех вариантов $\varphi=0^\circ$, $\lambda=0^\circ$.

Таблица 2.2. Индивидуальные задания по расчёту кинематических углов резания

№ п/п	d, мм	S _п , мм	α°	γ°
1	60	1,0	10	0
2	55	0,8	8	5
3	50	1,0	12	5
4	45	0,6	8	10
5	45	0,8	10	5
6	65	0,8	8	5
7	60	1,0	8	0
8	55	0,6	10	10
9	50	0,8	8	5
10	45	0,5	12	0
11	50	0,6	12	0
12	60	0,4	8	10
13	55	1,0	8	5

№ п/п	d, мм	S _п , мм	α°	γ°
14	40	0,8	12	5
15	35	0,5	8	10
16	30	0,6	10	10
17	35	0,5	8	5
18	40	0,5	8	0
19	40	0,6	10	10
20	45	0,8	12	0
21	50	0,5	8	0
22	30	0,8	8	10
23	35	0,4	10	5
24	40	0,9	10	0
25	45	0,6	8	10
26	50	0,8	8	0

Примечание: для всех вариантов $\varphi=0^\circ$, $\lambda=0^\circ$.

5 Контрольные вопросы

5.1 Какие системы координат используются в практике инструментального производства и при обработке резанием? Чем вызвана необходимость в различных системах координат?

5.2 Дайте формулировку статической системы координат. Приведите примеры статических углов и отличие их от инструментальных: при наружной проточке проходным резцом; при обработке отверстий расточным резцом; при отрезке заготовки отрезным резцом; при подрезке торца подрезным резцом.

Оформите соответствующие эскизы с указанием плоскостей статической системы координат и статических углов на инструменте.

5.3 Каким образом статические углы инструмента зависят от величины смещения вершины резца от оси вращения заготовки (линии центров)? Как это смещение влияет на процесс резания? Какова степень влияния смещения вершины на процесс резания заготовок различного диаметра.

5.4 Каким образом могут изменяться статические углы в плане: главный угол в плане φ и вспомогательный φ_1 . Как влияет установка резца в резцедержателе в горизонтальной плоскости на статические значения φ и φ_1 , их отличие от инструментальных значений φ и φ_1 . Объяснения дополнить эскизом.

5.5 Оформите эскиз, на котором покажите совместное влияние на углы резания (задний и передний) статической погрешности установки резца, например, выше оси заготовки и величины подачи при отрезке заготовки.

Лабораторная работа № 3

Изучение процесса стружкообразования

1 Цель и задачи работы

Цель работы – получение практических умений и навыков в области изучения процесса стружкообразования при резании металлов.

В задачи работы входит экспериментальное определение коэффициента усадки стружки; ознакомление с различными видами стружки и условиями их образования, оценка полученных форм стружки с точки зрения их безопасности для работы станочника и удобства транспортировки.

2 Общие сведения о процессе стружкообразования

2.1 Виды стружек

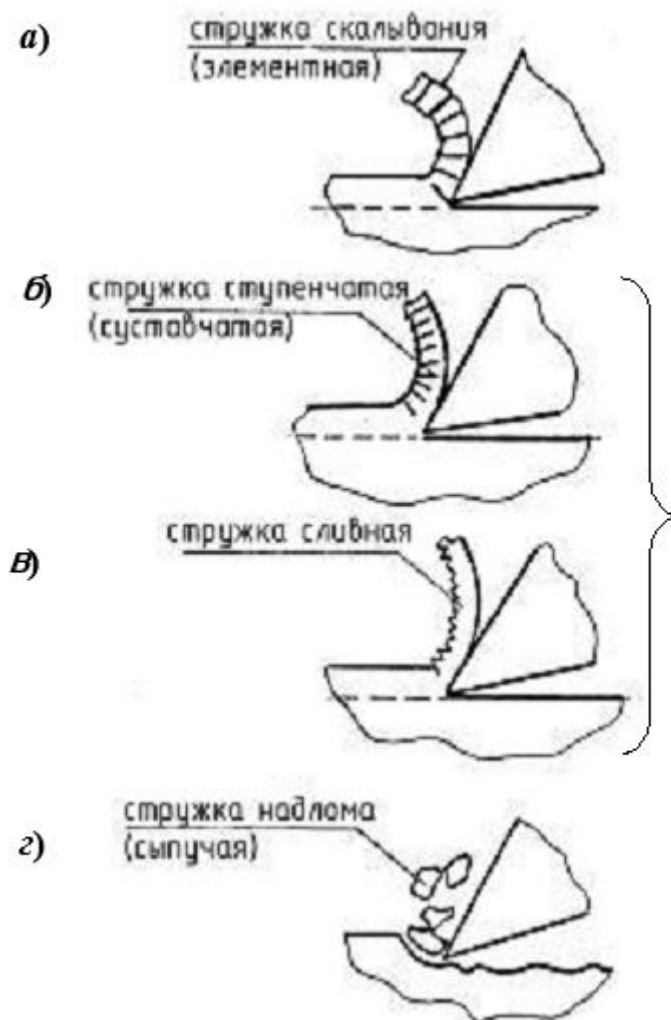


Рисунок 3.1. Виды стружек

Процесс резания металлов заключается в снятии с заготовки определенного слоя (припуска) для получения из нее детали необходимой формы и размеров с соответствующим качеством обработанных поверхностей.

Резание осуществляется режущим инструментом. Металлорежущий инструмент – часть металлорежущего станка, воздействующая в процессе резания непосредственно на заготовку, из которой должна быть получена деталь. Припуск срезается инструментом с заготовки в виде стружки. По сути, процесс резания металлов – это и есть процесс образования стружки, который сопровождается целым комплексом взаимосвязанных и взаимообусловленных физико-механических явлений: упругое и пластическое деформирование материала заготовки в зоне резания; наростообразование, трение и интенсивное тепловыделение в контактных зонах; формирование микрорельефа обработанной поверхности и прочностных свойств её тонкого поверхностного слоя и др. Одним из первых и наиболее простых способов изучения процесса резания металлов явилось исследование самого процесса стружкообразования в зависимости от ряда факторов.

Установлено, что в зависимости от условий обработки имеют место три вида стружек: скалывания (элементарная) – рисунок 3.1, а, сливная (разновид-

ность сливной – ступенчатая) – рисунок 3.1, б, надлома – рисунок 3.1, в. Иногда ступенчатую стружку выделяют в самостоятельный вид стружки, тогда говорят о четырех видах стружки.

Стружка скалывания образуется при обработке сталей пониженной пластичности и при больших толщинах срезаемого слоя. Скорость резания, при этом, как правило, относительно невелика. Стружка состоит из пластически деформированных и взаимно сдвинутых элементов, относительно непрочно связанных между собой. При механическом воздействии стружка легко ломается на куски или отдельные элементы.

Сливная стружка характерна для обработки пластичных металлов на высоких скоростях резания при средних и малых значениях глубины резания резцами с относительно большими передними углами.

Стружка имеет вид непрерывной ленты (прямой или завитой в спираль); на верхней и боковых сторонах стружки видны мелкие зазубрины. Зазубрины могут быть настолько мелкими, что видны только при увеличении, например, с помощью лупы.

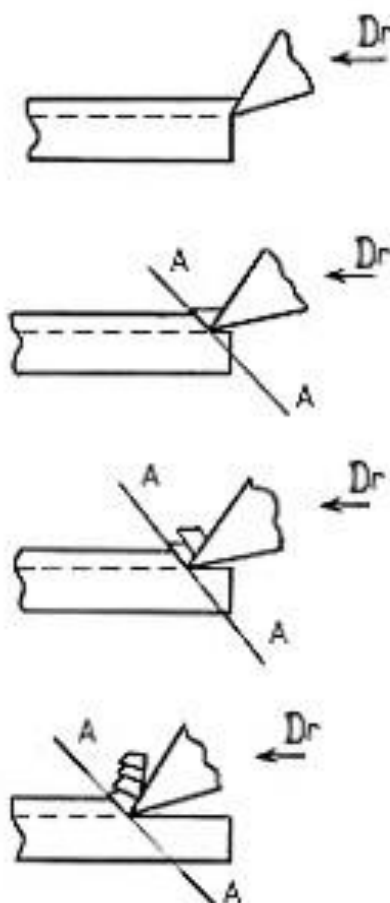


Рисунок 3.2. Схема образования стружки

Ступенчатая стружка, по сути, занимает промежуточное положение между стружкой скалывания и собственно сливной стружкой. Как и на стружке скалывания, на ней можно выделить отдельные элементарные объемы, сдвинутые относительно друг друга. Однако эти отдельные элементы связаны между

собой намного прочнее, чем в стружке скалывания, а границы сдвига элементов стружки выражены не столь четко. Сторона стружки, обращенная к передней поверхности режущего клина – гладкая, на противоположной стороне имеются ярко выраженные следы сдвига элементов. На боковых кромках – зазубрины. Ступенчатая стружка образуется при обработке достаточно пластичных сталей на средних режимах резания.

Стружка надлома образуется при обработке малопластичных металлов (чугуны, бронзы). Стружка состоит из отдельных элементов, не связанных или очень слабо связанных между собой. Такие стружки еще называют сыпучими.

2.2 Процесс стружкообразования

Процесс стружкообразования кратко и упрощенно может быть представлен следующим образом (рисунок 3.2). При движении режущего клина происходит его внедрение в металл заготовки и начинается процесс пластического деформирования материала.

Напряжения в срезаемом слое растут и когда они достигнут предела прочности произойдет сдвиг (скалывание) первого элемента стружки по поверхности ее сдвига (скалывания) AA. После сдвига первого элемента клин своей передней поверхностью сжимает (деформирует) следующий близлежащий объем металла, в результате чего образуется второй элемент стружки. При дальнейшем движении режущего клина процесс многократно повторяется и с заготовки снимается слой в виде стружки. Граничная поверхность AA, по которой происходит периодический сдвиг очередного элемента стружки, называется поверхностью сдвига.

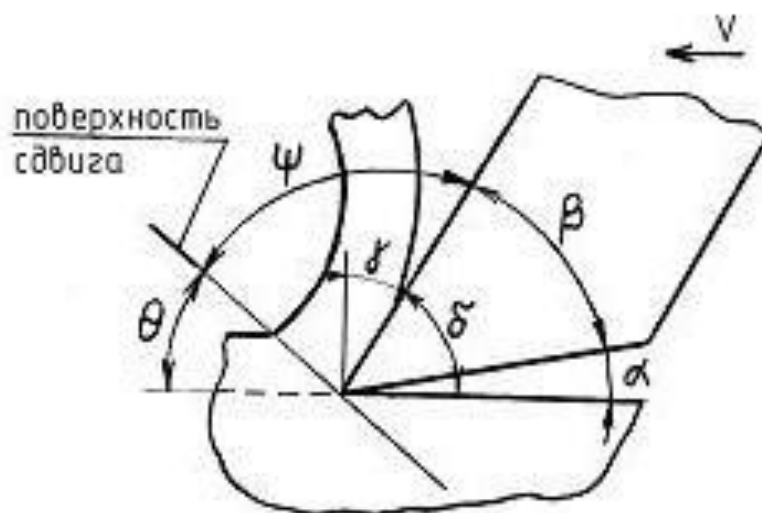


Рисунок 3.3. Углы сдвига θ и действия φ :

θ – угол сдвига; Ψ – угол действия; β – угол заострения; α – задний угол;
 γ – передний угол; δ – угол резания

Положение этой поверхности в материале заготовки характеризуется углом сдвига θ и углом действия Ψ (рисунок 3.3).

В отличие от стружек скалывания (элементных) при образовании стружек надлома, то есть при обработке хрупких материалов, в плоскости А–А происходит не сдвиг, а, по сути, полное разрушение связей элементарного объема с остальным объемом заготовки. Каждый отдельный элемент как бы выламывается из материала заготовки в виде кусочка неправильной формы, что влияет на шероховатость обработанной поверхности (рисунок 3.1, в).

Непрерывное образование элементов стружки при металлообработке, сопровождается периодическими изменениями сил, действующих на режущий клин. Минимум силы – в момент начала деформации элементарного объема, максимум – в момент сдвига. После сдвига сила резко уменьшается, но не падает до нуля, так как деформации последующего элементарного объема начинается несколько раньше, чем заканчивается скалывание предыдущего элемента. Особенно велики колебания нагрузки на клин при образовании стружки надлома. Изменение силы, действующей на режущий клин (инструмент) в процессе стружкообразования, может привести к вибрациям и ухудшению качества обработки. Для сливных стружек колебания нагрузки существенно меньше. В связи с этим необходимо стремиться (там, где это возможно) к получению сливных стружек вместо стружек скалывания и ступенчатых.

2.3 Усадка стружки

В результате пластического деформирования инструментом материала заготовки длина стружки l_2 меньше длины заготовки слоя l_1 , а толщина a_2 и ширина b_2 стружки больше толщины a_1 и ширины b_1 срезаемого слоя (рисунок 3.4). Степень пластического деформирования металла в процессе стружкообразования может быть оценена с помощью усадки стружки:

усадка по длине –
$$\xi_l = l_2 / l_1 \leq 1 \quad (3.1)$$

усадка по толщине (поперечная усадка) –
$$\xi_a = a_2 / a_1 > 1 \quad (3.2)$$

усадка по ширине (уширение) –
$$\xi_b = b_2 / b_1 > 1 \quad (3.3)$$

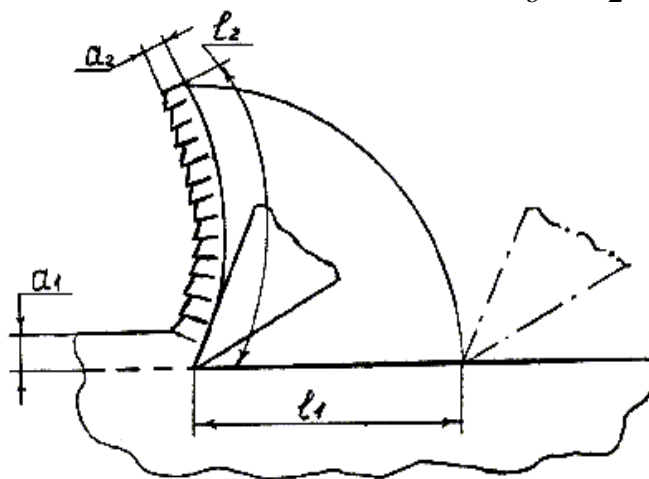


Рисунок 3.4. Схема усадки стружки

Для исследования процесса стружкообразования широко используется коэффициент усадки k_l , который косвенно выражает степень, пластической деформации материала при резании.

$$k_l = 1/\xi_l = l_1/l_2 \quad (2.4)$$

Чем меньше k_l , тем с меньшими пластическими деформациями проходит процесс резания и тем меньше удельный расход энергии при обработке. На значение k_l решающее влияние оказывают: угол резания δ – см. рисунок 3.3 (по сути – передний угол γ на режущем клине, если принять $\alpha = \text{const}$); радиус закругления при вершине резца в плане r ; скорость резания V , глубина резания t и подача S ; наличие СОЖ; свойства обрабатываемого материала.

Исследования показывают, что k_l возрастает с уменьшением δ и увеличением r .

На рисунке 3.5 показано влияние угла резания δ на коэффициент усадки стружки k_l и изменение угла сдвига θ .

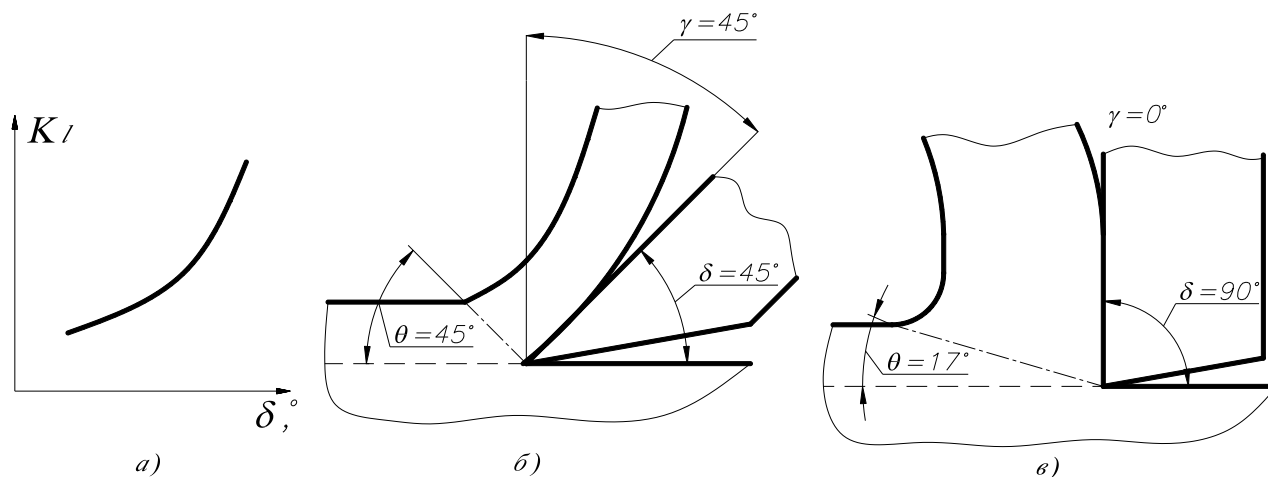


Рисунок 3.5. Влияние угла резания на коэффициент усадки стружки и изменение угла сдвига

При увеличении угла резания δ , что эквивалентно уменьшению переднего угла γ (при $\alpha = \text{const}$), коэффициент усадки стружки k_l увеличивается (рисунок 3.5, а). Это вызвано тем, что с уменьшением переднего угла возрастает степень пластического деформирования срезаемого слоя, то есть стружки. Известно так же, что при этом уменьшается угол резания (рис. 3.5, б, в), что собственно, и свидетельствует о большей пластической деформации материала в процессе его резания.

Наличие СОЖ снижает значение k_l . При обработке материалов, в диапазоне режимов, когда не образуется нарост на режущем клине, с увеличением скорости резания и подачи k_l уменьшается. В случае образования на режущем

клине нароста зависимость k_l от V и S носит сложный характер. Взаимосвязь k_l и факторов, влияющих на него, подробно рассмотрена в литературе.

Определение коэффициента усадки стружки может быть осуществлено двумя способами.

Весовой способ. Можно считать, что масса слоя $m_{сл}$, срезаемого с заготовки металла и масса получаемой при этом стружки $m_{стр}$ равны между собой.

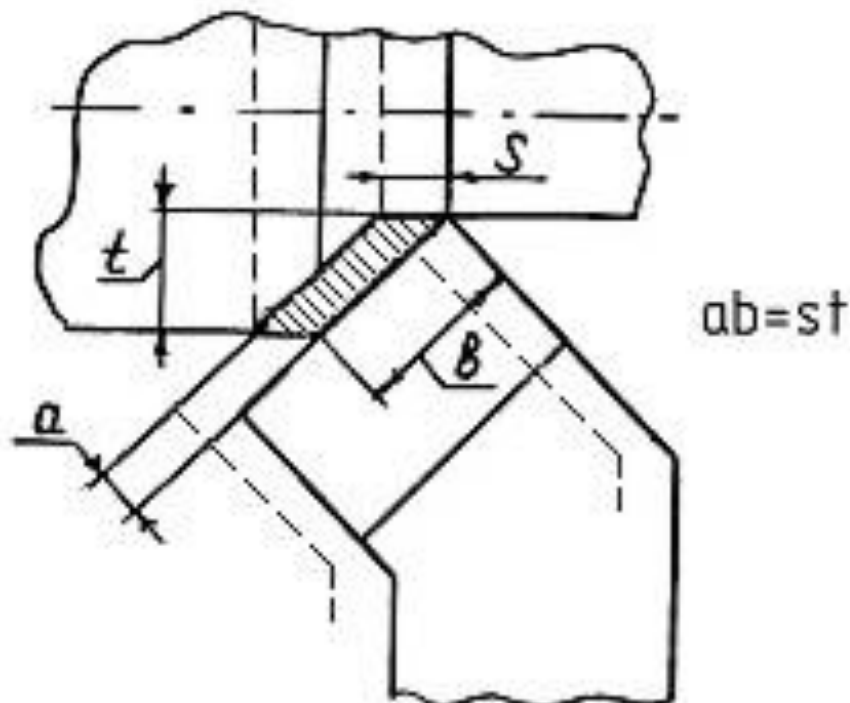


Рисунок 3.6. Взаимосвязь сечения стружки с режимами резания

То есть:

$$m_{сл} = m_{стр}. \quad (2.5)$$

Но:

$$m_{сл} = a \cdot b \cdot l_1 \cdot \rho = s \cdot t \cdot l_1 \cdot \rho, \quad (2.6)$$

где t – глубина резания, мм; ρ – плотность материала заготовки г/мм³.

Тогда:

$$s \cdot t \cdot l_1 \cdot \rho = m_{стр}. \quad (2.7)$$

Отсюда:

$$l_1 = m_{стр} / s \cdot t \cdot \rho. \quad (2.8)$$

Взвесив отрезок стружки и тем самым узнав $m_{стр}$, зная s , t , ρ , определяют длину срезанного с заготовки слоя l_1 при получении данного отрезка.

Определяют длину отрезка стружки l_2 , прикладывая к ее гладкой стороне гибкую нить (например, тонкую мелкую проволочку), и затем замеряя длину нити (рисунок 3.7). Зная l_1 и l_2 по формуле находят k_l . Неизбежные

при этом погрешности определения l_2 , обусловленные диаметром проволоки и тем, что измерение ведется по наружной поверхности стружки, а не в средней плоскости (рисунок 3.6), незначительны.

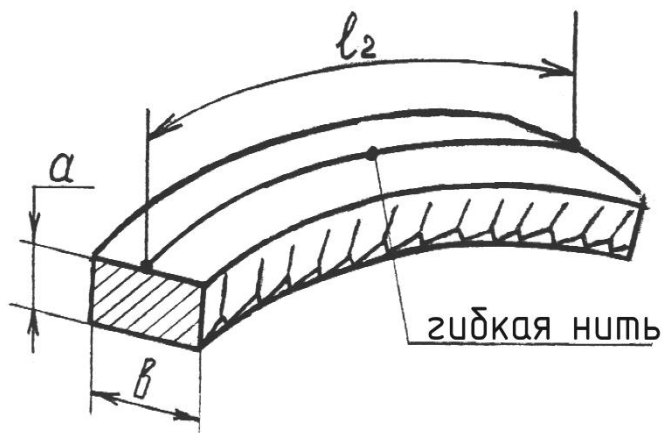


Рисунок 3.7. Схема замера длины стружки

Второй способ нахождения k_l заключается в определении длины срезанного с заготовки слоя l_1 не путем взвешивания стружки и последующего расчета, а непосредственно по диаметру проточенной поверхности на заготовке.

Для этого на поверхности цилиндрической заготовки прорезается продольный паз, в который запрессовывается вставка из латуни, меди или алюминия (рисунок 3.8).

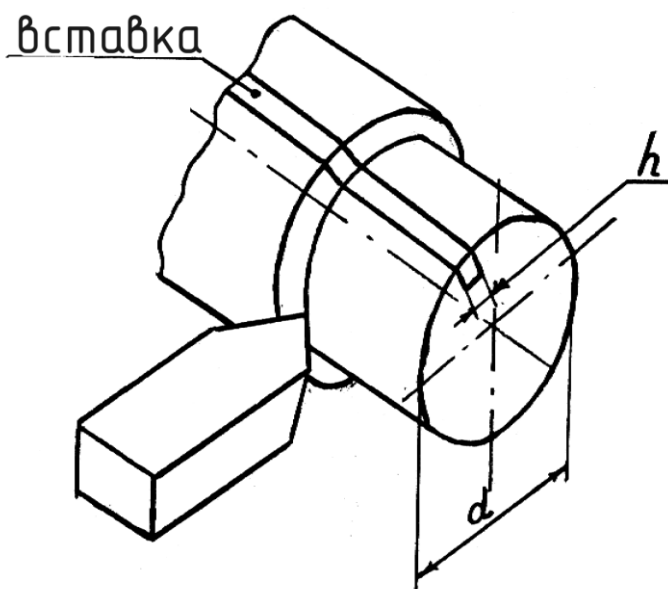


Рисунок 3.8. Схема получения фиксированной длины срезаемого слоя l_1

Режимы резания и углы заточки подбирают таким образом, чтобы сливная стружка имела ленточную или слабо выраженную винтовую форму. Наличие вставки гарантирует при проточке заготовки разделение стружки на отрезки.

Длина каждого из них соответствует длине слоя материала, срезаемого с заготовки за ее один оборот.

То есть:

$$l_1 = \pi d - h, \quad (2.9)$$




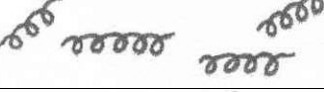

где d – диаметр проточенной поверхности; h – ширина паза.

Значение длины стружки l_2 находят так же, как и по первому способу, замером гибкой нитью. Далее по формуле (2.4) определяем k_1 .

2.4 Форма стружки и направление ее схода

Форма стружки весьма различается в зависимости от материала заготовки, режимов резания, углов заточки инструмента. Это имеет существенное значение с точки зрения безопасности работы станочника, удаления стружки из зоны резания и последующей ее транспортировки. Формы стружки при точении приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1. Форма стружки при точении

Форма стружки	Название	Оценка формы
	Ленточная	Неблагоприятная
	Клубкообразная	Неблагоприятная
	Длинная винтовая	Удовлетворительная
	Короткая винтовая	Благоприятная
	Короткая спиральная	Благоприятная
	Кусочковая спиральная	Благоприятная
	Кусочковая	Удовлетворительная

Перевод неблагоприятной формы стружки в благоприятную осуществляется:

- изменением режимов резания;
- изменением угла заточки γ ;
- с помощью специальных стружкозавивающих канавок или уступов на передней поверхности резца;
- с помощью специальных стружколомающих устройств, установленных на резце (стружколомы);
- с помощью специальных устройств, встроенных в механизм подачи (кинематическое дробление стружки).

Направление схода стружки при продольном точении существенно зависит от угла наклона главной режущей кромки λ (рисунок 3.9).

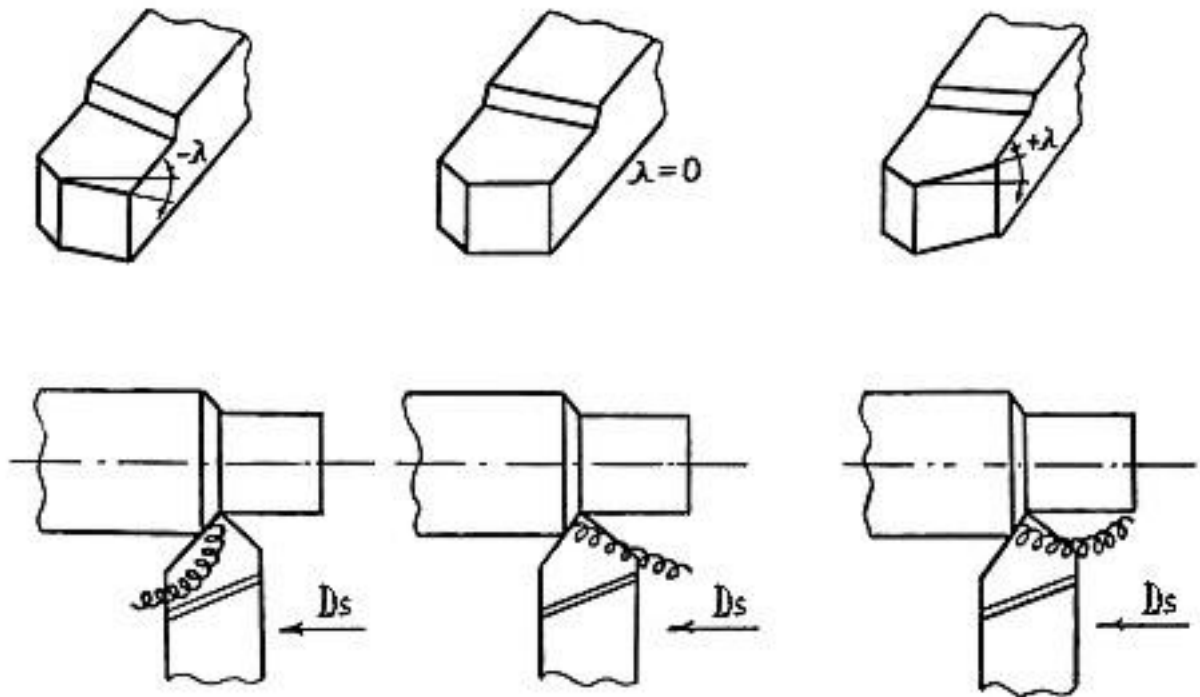


Рисунок 3.9. Направление схода стружки в зависимости от угла λ

При $\lambda < 0$ стружка в виде спирали сходит влево, то есть в том же направлении, что и подача. В этом случае стружка не мешает визуальному наблюдению за процессом резания, однако надо следить, чтобы она не наматывалась на патрон.

При $\lambda > 0$ стружка сходит вправо, против направления подачи. Опасность наматывания на патрон отсутствует, но зато стружка может наматываться на заготовку и царапать уже обработанную поверхность.

Значение λ так же влияет на прочность режущей кромки. При $+\lambda$ головка резца более массивна, режущая кромка более износостойка. Для чистовой обработки применяют отрицательные значения λ (до -4°). При черновых и обдирочных работах используют положительные λ (до $+5^\circ$).

3. Оборудование, приборы, инструменты

3.1 Токарно-винторезный станок.

3.2 Проходные токарные резцы с различной формой передней поверхности (со стружкозавивающей канавкой и без неё), с различными углами наклона главной режущей кромки λ ($+\lambda$; $-\lambda$) и передними углами γ ($+\gamma$; $-\gamma$).

3.3 Образцы для токарной обработки из стали (Ст3 или сталь 45) и серого чугуна (любой марки).

3.4 Аналитические весы.

3.5 Штангенциркуль, микрометр, тонкая медная проволочка для замера длины стружки, эталоны шероховатости.

4 Содержание и порядок выполнения работы

4.1 Изучить теоретическую часть и ознакомиться с методикой определения коэффициента усадки стружки (см. п. 2).

4.2 Под руководством учебного мастера проточить заготовки из стали и серого чугуна на выбранных режимах резания резцами с различными видами заточки. Получить стружки различного вида и различной формы. Обратить внимание на зависимость характера стружкообразования и получаемого вида стружки от материала заготовки, наличия или отсутствия стружкозавивающей канавки.

Установить направление схода стружки в зависимости от угла наклона главной режущей кромки λ .

4.3 Оценить получаемую форму стружки с точки зрения безопасности работы станочника и удобства транспортировки.

4.4 Оценить по эталонам шероховатости шероховатость поверхности, получаемой при образовании сливной стружки и стружки надлома.

4.5 Проточить стальную заготовку на одних и тех же технологических режимах последовательно тремя проходными отогнутыми резцами с передними углами γ равными соответственно 25° , 10° , -5° . Остальные углы заточки для всех трех резцов одинаковы: $\alpha=8^\circ$; $\varphi=45^\circ$; $\varphi_1=45^\circ$; $\lambda=0^\circ$; $r=0,2$ мм. Отобрать для последующего расчета коэффициента усадки стружки образцы стружек, полученных при проточке каждым резцом. Образцы поместить в бумажные пакеты, на которых написать значение угла γ , при котором образец был получен.

5 Оформление отчета

5.1 Оформить результаты обработки образцов в виде таблицы 3.2.

Таблица 3.2. Данные исследований и замеров

№ п/п	Материал образца	Эскиз головки резца λ°	Технологические режимы			Эскиз стружки. Вид и форма стружки	Эскиз направления схода стружки	Оценка формы стружки	Шероховатость проточенной поверхности
			V, м/мин	S, мм/об	t, мм				

Скорость резания посчитать по формуле

$$V = \pi d n / 1000 \text{ м/мин}, \quad (2.10)$$

где d – диаметр заготовки, мм; n – частота вращения шпинделя, мин^{-1} .

На эскизе головки резца указать конкретное значение угла λ (рисунок 3.8).

5.2 На основе сведений по стружкообразованию, представленных в п. 2 и в литературе [2, 3, 8], описать физико-механические явления, сопровождающие

процесс образования стружки, объяснить результаты, полученные при обработке образцов.

5.3 Согласно методике (см. п. 2.3), используя формулы (2.4) и (2.8), определить коэффициент усадки по длине k_l для каждого образца стружки, полученной при проточке резцами со значениями переднего угла соответственно 25° , 10° , -5° . Расчеты привести в отчете. Рассчитанные данные занести в таблицу (образец – таблица 2.3).

Таблица 3.3 Данные исследований и расчетов

α°	δ°	m, гр	S, мм/об	t, мм	ρ , гр/мм ³	k_l
25°						
10°						
-5°						

Плотность ρ материала стружки (сталь) может быть принята с достаточной степенью точности $7,8 \cdot 10^{-3}$ гр/мм³.

Значение угла резания δ можно определить следующим образом (рис. 3.3): $\delta = 90^\circ - \gamma^\circ$.

Используя рассчитанные значения коэффициента k_l построить графическую зависимость k_l от δ . Объяснить полученные зависимости в виде текста под графиком.

6 Контрольные вопросы

6.1 Виды стружек и их взаимосвязь со свойствами обрабатываемых материалов.

6.2 Механизм образования стружки; физико-механические явления, сопровождающие данный процесс.

6.3 Плоскость скалывания, угол сдвига и угол действия, их влияние на процесс образования стружки.

6.4 Какая взаимосвязь процесса стружкообразования и вибраций инструмента? При получении каких видов стружки велика вероятность интенсивных вибраций инструмента и почему?

6.5 Усадка стружки и коэффициент усадки. Какая физическая природа процессов, которые характеризуются этими показателями? В чем суть методики определения коэффициента усадки стружки?

6.6 Каким образом коэффициент усадки стружки зависит от угла резания δ и переднего угла γ на инструменте. Построить графическую зависимость k_l от δ . Объяснить полученную взаимосвязь на основе угла сдвига θ и размеров поверхности сдвига.

6.7 Каким образом k_l зависит от скорости резания V ? Построить графическую зависимость (по литературным данным) и объяснить ее.

6.8 Какие различают формы стружки, дать их оценку с точки зрения безопасности работы станочника и транспортировки.

6.9 Какие способы могут быть использованы для стружкодробления? Достоинства, недостатки, область применения каждого способа.

6.10 Каким образом заточка резца влияет на направление схода стружки? Охарактеризуйте различные варианты схода стружки с точки зрения удобства и безопасности работы станочника и качества обрабатываемой поверхности.

Лабораторная работа № 4

Исследование шероховатости обработанной поверхности при фрезеровании одиночными резцами

1 Цель и задачи

Цель: получение практических умений и навыков установления на основе исследований функциональной взаимосвязи высоты микронеровностей R_z от величины подачи на s мм/об и от радиуса r при вершине инструмента при фрезерной обработке плоскости одиночным резцом.

Задачи: ознакомиться с характеристиками шероховатости и соответствующими ГОСТами; уяснить сущность понятий «расчетные неровности», «действительные неровности» и их зависимость от характеристик инструмента, режимов резания; ознакомиться с методикой измерения шероховатости с помощью двойного микроскопа МИС 11 и получить навыки работы с ним.

2. Шероховатость поверхности. Методика исследований

2.1 Шероховатость поверхности и её высотные параметры

Эксплуатационные свойства деталей машин (износостойкость, долговечность, надёжность и др.) зависят в значительной степени от качества их поверхности, которое может быть оценено с помощью геометрических и физико-механических характеристик. К геометрическим характеристикам относятся: шероховатость, волнистость, отклонение формы. Физико-механические характеристики включают в себя: микротвёрдость, остаточные напряжения, структуру.

Шероховатость, один из важнейших показателей качества поверхностного слоя, представляет собой совокупность неровностей профиля поверхности с относительно малым шагом, измеряемых в пределах базовой длины.

ГОСТ 2789-73 установлены основные высотные параметры шероховатости: R_a – среднее арифметическое отклонение формы; R_z – высота неровностей профиля по 10 точкам. Упрощённо эти параметры могут быть рассчитаны по формулам:

$$R_a \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad , \quad (4.1)$$

$$R_z = \frac{\sum_1^5 h_{i,\max} - \sum_1^5 h_{i,\min}}{5}, \quad (4.2)$$

где y_i – текущая ордината профиля, отсчитывается от средней линии m (рисунок 4.1); n – количество измерений; h_i – расстояние от линии, параллельной средней линии, до высших ($h_{i,\max}$) и до низших ($h_{i,\min}$) точек профиля (рисунок 4.1)

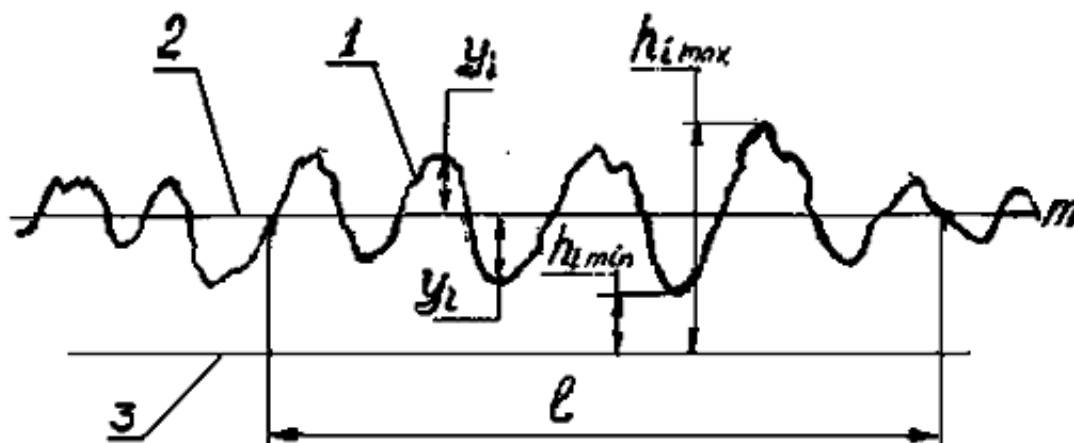


Рисунок 4.1. Профилограмма поверхности:

1 – профилограмма поверхности; 2 – средняя линия профиля; 3 – линия для определения h_i

Шероховатость поверхности характеризуется высотным параметром R_z в пределах значения $0,1 \leq R_z \leq 1,0$ мкм и высотным параметром R_a в пределах $0,025 \leq R_a \leq 2,5$. Числовые параметры следует выбрать по ГОСТ 2789-73.

Основными факторами, оказывающими существенное влияние на шероховатость обработанной резанием поверхности, являются: геометрическая форма лезвия инструмента; упругие и пластические деформации обрабатываемого материала; колебание детали и инструмента во время обработки (вибрация); трение задних поверхностей лезвия о поверхность резания; изменение контура лезвия инструмента в результате его изнашивания; величина подачи.

При изучении шероховатости поверхности используют понятия «расчётные неровности» и «действительные неровности». Под *расчётными неровностями* понимаются такие неровности, высота и форма которых может быть рассчитана теоретически, исходя из следующих допущений: обрабатываемый материал считают абсолютно недеформируемым (отсутствует упругая и пластическая деформация металла заготовки); система станок-приспособление – инструмент – деталь является абсолютно жёсткой (отсутствуют вибрации); лезвие инструмента представляет собой сочетание идеальных геометрических линии (отсутствуют погрешности формы лезвия и его износ). *Действительные неровности* или просто неровности – это те фактические, реальные микронеровности, которые возникают на поверхности после обработки её инструментом. Высота действительных неровностей расчёту не поддаётся, но определён-

ная связь её параметров с параметрами расчётных неровностей имеется. Для определения параметров действительной микрогеометрии обработанной поверхности, прежде всего R_a и R_z , используют различные приборы: двойной микроскоп МИС-11, микроинтерферометры типа МИИ-4, микропрофилометры типа МИИ-12, профилографы-профилометры.

В производственных условиях шероховатость поверхности может быть оперативно определена визуально путём её сравнения с эталонами шероховатости, набор которых для различных видов обработки (точение, фрезерование, строгание и др.) выпускается промышленностью по ГОСТ 2789-73.

2.2 Определение расчетных параметров шероховатости

С геометрической точки зрения образование неровностей обработанной поверхности можно представить, как след режущих кромок лезвия, оставляемых ими в материале заготовки при относительном движении заготовки и инструмента. Различают поперечную шероховатость, когда неровности поверхности измеряют в направлении подачи инструмента, и продольную шероховатость, когда неровности измеряют в направлении движению скорости резания. Обычно поперечная шероховатость больше продольной.

При резании лезвием с острой вершиной, то есть когда радиус при вершине r равен нулю, высота неровностей R_z , измеренной в направлении подачи (поперечная шероховатость) явление, по сути, высотой H определяется из геометрических построений.

$$R_{z\text{ расч}} = H = \frac{s \cdot \sin \varphi \cdot \sin \varphi_1}{\sin(\varphi + \varphi_1)}, \quad (4.3)$$

где s – подача, мм/об; φ – главный угол в плане; φ_1 – вспомогательный угол в плане.

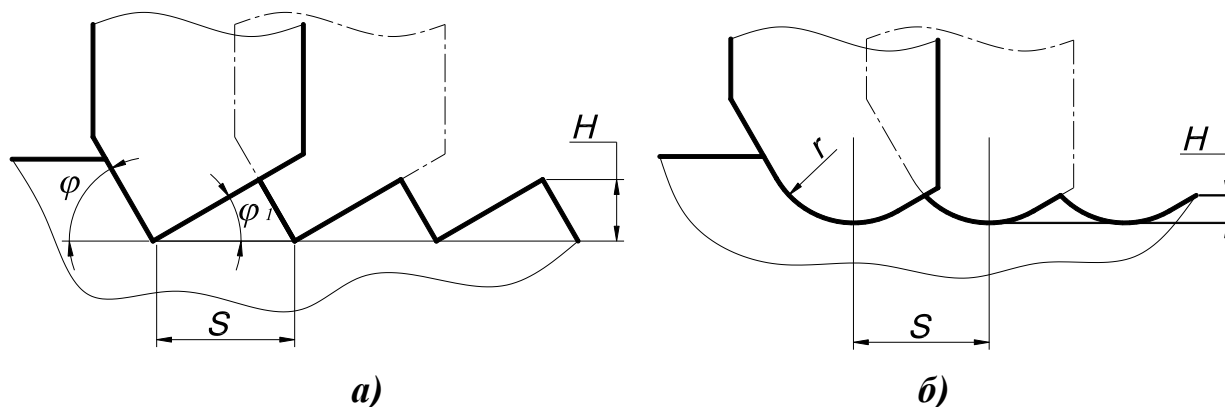


Рисунок 4.2. Схема образования профиля обработанной поверхности: а) при резании лезвием с $r=0$; б) при резании лезвием, когда гребешки образованы целиком радиусным участком режущей кромки

Если профиль поверхности формируется целиком радиусным участком режущей кромки r (рисунок 4.2, б) то расчетная высота неровностей $R_{z\text{ расч}}$ приблизительно равна:

$$R_{z\text{ расч}} = H \approx \frac{s^2}{8 \cdot r}, \quad (4.4)$$

где r – радиус при вершине лезвия, мм.

Формулы (4.3) и (4.4) пригодны для расчета $R_{z\text{ расч}}$ при точении, растачивании, сверлении, зенкерования, строгании и фрезеровании торцевыми фрезами. При фрезеровании цилиндрическими фрезами теоретическая высота неровностей ориентировочно может быть определена как

$$R_{z\text{ расч}} = H \approx \frac{s_z^2}{4 \cdot D}, \quad (4.5)$$

где s_z – подача мм/зуб; D – наружный диаметр фрезы, мм.

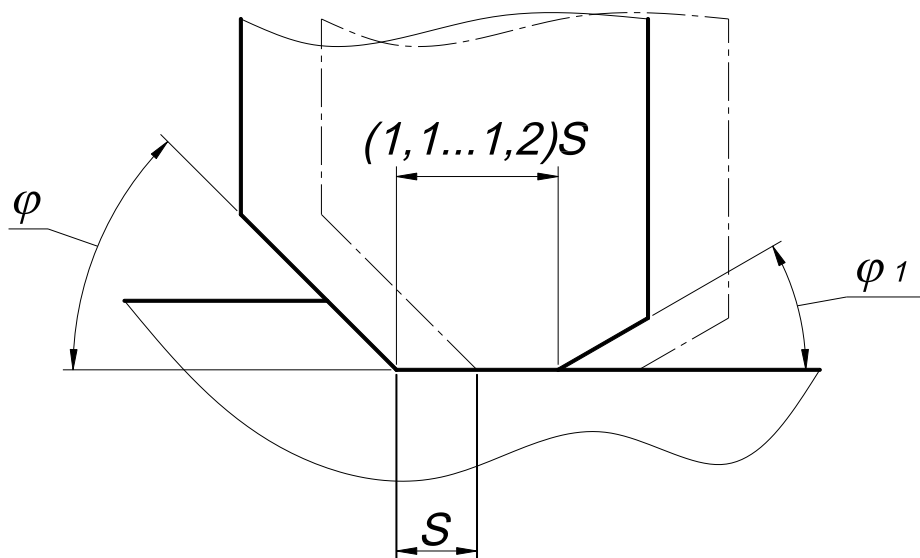


Рисунок 4.3. Схема образования профиля обработанной поверхности при $\varphi_1 = 0$

Расчётные неровности (высота микрогребешков) уменьшаются при уменьшении подачи, углов в плане и увеличении радиуса переходного лезвия. Если на лезвии сделать вспомогательный угол в плане равный нулю, а длину вспомогательной режущей кромки на 10...20 % больше подачи на оборот (при фрезеровании - подачи на зуб), то расчетные неровности образовываться не будут и теоретическая высота неровностей $R_{z\text{ расч}} = 0$. (рисунок 4.3) Расчетная шероховатость становится крайне небольшой также и при значительной величине радиуса при вершине, например, при $R = 6...10$ мм. Однако действительная, реальная шероховатость в любом случае не может достичь нулевых или близких к ним значений, в силу причин, указанных в п. 2.1. В частности, большое значение на увеличение шероховатости по сравнению с расчётным значением имеет пластическое деформирование обрабатываемого материала и возникновение вибраций.

2.3 Действительная шероховатость обработанной поверхности и её зависимость от режимов резания

Форма и высота действительных, реальных, неровностей обработанной поверхности существенно отличаются от их расчётных параметров, хотя определённая взаимосвязь все же имеется. По сравнению с расчётным реальным микропрофиль становится нерегулярным, высота действительных неровностей в области малых и средних значений подач выше расчётной, т. е. $R_z > R_{z\text{расч}}$. Физическая природа этого явления может быть объяснена из следующих представлений (рисунок 4.4).

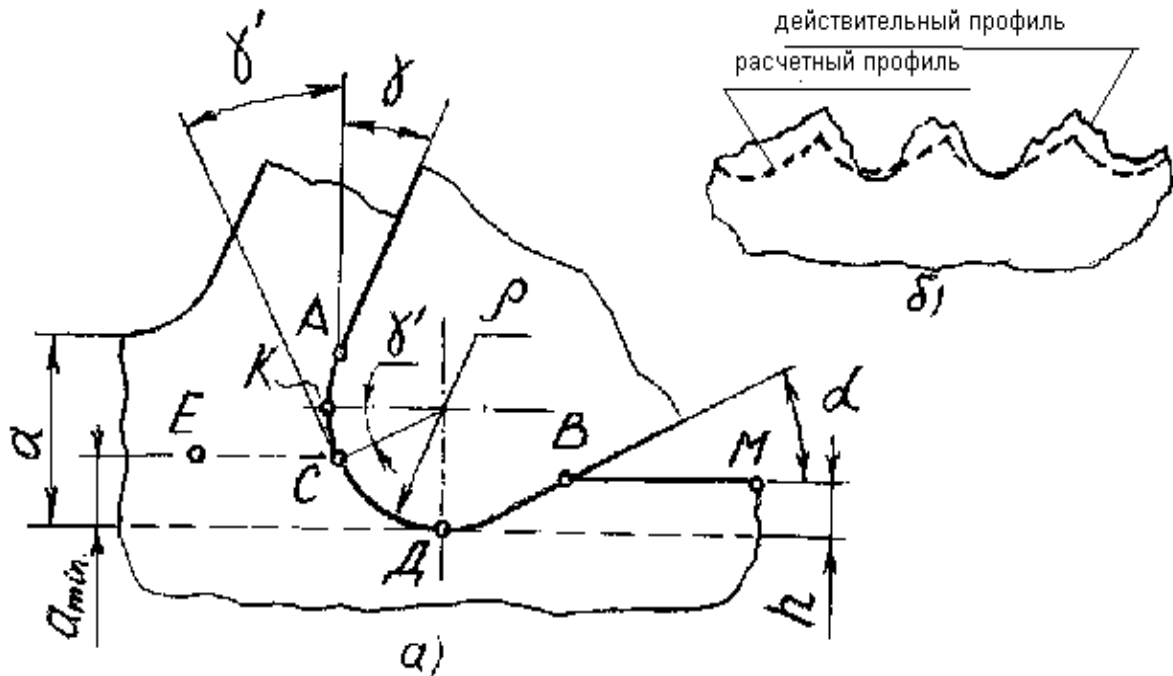


Рисунок 4.4. Схема формирования поверхности округленным лезвием:
 а – схема; б – действительный и расчётный профили обработанной поверхности

Лезвие инструмента, даже тщательно заточенного, не является геометрической линией, а из-за округления представляет собой некоторую поверхность, близкую к цилиндрической, радиусом r . Величина r зависит, прежде всего, от вязкости инструментального материала, зернистости его структуры и изменяется в пределах 7...30 мкм. Величина r характеризует остроту лезвия, от степени которой зависит толщина слоя, снимаемого инструментом с заготовки. При абсолютно остром инструменте, то есть когда $r=0$, срезался бы весь слой толщиной a .

Однако, из-за скруглений режущей кромки и наличия r , лишь часть обрабатываемого материала, расположенного выше линии CE отделяется от заготовки в виде стружки. Другая часть материала, расположенная ниже линии CE и толщина которой a_{min} , из-за больших углов резания не срезается, а подминается инструментом. Поверхность закруглённого участка лезвия CA относится к передней поверхности, а поверхность CD – к задней поверхности. В процессе перемещения участка CD в материале заготовки происходит упругое восста-

новление пластически деформированного, «смятого», слоя a_{\min} до величины h , вследствие чего и образуется обработанная поверхность ВМ. Ясно что эта поверхность представлена на рисунке 4.4 в идеализированном виде (профиль – идеально ровная прямая).

Однако пластическое деформирование металла заготовки и упругое восстановление поверхностного слоя не является одинаковым, равным, для соседних микрообъёмов металла в силу их зернистости и структурной неоднородности. В результате обработанная поверхность имеет действительный профиль, который существенно отличается от расчетного. Причём увеличение величины отдельных расчётных гребешков происходит неравномерно, нерегулярно (рисунк 4.4, б). Искажение расчётного профиля и увеличение высоты отдельных неровностей обусловлено также и трением задней поверхности режущего клина (участок СДВ) об обработанную поверхность заготовки. Металл заготовки за счёт адгезионных явлений и повышенной температуры на поверхностях трения местами наволакивается, наслаивается на расчётные микрогребешки. Возможно также вырывание отдельных микрообъёмов металла с обработанной поверхности и образование микролунок увеличенной глубины.

В общем случае можно считать, что

$$R_z = R_{z\text{ расч}} + \Delta R_z, \quad (4.6)$$

где $R_{z\text{ расч}}$ – расчётная величина гребешков; ΔR_z – приращение высоты неровностей, обусловленное: пластическим течением металла в направлении вершины остаточного гребешка; упругим восстановлением поверхностного слоя; трением задней поверхности инструмента об обработанную поверхность.

Чем выше пластическая деформация металла заготовки в процессе резания, тем больше фактический профиль отличается от реального и тем больше ΔR_z . Уменьшить пластическую деформацию и, следовательно, ΔR_z можно за счёт увеличения переднего угла, уменьшения радиуса при вершине инструмента, увеличением скорости резания и путём повышения твёрдости материала заготовки, например, подвергая её нормализации или улучшению.

Зависимость действительной, фактической шероховатости от скорости резания и подачи носит, как правило, сложный характер (рисунки 4.5, 4.6).



Рисунок 4.5. Зависимость $R_z = f(V)$

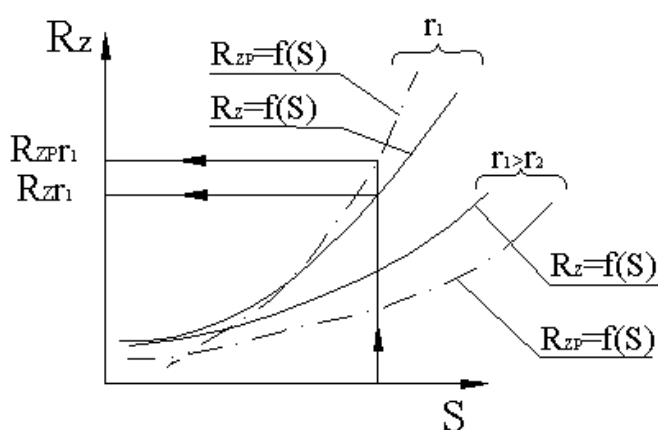


Рисунок 4.6. Зависимость $R_z = f(S)$:

————— действительная шероховатость;
 - - - - - расчётная шероховатость

При изменении скорости резания в диапазоне малых значений, возрастание V вызывает усиление процесса наростообразования и, как следствие, увеличение шероховатости. Однако, начиная с некоторого предела, возросшая скорость существенно увеличивает температуру в зоне резания и условия для наростообразования ухудшаются. При дальнейшем увеличении V нарост вообще не образуется. Это и обуславливает плавное снижение R_z с ростом V после некоторого значения.

Примерный характер зависимости расчётной и действительной шероховатости от подачи представлен на рисунке 4.6. Видно, что в области малых значений подач действительная шероховатость превышает расчётную в силу причин, рассмотренных ранее. В области больших подач, действительная шероховатость может быть ниже расчётной в силу ряда причин, в том числе и из-за несовершенства разработанных теоретических моделей возникновения шероховатости при обработке поверхностей резанием.

Глубина резания на шероховатость обработанной поверхности влияет незначительно.

2.4 Методика измерения шероховатости на микроскопе МИС 11

2.4.1 Прежде чем проводить измерения шероховатости с помощью микроскопа, необходимо выбрать соответствующий комплект объективов. Для этого предварительно ориентировочно определяют диапазон R_z на исследуемом образце с помощью образцов шероховатости.

2.4.2 Выбирают необходимый объектив по таблице 4.1.

Таблица 4.1 Характеристика объективов к микроскопу МИС 11

Предполагаемая шероховатость, мкм	Фокусное расстояние объектива F , мм	Цена деления барабана окуляра f , мкм	Общее увеличение x
R_z 80...10	25,02	0,855	88,5
R_a 2,5...0,63	13,89	0,465	155
R_a 2,5...0,63	8,16	0,280	270
R_a 0,63...0,16	4,25	0,146	517,5

Выбранные по таблице объективы (два одинаковых) вворачивают в тубусы микроскопа.

2.4.3 Устанавливают деталь 1 на предметный столик 2 (рисунок 4.7) и включают освещение. Если деталь цилиндрическая, то деталь устанавливают на призму.

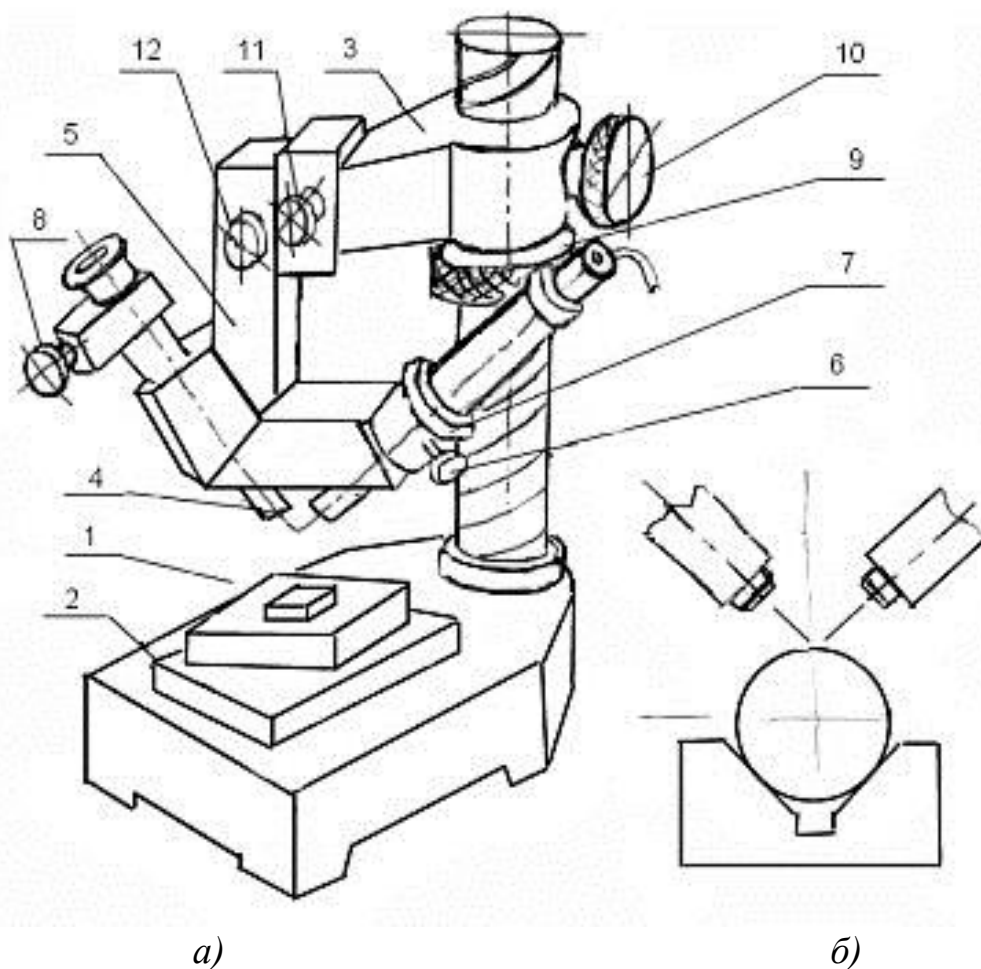


Рисунок 4.7. Микроскоп МИС 11:

а) – схема микроскопа:

1 – измеряемый образец; 2 – столик; 3 – кронштейн; 4 – тубусы с объективами; 5 – кронштейн тубусов; 6 – винт наклона осветительного тубуса; 7 – гайка; 7 – барабан микрометра; 9 – гайка грубой настройки; 10 – стопор; 11 – винт плавной настройки; 12 – микрометрическая подача; б) – схема измерения 8 цилиндрической детали

Поворотом столика 2 относительно кронштейна 3 располагают плоскость тубусов 4 в направлении следов обработки, а сами тубусы – симметрично по отношению к средней линии детали (деталь плоская) или к её наивысшей точке (деталь цилиндрическая). Вертикальным перемещением кронштейна 5 с тубусами необходимо получить в окуляре изображение зелёной полоски – профилограммы. Винтом 6 перевести зелёную полоску в зону резкого изображения неровностей. Сузить профилограмму вращением гайки 7 до минимума, получив её резкое изображение. Если профилограмма разделена на участки тёмными разрывами, следует установить объективы с большим фокусным расстоянием. Если профилограмма представляет почти прямую линию, то устанавливают объективы с меньшим фокусным расстоянием.

2.4.4 Измерить высоту неровностей в следующем порядке:

а) установить одну из линий перекрестия окуляра касательно к профилограмме (линия I-I на рисунок 4.8) поворотом окуляра головки и вращением барабана микрометра;

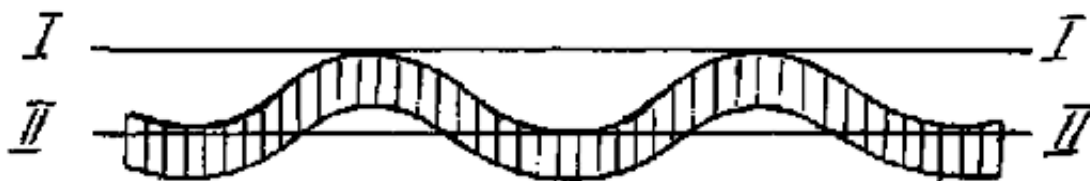


Рисунок 4.8. Схема измерения шероховатости

б) снять отсчёт N_1 , перевести линию в положение II-II и снять отсчёт N_2 по микроскопу. При снятии отсчётов учитывать прохождение нулевого деления шкалы барабанов;

в) подсчитать высоту R_z неровностей по формуле:

$$R_z = f \cdot N, \quad (4.6)$$

где f – цена деления барабана окуляра f микрометра для данного объектива (см. таблицу 4.1), N – высота неровностей в делениях барабана;

г) переместить измеряемый образец в осевом направлении на 3...5 мм и повторить измерения. Выполнить не менее 3 измерений высоты неровностей. Результаты измерений занести в таблицу 4.2. За действительное значение высоты неровностей, на каждом обработанном участке образца, принимать среднее арифметическое из всех измерений.

2.5 Методика исследований зависимости шероховатости от подачи и радиуса при вершине инструмента

В данной лабораторной работе в качестве инструмента при фрезеровании используется резец, по сути, представляющий собой один зуб фрезы, закреплённый во фрезерной оправке.

Фрезерование одиночным резцом позволяет получить более точные зависимости высоты неровностей от режимов резания и геометрии рабочей части инструмента. Если использовать, например, торцевую фрезу со вставными ножами, каждый из которых, по сути, представляет собой резец, то даже при тщательной заточке на образование шероховатостей большое влияние оказывает погрешность положения отдельного ножа в корпусе, неравномерный износ отдельных лезвий и другие причины.

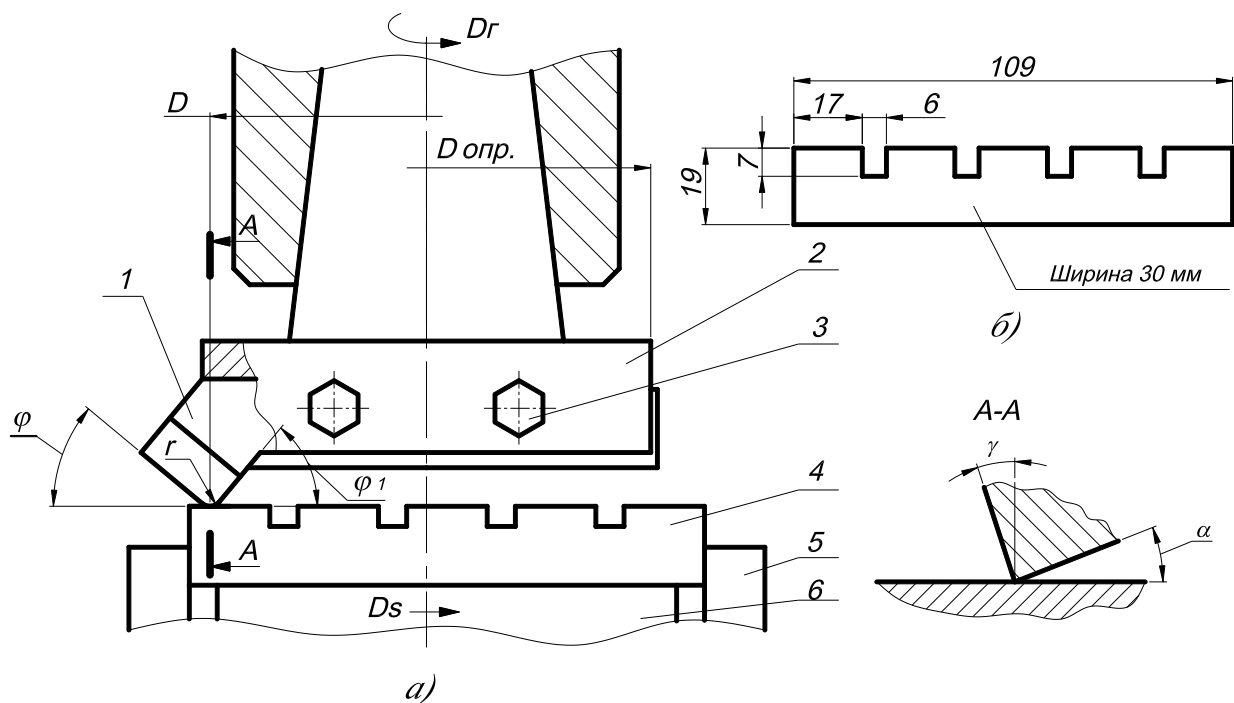


Рисунок 4.9. Фрезерование одиночным резцом:
a – схема фрезерования и геометрические параметры инструмента;
б – размеры заготовки

Схема установки резца в оправке и фрезеруемый образец представлены на рисунке 4.9. Резец 1 закрепляется в оправке болтами 3. таким образом, чтобы его радиусная вершина лежала на диаметре D , примерно равном наружному диаметру фрезерной оправки $D_{\text{опр}}$. Это обеспечивает повышение жёсткости системы резец-оправка и делает влияние вибрации минимальным. Образец 4 зажимают губками тисков 5, предварительно установив на подкладку 6. При этом необходимо следить, чтобы фрезеруемая плоскость образца была параллельна плоскости стола.

В качестве инструмента используются проходные отогнутые резцы с напаянными твёрдосплавными пластинами ВК8. Державка резцов фрезеруется в длину таким образом, чтобы она не выступала за пределы оправки при установке резца на размер D . Вспомогательная вершина резца, которая при данной установке инструмента становится главной, основой (рисунок 4.9), профилируется по радиусу r . При заточке передней и задней поверхностей, а также непосредственно радиусного участка, необходимо обеспечить высокое качество заточки: шероховатость заточенных поверхностей не менее $R_a = 0,63$ мкм, сколы на режущей кромке, даже небольшие, не допускаются. В качестве инструмента при окончательной заточке резца, желательно использовать алмазные круги. Державку в районе радиусной вершины затачивают под задним углом, превышающий задний угол на твёрдом сплаве на $3-5^\circ$, при этом, обращают внимание, чтобы тело державки не соприкасалось с обработанной и обрабатываемой поверхностями на образце.

Фрезеруемый образец представлен на рисунке 4.9, б. Обрабатываемая поверхность разбита поперечными канавками на пять участков. Количество об-

разцов принимается по числу исследуемых значений радиусов при вершине резца. Образцы и участки перед исследованием замаркировать путём кернения.

3. Оборудование, приборы, инструменты

3.1 Вертикально фрезерный станок.

3.2 Проходные отогнутые резцы с твёрдосплавными пластинами ВК8 в количестве 3 шт. со следующими геометрическими параметрами лезвия: $\alpha = 8 \dots 10^\circ$; $\gamma = 0 \dots -3^\circ$; $\varphi = \varphi_1 = 45^\circ$; $r = 0,5; 3; 6$ мм. Требования к качеству заточки см. выше. Заточку перед лабораторной работой осуществляет учебный мастер во внеучебное время.

3.3 Машинные тиски, прокладка, специальная фрезерная оправка.

3.4 Три образца для исследований (эскиз представлен на рисунке 4.9, б). Материал – Ст3, сталь 45. Поверхности должны быть предварительно обработаны по плоскостям и в угол. Образцы и обрабатываемые участки маркировать.

3.5 Микроскоп МИС 11, образцы шероховатости, лупа с 24-кратным увеличением (лупа Бринелля).

4. Порядок выполнения работы

4.1 Измерить с помощью 24-кратной лупы со шкалой, максимально точно для данного способа измерения, радиус при вершине каждого резца. Результаты занести в таблицу (образец – таблица 4.1).

4.2 Оправку установить в шпиндель станка. В оправке закрепить резец с минимальным радиусом $r = 0,5$ мм. В тисках зажать образец под номером 1. Установить частоту вращения шпинделя 500 мин^{-1} , глубину резания $t = 0,5$ мм.

4.3 Фрезеровать последовательно участки образца от первого до пятого на следующих подачах в минуту: участок № 1 – подача $s_m = 20$ мм/мин; № 2 – 50 мм/мин; № 3 – 80 мм/мин; № 4 – 125 мм/мин; № 5 – 160 мм/мин. Остановку продольного движения станка переключение подач производить в момент полной обработки предыдущего участка и выхода радиусной вершины в разделительную канавку.

4.4 Снять фрезерованный образец, установить новый. Заменить первый резец на второй, с радиусной вершиной $r = 3$ мм. Фрезеровать участки образца № 2 в той же последовательности и на тех же подачах, что и в предыдущем пункте.

4.5 Повторить все операции, представленные в п. 4.3 и 4.4 для резцов $r = 6$ мм.

4.6 Измерить шероховатость обработанных участков на образцах на микроскопе МИС 11. Методика измерения изложена в п. 2.4. Измерение высоты микронеровностей на каждом фрезерованном участке проводить не менее трёх раз. Результаты занести в таблицу (образец – таблица 4.2).

5. Оформление отчёта

5.1 Указать наименование работы, дать формулировку её целей и задач.

5.2 Указать тип станка и его обозначение.

5.3 Указать материал образцов для экспериментов.

5.4 Выполнить эскиз головки резца с простановкой конкретных величин геометрических параметров.

5.5 Представить данные о микроскопе: модель, увеличение объективов, цена деления барабанов окуляра, использованных при измерении шероховатости.

5.6 Оформить исходные данные и результаты экспериментов в виде таблицы 4.2. Расчётную шероховатость R_{zp} определить по формуле (4.4). Предварительно пересчитать минутную подачу s_m в подачу на оборот s_o по формуле:

$$s_o = \frac{s_m}{n} \text{ мм/об,} \quad (4.7)$$

где n – частота вращения шпинделя, мин^{-1} .

Сами расчёты представить в отчёте.

Таблица 4.2. Результаты измерений и расчётов

№ образца	№ участка	r, мм	s_o , мм/об	R_{z2} мкм			$R_{zcp.}$ мкм	$R_{zрасч.}$ мкм
				1	2	3		
1	1	0,5						
	2							
	3							
	4							
	5							
2	1	3						
	2							
	3							

Значения n , t , V , которые являются постоянными для всех экспериментов, записать под таблицей. Скорость резания V подсчитать по формуле:

$$V = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \text{ м/мин,} \quad (4.8)$$

где D – диаметр, на котором расположена вершина резца, мм.

5.7 Используя данные таблицы 4.2 построить графические зависимости действительной и расчётной шероховатости от подачи на оборот, т. е. $R_z = f_1(s_o)$ и $R_{zp} = f_2(s_o)$.

Для построения данных зависимостей по оси ординат в выбранном масштабе откладывают значения $R_{zcp.}$, соответствующие конкретным значениям подач s_o . Поддачи откладывают в своём масштабе по оси абсцисс. На пересечении линий получают экспериментальные точки. Используя метод графического сглаживания неизбежного разброса экспериментальных данных, строят «сглаженные», плавные, кривые. Поскольку в экспериментах использованы три значения радиуса r , то, соответственно, будет получено две кривые для каждого значения r . От каждой кривой сделать выноски и на ней указать, при каком значении r она получена.

5.8 Используя полученные графические зависимости (см. п. 5.7) построить графики зависимости действительной и расчетной шероховатости от радиуса при вершине резца: $R_z = f_3(r)$; $R_z = f_4(r)$. Для этого на полученных графических зависимостях $R_z = f_1(s_0)$ и $R_{zp} = f_2(s_0)$ провести вертикальные линии от значений подач, соответствующих $S_m = 20$ мм/мин; 80 мм/мин; 160 мм/мин до их пересечения с графиками $R_z = f_1(s_0)$ и $R_{zp} = f_2(s_0)$ (рисунок 4.6). Для каждого конкретного значения радиуса при вершине r будет получено по три значения R_z и R_{zp} . Используя эти значения построить в выбранном масштабе графические зависимости $R_z = f_3(r)$ и $R_{zp} = f_4(r)$. По оси ординат откладывать значения R_z .

5.9 Дать краткое объяснение полученных графических зависимостей используя материалы п.2 и литературу /1, 2, 3, 8/.

6. Контрольные вопросы

6.1 Что такое шероховатость поверхности и какими высотными параметрами её характеризуют?

6.2 Что такое расчётная и действительная шероховатость поверхности. В чём их различие и чем оно обусловлено?

6.3 Почему действительная шероховатость на малых подачах существенно превышает шероховатость расчётную?

6.4 Каким образом шероховатость обработанной поверхности зависит от скорости резания?

6.5 Каким образом шероховатость зависит от величины подачи?

6.6 Какие существуют методы измерения шероховатости и какова их точность.

6.7 Объясните полученные экспериментальные зависимости действительной и расчётной шероховатостей от величины подачи и радиуса при вершине инструмента.

Лабораторная работа № 5

Исследование геометрических параметров спирального сверла в статической и кинематической системах координат

1 Цель и задачи работы

Цель работы: изучение конструкции спирального сверла; получение практических умений и навыков измерения статических углов заточки; выявления закономерности изменения статических и кинематических углов вдоль режущей кромки.

В задачи работы входит:

- ознакомление с конструкцией спирального сверла, с терминами и обозначениями конструктивных элементов по нормативным документам;
- ознакомление со статической и кинематической системами координат применительно к спиральным сверлам;
- измерение геометрических параметров сверла;

– расчет кинематических углов резания.

2 Конструкция спирального сверла и его геометрические параметры

2.1 Конструктивные элементы спирального сверла

Сверло – осевой режущий инструмент для образования отверстий в сплошном материале и увеличения диаметра имеющегося отверстия (ГОСТ 25751-83). Наиболее распространенной разновидностью сверл является спиральное сверло (рисунок 5.1). Рабочая часть сверла делится двумя винтовыми канавками на два лезвия (пера). На рисунке 5.1 представлены основные конструктивные элементы спирального сверла согласно ГОСТ 25762-83. Назначение данных элементов рассмотрено в литературе [4, 6].

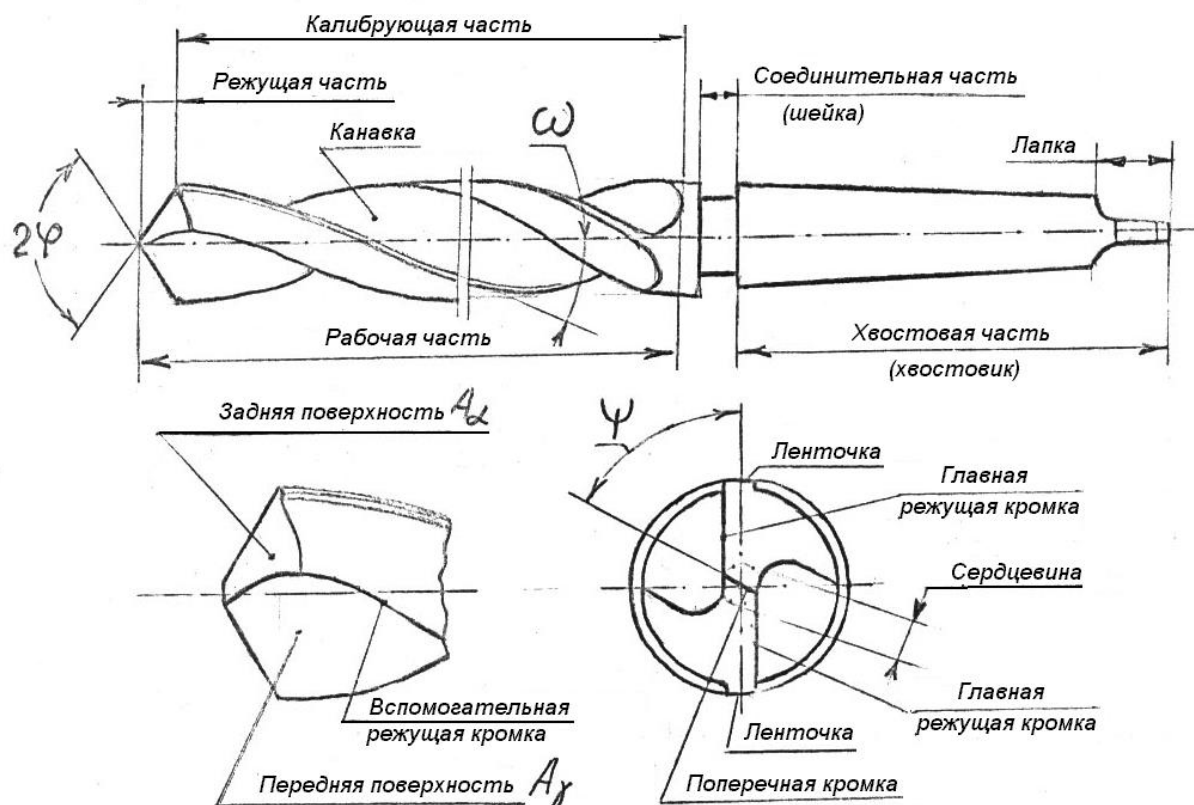
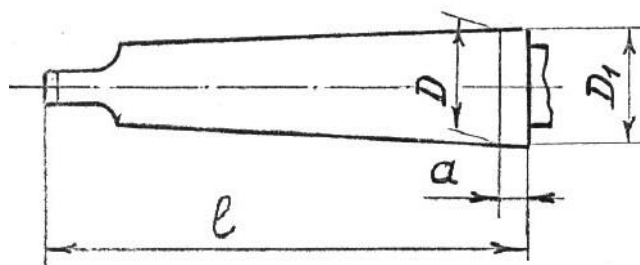


Рисунок 5.1. Конструктивные элементы спирального сверла

Рабочая часть спиральных стальных сверл изготавливается из быстрорежущих сталей, например, Р6М5 или легированной инструментальной стали 9ХС. С целью экономии материала хвостовая часть сверл из быстрорежущей стали диаметром более 6...8 мм изготавливается из сталей 45 или 40Х и приваривается методами стыковой сварки к рабочей части. Сверла меньшего диаметра выполняются цельными. После термообработки твердость рабочей части составляет HRC 60...65, твердость хвостовика – HRC 45...50.

Спиральные сверла могут так же оснащаться твердым сплавом, например, BK8, BK10.

Хвостовик может быть цилиндрическим, для сверл диаметром 0,1...20 мм, и коническим (с конусом Морзе), для сверл диаметром свыше 6...8 мм. Размеры наружных конусов Морзе для сверл представлены на рисунке 5.2 (см. так же ГОСТ 25557-82).



Обоз-на-чение	D	D_1	a	l
0	9,045	9,2	3	59,5
1	12,065	12,2	3,5	65,5
2	17,780	18	5	80
3	23,825	24,1	5	99
4	31,267	31,6	6,5	124
5	44,399	44,7	6,5	156
6	63,348	63,8	8	218

Рисунок 5.2. Размеры наружных конусов Морзе

2.2 Геометрические параметры спирального сверла в статической системе координат

Для сверл, в отличие от резцов, инструментальная и статическая системы координат совпадают полностью, поскольку и при изготовлении сверла, и при его эксплуатации, т. е. непосредственно в процессе сверления заготовок, принятое и фактическое направление вектора скорости резания, относительно которого ориентируют основную плоскость, остаётся одним и тем же, касательным к траектории вращательного движения (см. лабораторную работу № 1). В связи с этим статические параметры сверла можно одновременно считать инструментальными (и наоборот).

На рисунке 5.3 представлены статические углы и плоскости спирального сверла (см. так же ГОСТ 25762-83).

Статическая основная плоскость P_{VC} перпендикулярна вектору скорости главного движения V , который направлен по касательной к траектории вращательного движения сверла.

Статическая плоскость резания P_{nc} является касательной к режущей кромке и перпендикулярна основной плоскости P_{VC} .

Статическая главная секущая плоскость P_s перпендикулярна линии пересечения плоскостей P_{VC} и P_{nc} .

Рабочая плоскость P_s содержит вектор скорости резания V и вектор подачи V_s и перпендикулярна основной плоскости P_{VC} .

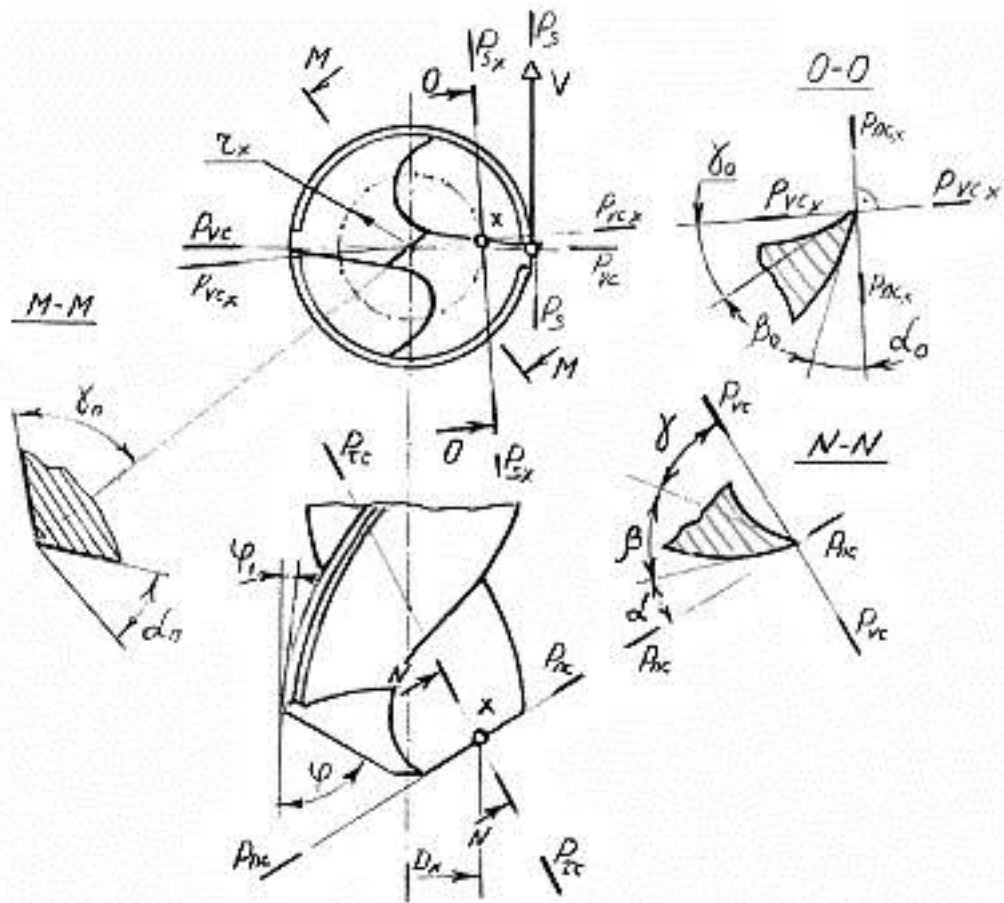


Рисунок 5.3. Статические плоскости и углы спирального сверла

Сверло характеризуется следующими основными углами: передним углом γ , задним углом α , углом наклона винтовой канавки ω , углом наклона поперечной кромки ψ , углом в плане φ (углом при вершине сверла 2φ), вспомогательным углом в плане φ_1 (обратной конусностью) (рисунок 5.3).

Угол наклона винтовой канавки ω – это угол между касательной к винтовой линии канавки и осью сверла.

Поверхность канавки на сверле представляет сложную винтовую поверхность, часть из которой и является, собственно, передней поверхностью режущего лезвия. Из рисунка 5.4, а видно, что передняя поверхность представляет собой винтовую поверхность, которая получена в результате винтового перемещения прямой линии 1 (по сути – режущей кромки) наклоненной к оси сверла под углом φ , по направляющему цилиндру диаметром D_c (диаметр сердцевины). Такая форма передней поверхности позволяет в любом сечении, выполненном под углом φ к оси сверла, гарантировать прямолинейность режущей кромки.

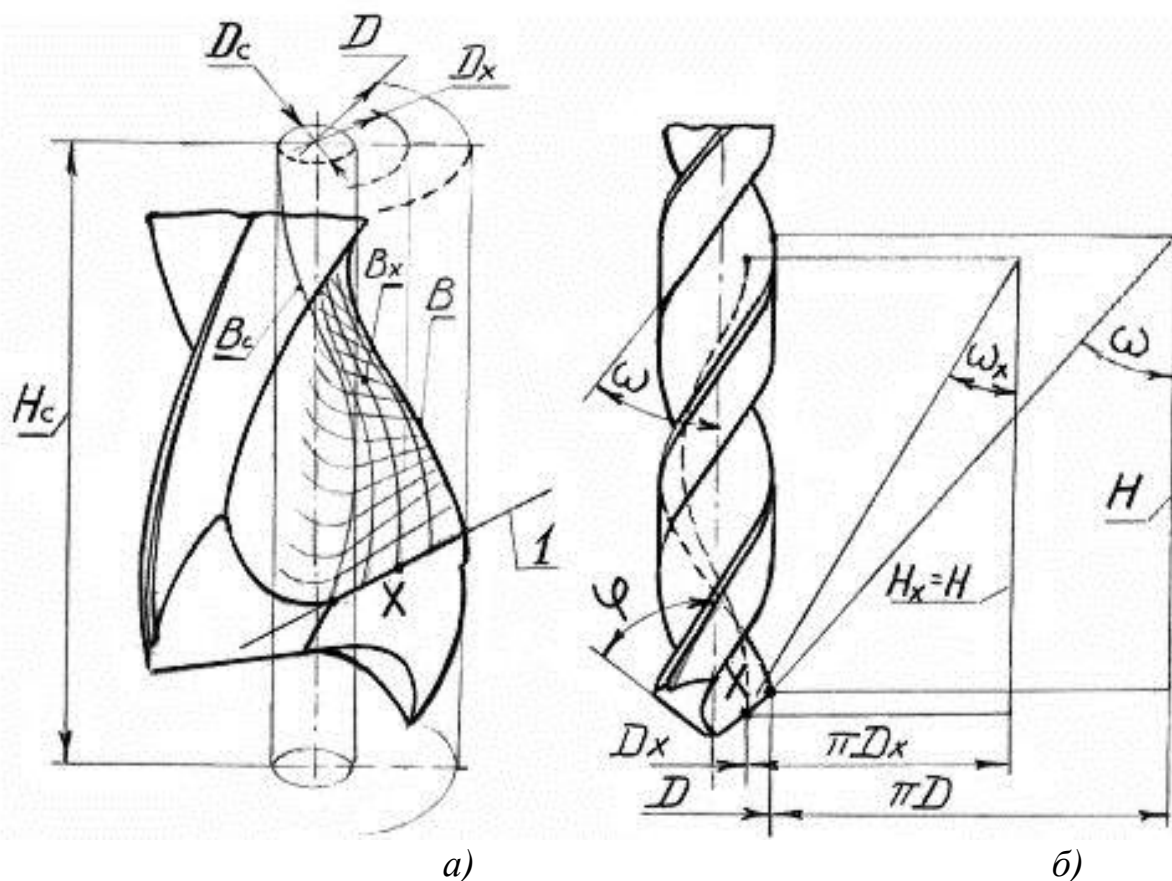


Рисунок 5.4. Схема формообразования передней поверхности и винтовой канавки спирального сверла:
а – схема формообразования; *б* – развертка винтовых линий на плоскость

С другой стороны, передняя поверхность может быть представлена как семейство винтовых линий, у которых одинаковый шаг H и различный диаметр цилиндра, на котором они построены. Так, например, винтовая линия B_c (рисунок 5.4, *а*) построена на цилиндре диаметром D_c и имеет шаг H . Винтовые линии B_x и B построены на цилиндрах диаметрами D_x и D соответственно и имеют тот же шаг H , что и линия B_c , но с некоторым смещением по оси сверла. Если развернуть линии B_x и B на плоскость, то имеем схему на рисунке 5.4, *б*. Видно, что угол наклона винтовых линий ω не является постоянным для различных точек режущей кромки. Чем ближе точка к вершине сверла, тем ω меньше.

Для произвольной точки кромки X имеем:

$$\operatorname{tg} \omega_x = \frac{\pi \cdot D_x}{H}, \quad (5.1)$$

где D_x – диаметр, на котором расположена точка; H – шаг винтовой линии.

На чертежах угол ω задается для винтовой линии, проходящей через периферийную точку режущей кромки, когда $D_x = D$. То есть:

$$\operatorname{tg} \omega = \frac{\pi \cdot D}{H}. \quad (5.2)$$

Величина ω для каждой конкретной точки режущей кромки одновременно является и величиной переднего угла в осевом сечении для этой же точки (см. ниже пояснения по переднему углу и рисунок 5.5). С увеличением угла ω т. е., по сути, переднего угла γ_0 , уменьшается степень пластического деформирования материала заготовки в процессе стружкообразования. Следовательно, уменьшается крутящий момент и усилие подачи на сверле. Однако при большом угле наклона винтовой канавки жесткость сверла в осевом направлении и прочность лезвия на его периферии уменьшается; увеличивается путь стружки по канавке, становится более вероятным её упор в противоположную стенку канавки, что увеличивает силу трения и температуру в зоне резания.

Для серийно выпускаемых сверл диаметром до 10 мм принимают $\omega = 25 \dots 28^\circ$; для сверл с большим диаметром – $\omega = 30 \dots 35^\circ$. Сверла специальные, предназначенные для сверления вязких материалов (алюминий, медь), изготавливают с углом $\omega = 35 \dots 40^\circ$. Для обработки материалов малопластичных, образующих стружку надлома (чугун, бронза) применяют сверла с $\omega = 10 \dots 15^\circ$.

Главный угол в плане ϕ – это угол между режущей кромкой и линией, параллельной оси сверла (см. рисунок 5.1). Обычно на чертеже сверла указывают не угол ϕ , а угол 2ϕ – угол при вершине конуса. Угол ϕ или, соответственно, 2ϕ измеряется в плоскости, проходящей через ось сверла и параллельной режущим кромкам. Как и у проходных резцов, угол ϕ влияет на форму и площадь сечения стружки, длину режущей кромки и, тем самым, на составляющие силы резания. При увеличении ϕ длина режущей кромки уменьшается, толщина стружки растёт, осевая составляющая силы резания растёт, увеличивается износ режущей кромки.

В зависимости от свойств обрабатываемого материала $2\phi = 80 \dots 140^\circ$. При сверлении сталей $2\phi = 116 \dots 120^\circ$.

Вспомогательный угол в плане ϕ_1 образуется за счет того, что рабочая часть сверла имеет обратную конусность, то есть наружный диаметр сверла изменяется от вершины к хвостовику. Например, для сверл диаметром 18 мм и более это уменьшение составляет 0,05...0,12 мм на 100 мм длины. В угловой мере $\phi_1 = 10' \dots 20'$.

В случае необходимости ϕ_1 не измеряют, а рассчитывают:

$$\operatorname{tg} \phi_1 = \frac{D - D'}{2l}, \quad (5.3)$$

где D – наружный диаметр сверла у его режущей части; D' – диаметр сверла в сечении, отстоящем от режущей части на 1 мм; для расчета удобно принимать $l = 100$ мм.

Угол наклона поперечного лезвия перемычки Ψ – угол между проекциями поперечной и одной из главных режущих кромок на плоскость, перпендикулярную оси сверла. Обычно $\Psi = 55^\circ$.

Статический главный передний угол γ_c (или просто γ) – угол в статической главной секущей плоскости $P_{\tau c}$ между передней поверхностью лезвия и статической основной плоскостью P_{vc} (сечение N-N) (рисунок 5.3). Для сверл различают так же передний угол γ_o в сечении, параллельном оси сверла (сечение O-O).

Передний угол, как в главной секущей плоскости, так и в осевом сечении, не является одинаковым для разных точек режущей кромки. Это обусловлено тем, что передняя поверхность режущего лезвия представляет собой поверхность винтовой канавки, представляющей собой совокупность винтовых линий (рисунок 5.4, а). В связи с этим величина переднего угла γ определяется параметрами этой винтовой канавки. Поскольку через каждую точку режущей кромки проходит своя винтовая линия, имеющая свой угол ω (рисунок 5.4, б), причем с приближением точки к оси сверла ω уменьшается, то и угол γ уменьшается вдоль режущей кромки от периферии к вершине сверла.

Передний угол γ в главной секущей плоскости (сечение N-N) для любой точки кромки X может быть определен следующим образом:

$$\operatorname{tg} \gamma_x = \frac{D_x}{D} \cdot \frac{\operatorname{tg} \omega}{\sin \varphi}, \quad (5.4)$$

где D_x – диаметр окружности, на которой расположена точка X; D – диаметр сверла; ω – угол наклона винтовой канавки (на периферии); φ – главный угол в плане.

Наибольшее значение γ и γ_o имеют для периферийной точки режущей кромки, т. е. когда $D_x = D$. Причем передний угол в осевой плоскости для этой точки может быть примерно измерен угломером. Как видно из рисунка 5.5

$$\gamma_o = \omega.$$

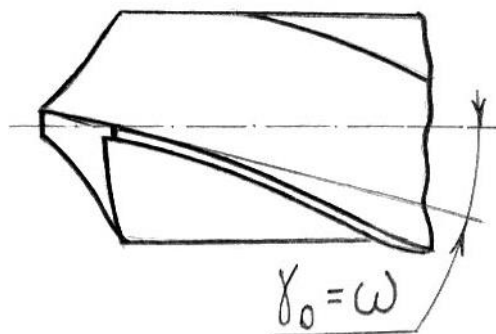


Рисунок 5.5. Схема определения переднего угла

У стандартных сверл передний угол для периферийных точек режущей кромки достигает $30...35^\circ$.

Чем ближе к вершине сверла, тем передний угол меньше и у самой поперечной кромки принимает отрицательные значения. На самой же поперечной кромке передний угол может достигать -60° (см. сечение М-М на рисунке 5.3), что затрудняет нормальный процесс резания для этой режущей кромки. Фактически поперечная режущая кромка не режет, а пластически деформирует и скоблит материал заготовки. Статический передний угол на чертежах не задается, так как он целиком определен параметрами винтовой канавки. Но этот угол необходим для расчета кинематических передних углов.

Статический главный задний угол α_c (или просто α) – это угол в статической главной секущей плоскости $P_{\tau c}$ между задней поверхностью и статической плоскостью резания P_{nc} (сечение N-N).

Статический задний угол в осевом сечении α_0 задается в так называемой осевой плоскости O-O, касательной к образующей цилиндра радиуса r_x , рассекающего лезвие в данной точке. Ось секущего цилиндра совпадает с осью сверла (рисунок 5.3).

Схема образования задних углов в цилиндрических сечениях представлена на рисунке 5.6.

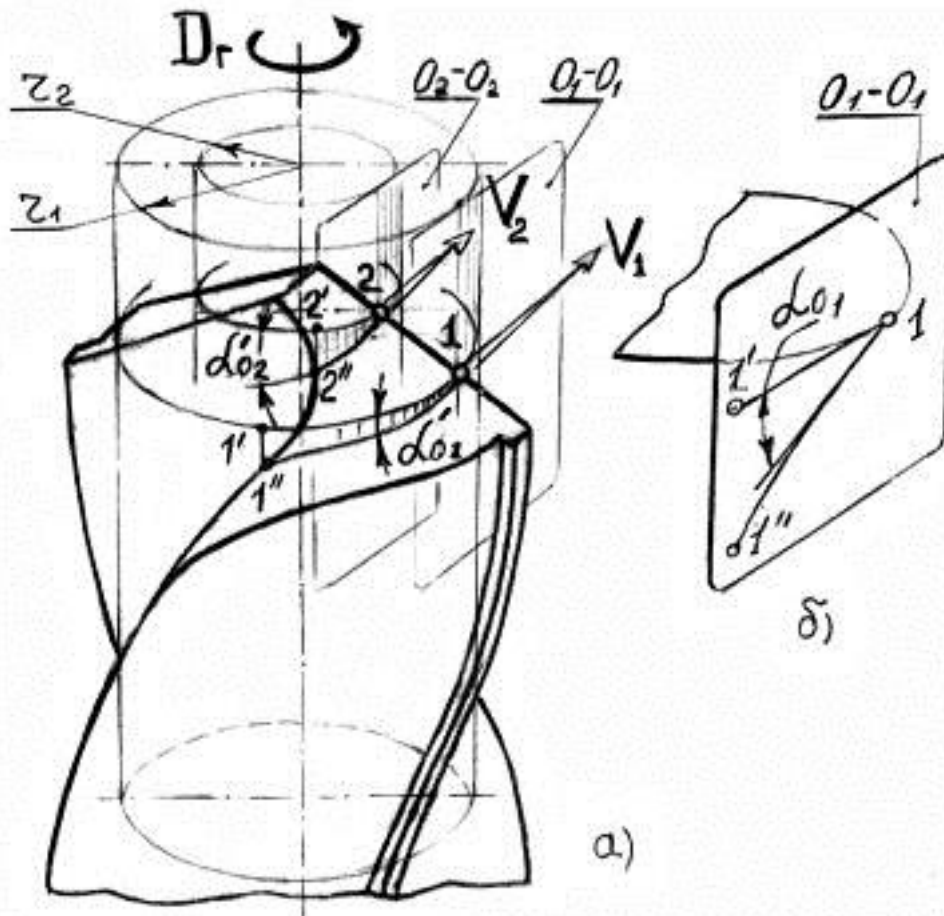


Рисунок 5.6. Схема образования статических задних углов в осевых сечениях:

a – схема образования углов; *б* – развёртка на плоскость

Если рассечь заднюю поверхность лезвия цилиндром, например, радиусом r_1 , то он пересечет режущую кромку в точке 1, а заднюю поверхность лезвия по кривой 1-1". Если теперь провести через точку 1 плоскость, перпендикулярную оси сверла, то получим дугу пересечения данной плоскости и цилиндра 1-1'. Угол α_{o_1} , заключенный между линиями 1-1' и 1-1", и является задним углом в цилиндрическом сечении. При развертке линий 1-1' и 1-1" на плоскость O_1-O_1 , параллельной оси сверла и касательной к цилиндру по образующей, проходящей через точку 1, получают задний угол в осевом сечении α_{o_1} (рисунок 5.6, б). При развертке линия 1-1" может быть, как прямой (при заточке задней поверхности как поверхности винтовой), так и кривой (заточка по плоскости, по конусу, по цилиндру). Во втором случае задние углы измеряются от касательной, проведенной в точке 1 к этой линии.

Между углами α_o и α существует зависимость:

$$\operatorname{tg} \alpha_o = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\sin \varphi} \quad (5.5)$$

Поскольку передний угол γ уменьшается вдоль режущей кромки от периферии к центру (см. выше), то для получения примерно одинакового угла заострения β для всех точек кромки, что обеспечит равнопрочность лезвия в любом сечении, желательно, чтобы задний угол изменялся обратно по отношению к переднему. То есть необходимо, чтобы с приближением к вершине резца статический задний угол увеличивался. Это достигается заточкой задней поверхности определенным образом. В результате задний угол α_o изменяется вдоль режущей кромки, в зависимости от диаметра сверла, от $8 \dots 14^\circ$ у периферии до $20 \dots 25^\circ$ у сердцевины. Изменение передних и задних углов, а также углов заострения вдоль режущей кромки представлено на рисунке 5.7.

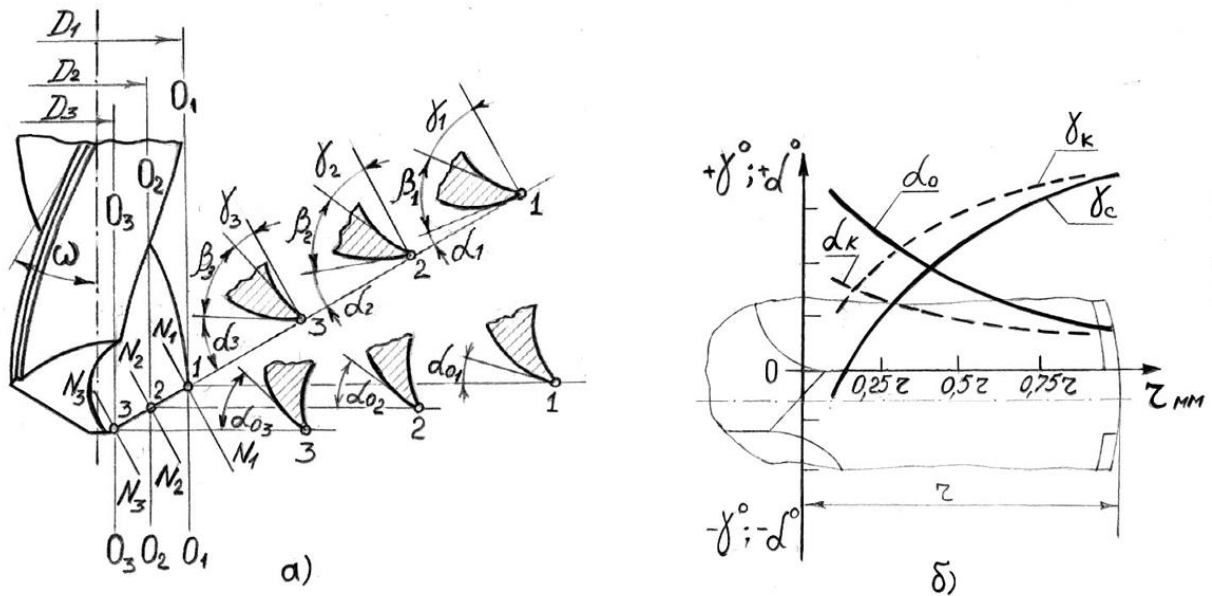


Рисунок 5.7. Изменение передних и задних углов и углов заострения в плоскостях N-N и O-O:

a – значения углов α , γ , β для различных точек режущей кромки; *b* – характер изменения статических и кинематических углов вдоль режущей кромки

2.3 Геометрические параметры спирального сверла в кинематической системе координат

В процессе сверления сверлу сообщается одновременно два движения: вращение вокруг оси (главное движение скорости резания D_r) и поступательное перемещение вдоль оси (движение подачи D_s). В связи с этим суммарный вектор V_e не совпадает с вектором главного движения V и отклоняется от него на угол η (см. так же лабораторную работу № 1, п. 2.2.3). Это означает, что траекториями движений точек режущей кромки являются не окружности, что подразумевается в статической системе координат, а винтовые линии, которые в совокупности образуют винтовую поверхность, которая и представляет собой поверхность резания (рисунок 5.8). Для наглядности шаг винтовой поверхности резания существенно увеличен, в действительности он равен величине подачи S , мм/об.

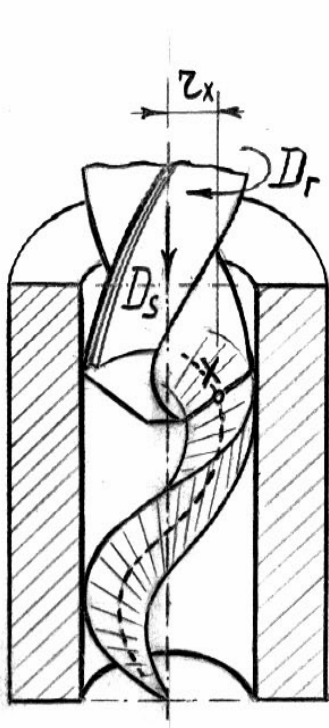


Рисунок 5.8. Поверхность резания при сверлении

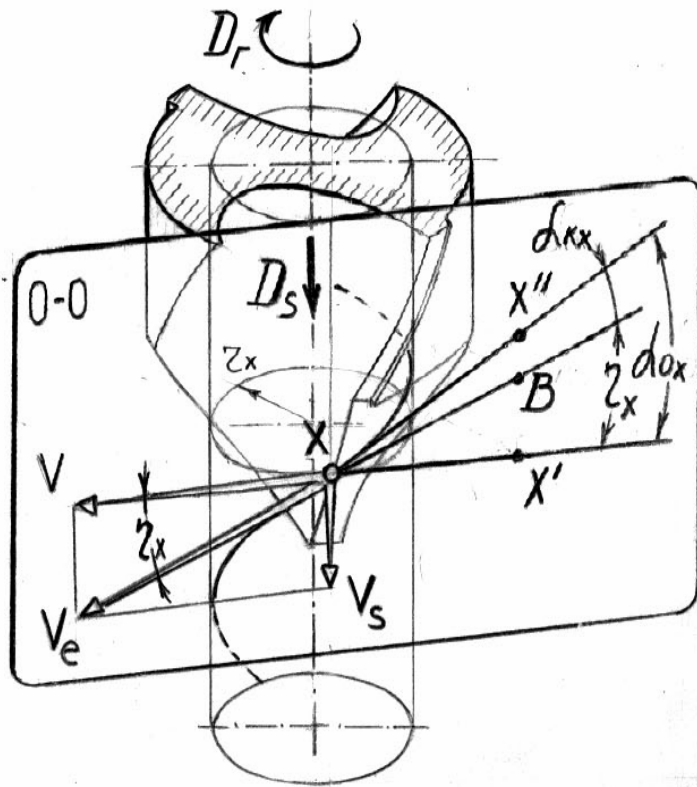


Рисунок 5.9. Схема к определению кинематического заднего угла при сверлении

Суммарный вектор V_e для какой-то точки режущей кромки X направлен по касательной к винтовой траектории её перемещения (рисунок 5.9). Если провести плоскость $O-O$ касательно к секущему цилиндру радиусом r_x по образующей, проходящей через точку X , развернуть на эту плоскость часть винтовой траектории точки (прямая XB), след пересечения цилиндром задней поверхности и построить к следу касательную (прямая XX''), дугу окружности r_x (прямая XX') – то полученные при этом углы будут связаны следующим образом:

$$\alpha_{кx} = \alpha_{ox} - \eta_x, \quad (5.6)$$

где $\alpha_{кx}$ – кинематический задний угол; α_{ox} – статический задний угол в осевом сечении; η_x – угол между вектором скорости главного движения и вектором подачи.

Угол η_x по сути равен углу подъема винтовой линии (на цилиндре диаметром $D_x = 2r_x$). Данная винтовая линия есть траектория перемещения точки режущей кромки X в процессе вращательного и поступательного движения сверла (рис. 5.8). За один оборот сверло перемещается вдоль оси на величину подачи S , мм/об. В результате на цилиндре диаметром D_x точка X опишет винтовую линию с шагом S . Развертка винтовой линии на плоскость представлена на рисунке 5.10.

Из рисунка видно, что

$$\operatorname{tg} \eta_x = \frac{S}{\pi \cdot D_x} \quad (5.7)$$

Анализ формулы показывает, что чем меньше диаметр D_x , на котором лежит точка режущей кромки, и чем больше подача S , мм/об, тем выше значение η . При большой подаче и малом D_x величина η может быть достаточно большой и существенно уменьшить кинематический угол α_k , особенно для точек кромки вблизи поперечной перемычки. Нормальный процесс резания будет нарушен.

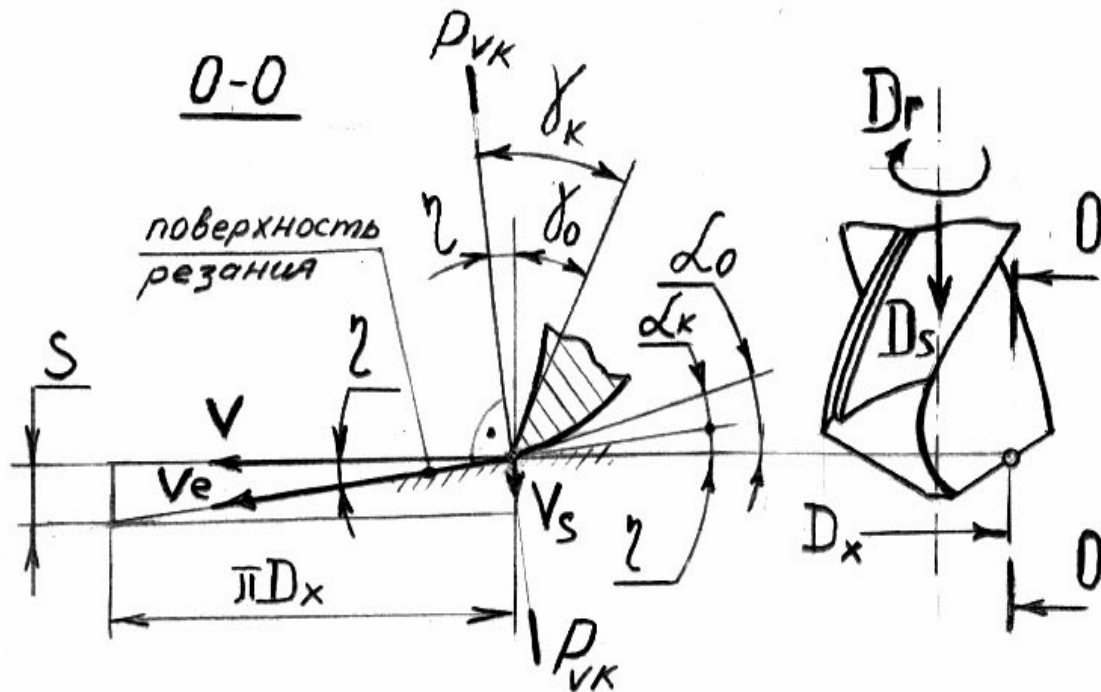


Рисунок 5.10. Кинематические углы в процессе сверления

Для сохранения приемлемого значения α_k для точек кромки с малыми значениями D_x , статический задний угол α (угол заточки) делают переменным вдоль режущей кромки, увеличивая его от периферии к вершине сверла (рисунок 5.7). Достигается это специальными методами заточки.

Передний кинематический угол γ_k , в отличие от заднего, в процессе сверления не уменьшается, а увеличивается (рисунок 5.10):

$$\gamma_{kx} = \gamma_{ox} + \eta_x \quad (5.8)$$

где γ_{ox} – статический передний угол в осевом сечении.

Характер изменения кинематических передних и задних углов показан на рисунке 5.7, б пунктирными линиями.

3 Оборудование, приборы, инструменты

3.1 Спиральные сверла со стандартной заточкой диаметром 25...35 мм.

- 3.2 Универсальный угломер.
- 3.3 Микрометры гладкий и резьбовой.
- 3.4 Штангенциркуль и линейка.
- 3.5 Приспособление для измерения задних углов сверл.

4 Порядок и методика выполнения работы

4.1 Ознакомиться на образцах с различными конструкциями сверл. Обратить внимание на конструктивные элементы и геометрические параметры, отличающие конструкции сверл друг от друга (форма хвостовика, количество режущих кромок, угол при вершине, угол наклона винтовой канавки и др.).

4.2 Измерить конструктивные и геометрические параметры заданного сверла. Результаты измерений и расчетов занести в таблицу (образец – таблица 5.1).

Таблица 5.1. Результаты измерений сверла

Номинальный диаметр сверла $D_{ном}$, мм	Диаметр сверла у режущей части D , мм	Диаметр сверла на расстоянии 100 мм от режущей части D' , мм	Обратная конусность на 100 мм длины $D-D'$	Вспомогательный угол в плане φ_1	Угол при вершине 2φ	Угол наклона винтовой канавки ω	Угол наклона поперечной кромки ψ	Диаметр сердцевинки у режущей части d_c , мм	Диаметр сердцевинки на расстоянии 100 мм от режущей части d'_c , мм

Величина утолщения сердцевинки на 100 мм длины $d_c-d'_c$	Длина сверла L , мм	Длина рабочей части l_0 , мм	Ширина ленточки f , мм	Высота ленточки h , мм	Длина шейки $l_{ш}$, мм	Диаметр шейки $d_{ш}$, мм	Максимальный диаметр хвостовика и его номер конуса	Длина лезвий: правого – $l_{л.пр.}$; левого – $l_{л.лев.}$	Маркировка

Наружные диаметры и линейные размеры измеряются штангенциркулем. Вспомогательный угол в плане φ_1 рассчитывают, согласно измерениям, по формуле (5.3).

Углы 2φ и ψ измеряют универсальным угломером.

Определить угол наклона винтовой канавки ω можно прокатыванием сверла через копировальную бумагу. Величину ω измеряют транспортиром между линией, отпечатавшейся от прокатки ленточки, и линией, параллельной оси сверла (перпендикулярной торцу развертки). Угол ω может быть определен так же по формуле (5.2). Результаты измерений и расчета необходимо сравнить.

Толщину сердцевины d_c и d'_c измеряют с помощью микрометра со специальными вставками или кронциркулем.

Номер конуса Морзе хвостовика определяют, согласно измерениям, по таблице на рисунке 5.2.

4.3 Измерить задние углы в статической системе координат

Как правило, задняя поверхность имеет криволинейный характер (за исключением заточки сверла по плоскости), в связи с чем, точное измерение задних углов с помощью угломеров невозможно. Определение задних углов для сверл в различных точках режущей кромки осуществляется с помощью специального приспособления. Приспособление не позволяет измерять углы непосредственно, а лишь дает исходные данные для последующего расчета углов.

На рисунке 5.11 представлена схема к измерению необходимых величин для расчета задних углов в произвольной точке X режущей кромки, расположенной на расстоянии $D_x/2$ от оси.

Пусть измерительная ножка индикатора установлена с некоторым натягом перпендикулярно задней поверхности в точке X , то есть лежит в нормальной плоскости $N-N$. При повороте сверла вокруг своей оси на некоторый угол τ_x , ножка индикатора, постоянно упираясь в заднюю поверхность и описывая по ней кривую XX'' , опустится по нормали к задней поверхности в точку X''' . (Пояснение: схема представлена таким образом, что вращается не сверло, а, условно, индикатор. Однако, исходя из относительности движения, это не меняет сути измерений).

Величина отрезка $X'X'''$, обозначенная на схеме K_{Nx} – это есть перемещение ножки индикатора, которое может быть считано с его шкалы.

Отрезок XX' – это путь, который проходит ножка индикатора в круговом относительном движении при повороте сверла на угол τ_x . Из схемы очевидно, что XX' является дугой окружности диаметром D_x и с центральным углом τ_x .

$$XX' = \frac{\pi \cdot D_x \cdot \tau_x}{360^\circ} \quad (5.9)$$

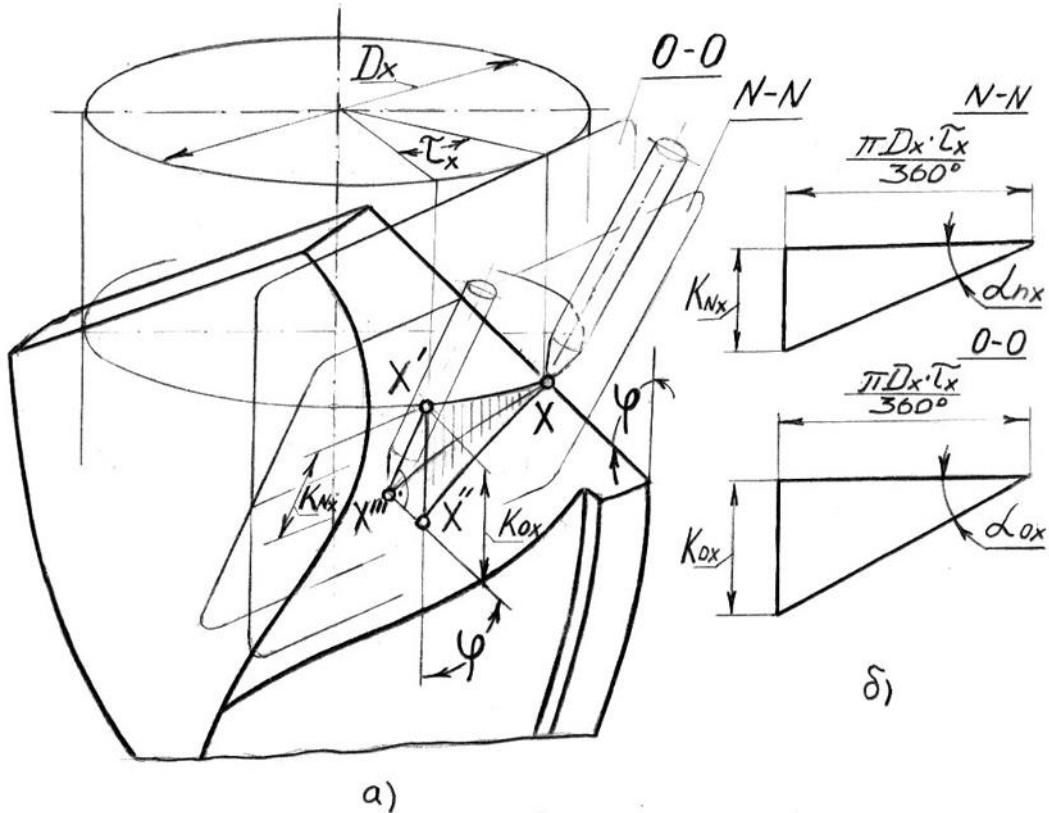


Рисунок 5.11. Схема к измерению и расчету задних углов в нормальных и осевых сечениях:
 а – схема измерения; б – развертка пространственных треугольников на плоскость

Если развернуть пространственный треугольник $XX'X'''$ на плоскость $N-N$, то получим искомый задний угол в нормальной плоскости α_{NX} для конкретной точки X режущей кромки (рисунок 5.11, б).

$$\operatorname{tg} \alpha_{NX} = \frac{K_{NX}}{XX'} = \frac{K_{NX} \cdot 360}{\pi \cdot D_x \cdot \tau_x} \quad (5.10)$$

Согласно определению (см. п. 2.2) этот угол и является задним углом α в статической системе координат.

Из схемы на рисунке 5.11, а видно, что задний угол α_{ox} в плоскости $O-O$, параллельной оси сверла, для той же точки X режущей кромки может быть найден разверткой треугольника $XX'X''$ на плоскость $O-O$. Развертка представлена на рисунке 5.11, б. Здесь отрезок $X'X'' = K_{ox}$ – это перемещение ножки индикатора и, соответственно, его показание, если ножка установлена параллельно оси сверла. Однако в этом случае, поскольку задняя поверхность криволинейна, а ось ножки направлена к ней не по нормали, возникают погрешности измерения. Проще рассчитать осевой задний угол α_{ox} через нормальный задний угол α_{NX} . Из треугольника $X'X''X'''$ (см. рисунок 5.11, а) видно, что

$$K_{OX} = \frac{K_{NX}}{\sin \varphi} \quad (5.11)$$

Тогда (рисунок 5.11, б), с учетом формул (5.9), (5.10), (5.11) имеем:

$$\operatorname{tg} \alpha_{OX} = \frac{K_{OX}}{XX'} = \frac{K_{NX} \cdot 360}{\sin \varphi \cdot \pi \cdot D_x \cdot \tau_x} = \frac{\operatorname{tg} \alpha_{NX}}{\sin \varphi} \quad (5.12)$$

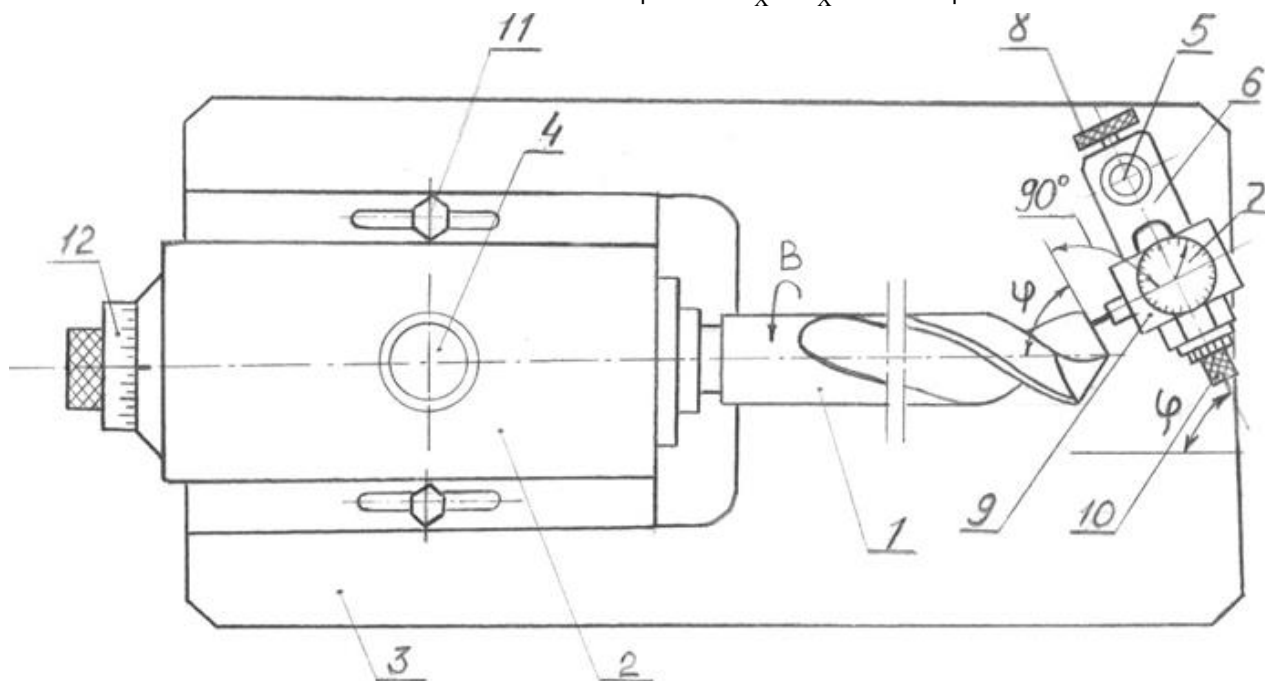


Рисунок 5.12. Приспособление для измерения задних углов спиральных сверл

Рассмотренная схема измерения положена в основу приспособления, представленного на рисунке 5.12. В отличие от схемы на рисунке 5.11, ось сверла в приспособлении не вертикальна, а горизонтальна, но суть измерений остается той же.

Предварительная наладка приспособления заключается в следующем.

Сверло 1 устанавливается в шпинделе головки 2, смонтированной на основании 3. При этом главные режущие кромки должны быть параллельны плоскости основания. Настройка положения режущих кромок производится поворотом шпинделя, фиксация в требуемом положении – винтом 4. Перемещая по высоте и поворачивая относительно колонки 5 кронштейн 6, устанавливают ось ножки индикатора 7 перпендикулярно режущей кромке сверла и в той же горизонтальной плоскости в которой лежит кромка. Фиксация каретки в выбранном положении – с помощью винта 8. Перемещая головку 2 по направляющим плиты 3 и смещая каретку 9 винтом 10, упирают ножку индикатора в режущую кромку с небольшим натягом. Фиксация головки – болтами 11. Уточняют положение ножки индикатора в горизонтальной плоскости. Точка контакта ножки с задней поверхностью сверла должна лежать как можно ближе к ре-

жущей кромке. Коррекция положения точки – за счет корректирующего перемещения каретки в вертикальной плоскости по колонке.

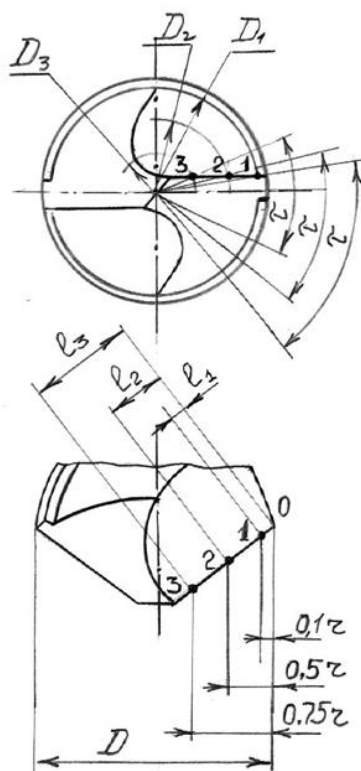


Рисунок 5.13. Схема измерения задних углов на приспособлении

Измерения задних углов проводят для трех точек режущей кромки, расположенных на следующих расстояниях от периферийной точки (рисунок 5.13):

- точка 1 – 0,1 r;
- точка 2 – 0,5 r;
- точка 3 – 0,75 r.

Поскольку каретка, вместе с индикатором и его ножкой, перемещается параллельно режущей кромке, а не перпендикулярно оси, то для установки ножки в конкретную точку необходимо будет знать расстояние данной точки от точки О вдоль режущей кромки, т. е. l_1, l_2, l_3 .

Зная угол φ можно определить, например:

$$l_1 = \frac{0,1 \cdot r}{\sin \varphi} = \frac{0,05 \cdot D}{\sin \varphi} . \quad (5.13)$$

Аналогично определяют l_2 и l_3 .

После того, как осуществлена предварительная наладка приспособления и рассчитаны значения l_1, l_2, l_3 , дальнейшая техника измерения включает следующие действия.

Винтом 10 перемещают каретку вдоль режущей кромки от оси сверла до тех пор, пока ножка не сойдет с режущей кромки (этот момент легко отслеживается по стрелке индикатора). Выбирая люфт и вращая винт 10 в обратном направлении (при этом ножку индикатора слегка оттягивают рукой за хвостовик от соприкосновения с кромкой), устанавливают ножку в точку О. Устанавливают и фиксируют губки штангенциркуля на вычисленный ранее размер l_1 . Используя штангенциркуль для контроля положения ножки индикатора и перемещая каретку винтом 10 по направлению к оси, выводят ножку в точку 1. Раскрепляют сверло (винт 4) и поворачивают его по стрелке В (рис. 5.12) на угол $\tau = 8...10^\circ$. Контролируя τ по лимбу 12, записывают показание индикатора К и переводят его в миллиметры. Измерения повторяют не менее трех раз во избежание случайных ошибок и в расчет берут среднее арифметическое.

Определяют величину заднего угла в нормальном сечении α для точки 1 режущей кромки по формуле (5.10), подставляя в неё данные для точки 1.

$$\operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{K_1 \cdot 360}{\pi \cdot D_1 \cdot \tau},$$

где K_1 – показание индикатора для точки 1; τ – угол поворота сверла; D_1 – диаметр, на котором расположена точка 1.

Очевидно $D_1 = D - 0,1D = 0,9D$ (рисунок 5.13).

Далее, аналогичным образом, производят измерение α для точек кромки 2 и 3, каждый раз подставляя в формулу (5.10) конкретные значения К и D.

При наличии лимба на винте 10 отсчет перемещений каретки l_1, l_2, l_3 можно производить по лимбу.

4.4 Рассчитать передние углы.

Расчет передних углов в нормальном сечении производят по формуле (5.4):

$$\operatorname{tg} \gamma_x = \frac{D_x}{D} \cdot \frac{\operatorname{tg} \omega}{\sin \varphi}$$

D_x принимает последовательно значения D_1, D_2, D_3 . Углы ω и φ были измерены ранее (см. так же п. 2.2).

4.5 Вычислить угол заострения β для каждой точки по формуле:

$$\beta_x = 90^\circ - (\alpha_x + \gamma_x) \quad (5.14)$$

4.6 Рассчитать задние углы α_0 в осевых сечениях, проходящих через точки 1, 2, 3 режущей кромки, по формуле (5.5)

$$\operatorname{tg} \alpha_0 = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\sin \varphi}$$

Дополнительные пояснения – см. п. 2.2.

4.7 Рассчитать для каждой точки кинематический задний угол α_k по формуле (5.6).

$$\alpha_{\text{кк}} = \alpha_{\text{ок}} - \eta_x$$

Угол η_x определяют по формуле (5.7):

$$\text{tg } \eta_x = \frac{S}{\pi \cdot D_x}$$

Значение подачи S мм/об принять согласно заданному варианту из таблицы 5.2. Пояснения к формулам и соответствующие рисунки – см. п. 2.3.

Таблица 5.2. Варианты подач

Вариант	1	2	3	4	5	6	7
Подача S мм/об	0,3	0,5	0,7	0,9	1,1	1,2	1,3

4.8 Результаты всех измерений и расчетов занести в таблицу (образец – таблица 5.3).

Таблица 5.3. Результаты измерения и расчета углов резания

№ точки	Диаметр измерения D_x , мм	Угол поворота сверла τ	Показания индикатора K , мм				Задний угол α	Передний угол γ	Угол заостр. β	Задний осевой угол α_0	Задний кинем. угол α_k
			1	2	3	среднее					
1											
2											
3											

4.9 На основании данных таблицы построить графики изменения статических углов α , γ , β вдоль режущей кромки (образец – на рисунке 5.7, б). На графиках указать полученные конкретные значения задних и передних углов для точек 1, 2, 3. Масштаб графиков – произвольный.

4.10 Построить графики изменения углов α_0 и α_k вдоль режущей кромки.

5 Оформление отчета

5.1 Указать наименование работы. Дать формулировку цели и задач работы. Указать вариант задания и исходные данные согласно варианта.

5.2 Оформить эскиз спирального сверла. Образец эскиза (рисунок 5.14). На эскизе проставить конкретные значения геометрических параметров заданного сверла, полученные при измерении.

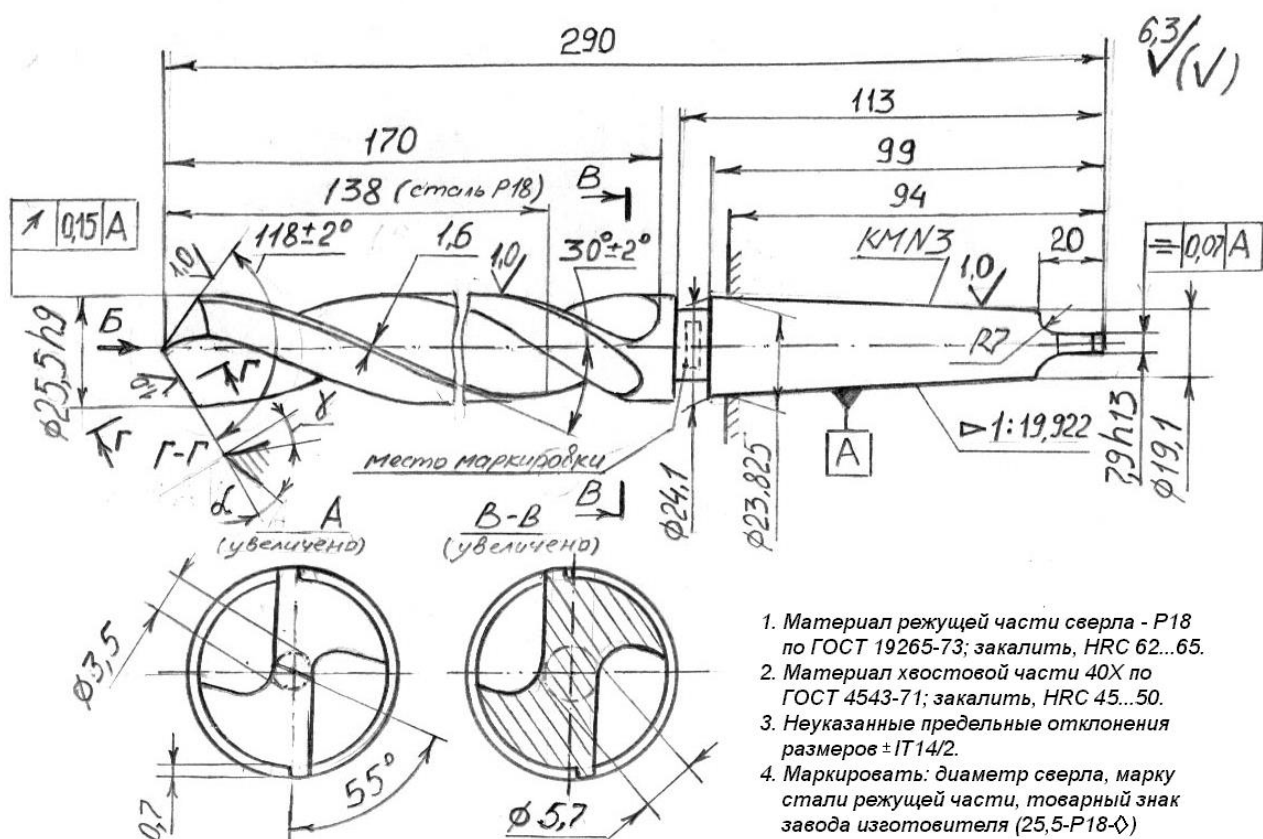


Рисунок 5.14. Эскиз спирального сверла

5.3 Оформить таблицу результатов измерений (см. таблицу 5.1).

5.4 Представить все расчеты по определению углов γ , β , α_0 , α_k для точек 1, 2, 3. Результаты оформить в виде таблицы (см. таблицу 5.3).

5.5 Оформить графики изменения углов α , γ , β и углов α_0 и α_k вдоль режущей кромки.

5.6 Представить письменно выводы о характере изменения углов α и γ вдоль режущей кромки и о влиянии подачи S на кинематический задний угол. Сделать выводы о режущей способности лезвия для его различных точек (на периферии, примерно посередине лезвия, у поперечной перемычки). Сделать вывод о прочности лезвия для этих же точек. Выводы обосновать результатами измерений и расчетов, а также используя учебный материал (см. п. 2), лекции и литературу [1, 4, 6, 8].

6 Контрольные вопросы

6.1 Назовите и покажите на образце основные конструктивные элементы спирального сверла. Объясните их назначение.

6.2 Из каких материалов изготавливается режущая часть и хвостовик сверла? Дать примеры обозначения этих материалов и расшифровку обозначений.

6.3 Составить эскиз рабочей части сверла и показать на нем статические плоскости и углы.

6.4 Что из себя представляет, с геометрической точки зрения, передняя поверхность спирального сверла? Как изменяется угол ω в зависимости от диаметра осевого сечения и почему? Каким образом угол наклона винтовой канавки влияет на процесс резания?

6.5 Почему для сверл малого диаметра угол ω принимает меньшие значения, чем для сверл с большим диаметром?

6.6 Как зависит процесс сверления от главного угла в плане φ и почему?

6.7 Для чего служит вспомогательный угол в плане φ_1 и каким образом он задается?

6.8 Как изменяется передний угол γ вдоль главной режущей кромки и почему?

6.9 Каково условие равнопрочности режущей кромки по его длине и каким образом это условие достигается?

6.10 Как изменяется задний угол α вдоль режущей кромки при заточке задней поверхности не по плоскости? Объясните на схеме образование статических задних углов в осевых сечениях.

6.11 Что из себя представляет поверхность резания при сверлении? В чем отличие кинематических углов резания от статических? Как ориентирована в пространстве кинематическая основная плоскость?

6.12 Как изменяются кинематические передние и задние углы вдоль режущей кромки сверла?

Лабораторная работа № 6

Исследование функциональной взаимосвязи скорости резания от стойкости резцов при точении

1. Цель и задачи работы

Цель работы: получение практических умений и навыков установления, на основе исследований, функциональной взаимосвязи скорости резания и периода стойкости резцов при токарной обработке

Задачи работы: ознакомление с видами износа резцов и способами количественной оценки процесса изнашивания; определение на основе экспериментов периода стойкости для нескольких значений скорости резания; ознакомление с методикой графоаналитической обработки полученных результатов.

2 Изнашивание инструмента и его стойкость

2.1 Линейная мера износа. Кривая износа

В процесс стружкообразования и взаимодействия инструмента с материалом заготовки происходит износ режущего лезвия как по передней поверхно-

сти, за счет трения стружки по ней, так и по задней поверхности, за счет трения по ней воспроизводимой поверхности резания.

Износ по задней поверхности визуально заметен как блестящая полоска, фаска, вдоль режущей кромки. Величина этой фаски является, по сути, шириной площадки износа h_z (если износ равномерный) и служит критерием при оценке степени износа резца (рисунок 6.1, а, б). Если изнашивание идет неравномерно, то для оценки степени затупления инструмента используют значение $h_{z\ max}$ (рисунок 6.1, в). Величина h_z может быть замерена с точностью до 0,01...0,05мм под микроскопом или с помощью увеличительной лупы. Обычно используют 24^x-кратную лупу с измерительной шкалой от твердомера Бринелля.

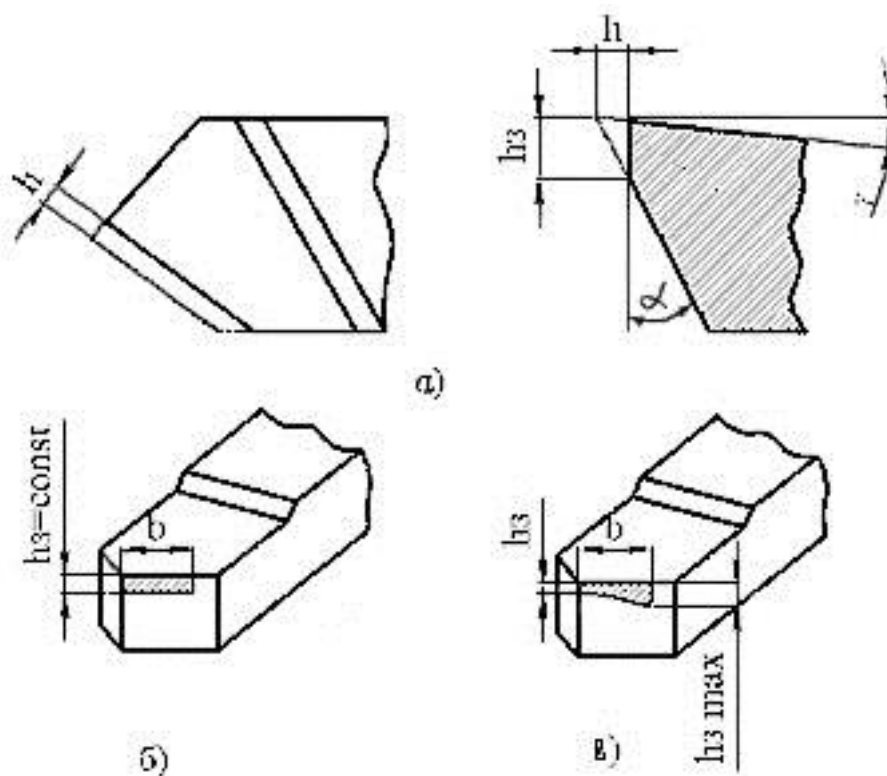


Рисунок 6.1. Износ по задней поверхности резца

Износ по передней поверхности выражается в появлении лунки на ней, глубина и ширина которой по мере износа увеличивается. Критерием износа в этом случае может служить глубина лунки.

Инструмент всегда подвергается одновременному износу, как по задней, так и по передней поверхности. Однако значимость износа той или иной поверхности в общем процессе изнашивания инструмента зависит от условий обработки и режимов резания. При чистовой обработке, когда глубина резания и подача относительно малы, то есть толщина, ширина, площадь среза и, соответственно, сечение стружки малы, износ передней поверхности незначителен, а износ задней поверхности является основным, преобладающим, и для оценки износа используется величина h_z или $h_{z\ max}$. Эти же критерии используются и для оценки изнашивания инструмента при получистовой обработке в среднем диапазоне изменения скорости резания, подачи, глубины резания. Хотя в этом

случае износ по передней поверхности становится уже более заметным и соизмерим с износом по задней поверхности, ширина площадки износа h_z вполне объективно отражает общую степень изнашивания инструмента и, в то же время, достаточно просто может быть измерена. Превалирующий износ по передней поверхности встречается относительно редко, характерен для черновой обработки с большими сечениями среза (большая глубина резания и подача) стальных заготовок, при точении чугуна и др.

Ширина площадки износа h_z ($h_{z\max}$) называется линейной мерой износа или линейным износом и широко используется при исследовании изнашивания инструментов.

Физическая природа износа режущего лезвия обусловлена сложным комплексом взаимосвязанных процессов на его поверхностях, находящихся в контакте с материалом заготовки (зоны контакта). Исходя из различных гипотез, основными причинами изнашивания являются следующие виды износа: абразивный, адгезионный, диффузионный, окислительный. Износ всегда обусловлен не каким-то одним видом изнашивания, а совместным воздействием на режущую часть инструмента различных механизмов износа. Для твердосплавного инструмента наиболее значимыми, основными, являются адгезионный и диффузионный процессы изнашивания. Интенсивность этих процессов, то есть интенсивность потери инструментом режущей способности, принципиальным образом зависит от температуры в зонах контакта, на которую, в свою очередь, решающее воздействие оказывает скорость резания.

Период времени, в течение которого инструмент сохраняет свою режущую способность, называется периодом стойкости T или просто стойкостью, обычно задается в минутах. Время между переточками инструмента равно периоду стойкости.

За весь срок эксплуатации инструмент подвергается переточкам неоднократно, и тогда говорят о суммарной стойкости инструмента.

Закономерное нарастание износа во времени можно отобразить графически в виде кривой износа. Типичная кривая износа для твердосплавного инструмента, когда износ идет одновременно по задней и передней поверхности, представлена на рисунке 6.2.

На кривой износа в общем случае, можно выделить три характерных периода времени. Период I – период приработки или начального износа, характеризуется повышенной интенсивностью изнашивания. Период II – период нормального, равномерного износа, нарастание которого не столь интенсивно, как на этапе I, и близко к линейной закономерности. Период III – период повышенного катастрофического износа, когда износ лезвия резко интенсифицируется, дальнейшая эксплуатация инструмента становится нерациональной и требуется его переточка.

Время от начала эксплуатации инструмента до момента окончания периода нормального износа и начала износа катастрофического (точка 2 на кривой износа) – это и есть период стойкости T .

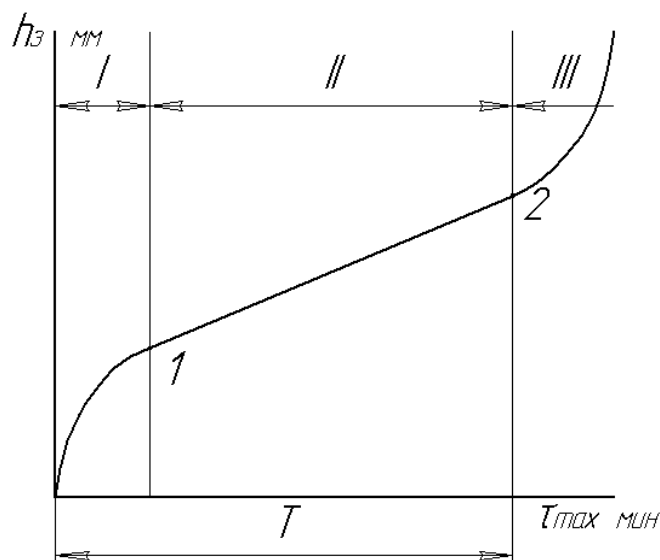


Рисунок 6.2. График зависимости износа от времени изнашивания (кривая износа)

2.2 Суммарная стойкость и ее определение

Суммарная стойкость $\sum T$ – это полная продолжительность работы инструмента (время резания) с учетом его многократных переточек: от момента постановки инструмента в работу – до момента, когда дальнейшая переточка нецелесообразна, например, из-за потери лезвием прочностных свойств.

$$\sum T = T(K + 1), \quad (6.1)$$

где K – количество переточек, допускаемое инструментом до его полного изнашивания; T – период стойкости, соответствующий данному износу h_3 .

Увеличение в формуле (6.1) количества переточек на единицу отражает тот факт, что перед постановкой в работу резец уже был заточен непосредственно при изготовлении, то есть общее количество заточек инструмента увеличивается на единицу.

Количество переточек определяется следующим образом (рис. 6.3а)

$$K = H / h', \quad (6.2)$$

где H – ширина перетачиваемой части твердосплавной пластины; h' – толщина слоя инструментального материала, снимаемая с задней поверхности при однократной заточке, измеренная параллельно передней поверхности лезвия.

Резец можно перетачивать до тех пор, пока оставшаяся, не переточенная, часть пластинки достаточно хорошо удерживается напайкой в пазу державки. Для этого необходимо, чтобы после всех переточек оставалось не менее $1/3$ первоначальной ширины пластинки B . Таким образом, принимают:

$$H = B - 1/3B = 2/3B. \quad (6.3)$$

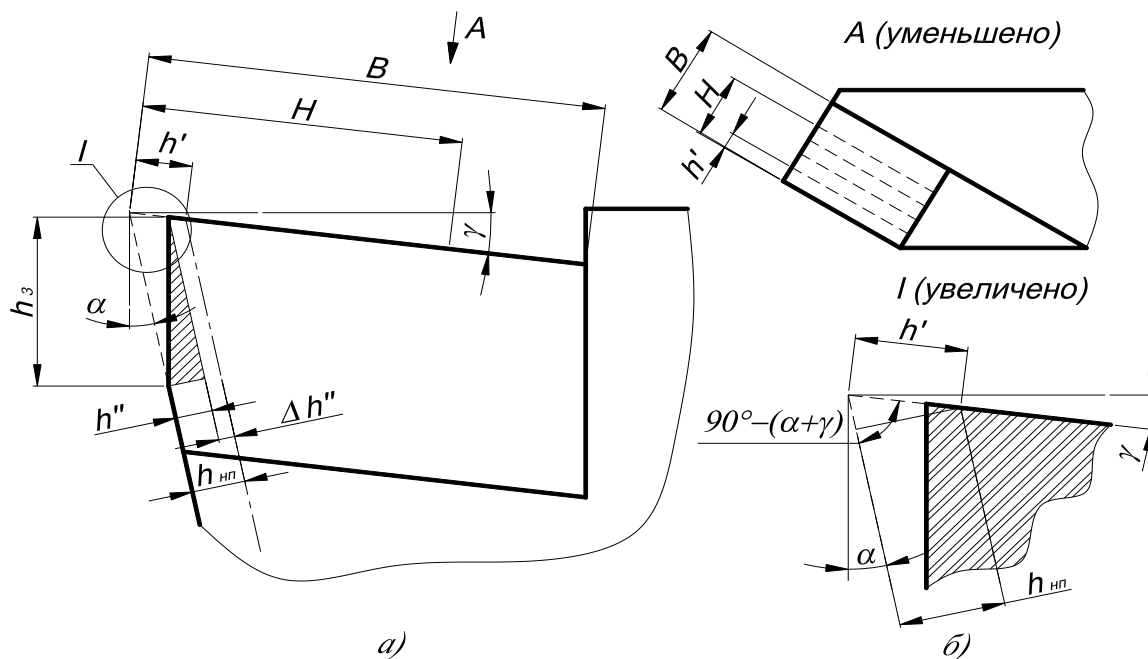


Рисунок 6.3. Схема переточки резца:
 а) схема к расчету $h_{н.н}$, б) схема к расчету h'

Величина h' определяется (рисунок 6.3, б) как:

$$h' = h_{н.н} / \cos(\alpha + \gamma), \quad (6.4)$$

где $h_{н.н}$ – некоторая нормируемая толщина слоя, снимаемого с задней поверхности лезвия при переточке.

Из рисунка 6.3, а:

$$h_{н.н} = h'' + \Delta h'', \quad (6.5)$$

$$h'' = h_3 \cdot \sin \alpha, \quad (6.6)$$

где $\Delta h'' \approx 0,15$ мм – дополнительный слой для гарантированного удаления дефектов структуры под площадкой износа.

Подставляя найденные значения H и h' в формулу (6.2) определяют количество переточек K . Тогда формула (6.1) для определения суммарной стойкости резца ΣT примет вид:

$$\sum T = T \cdot (K + 1) = T \cdot \left(\frac{2}{3} \frac{B \cdot \cos(\alpha + \gamma)}{h_3 \cdot \sin \alpha + 0.15} + 1 \right) \quad (6.7)$$

Из формулы (6.7) видно, что суммарный период стойкости является функцией износа h_3 и периода стойкости T , соответствующему данной величине h_3 .

2.3 Методика определения периода стойкости резца на основе критерия оптимального износа

Под оптимальным понимается такой износ $h_{3\text{opt}}$, при котором суммарная стойкость инструмента будет максимальной. Величина $h_{3\text{opt}}$ может быть найде-

на как аналитически, так и графо-аналитически. Рассмотрим второй способ как более простой.

Пусть для каких-то конкретных и неизменяемых условий обработки проводится серия экспериментов с целью построения кривой износа. Для этого через определенные промежутки времени измеряют ширину площадки износа h_3 . Очевидно, каждому измеренному значению h_{3i} соответствует своя стойкость T_i . Откладывают по оси абсцисс значения T_i , по оси ординат – h_{3i} , получают экспериментальные точки и через них проводят выравнивающую кривую износа (рисунок 6.4, а). Но положение точки на втором участке перегиба (точка b), координаты которой соответствуют значениям $h_{3\text{ onm}}$ и $T_{\text{ onm}}$, еще не определено, так как на кривой между участком нормального износа (точки 1, 2, 3) и участком катастрофического износа (от точки 5) всегда имеется какой-то переходной участок (точки 3, 4, 5).

Чтобы решить эту задачу, подсчитывают по формуле (6.7) для каждой экспериментальной точки графика суммарную стойкость $\sum T$ и строят графическую зависимость $\sum T = f(h_3)$ (рис. 6.4, б).

Из формулы (6.7) видно, что чем меньше значение h_3 , тем больше количество переточек K . Но меньшему износу h_3 соответствует и меньшая стойкость T (рисунок 6.4, а).

С другой стороны, чем больше h_3 , тем больше T , но меньше K , пока износ инструмента подчиняется линейной зависимости (точки 1, 2, 3 на рисунке 6.4, а). Суммарная стойкость, подсчитанная для значений h_3 и T , соответствующим этим точкам, так же изменяется примерно линейно (точки 1, 2, 3 на рисунке 6.4, б).

Нарушение линейного характера износа (точки 4, 5 на рисунке 6.4, а) характеризуется резким увеличением прироста величины h_3 при относительно небольшом приросте стойкости T . Это нарушает линейный характер зависимости $\sum T = f(h_3)$, (участок кривой с точками 3, 4, 5 на рисунке 6.4, б). Более того, суммарная стойкость, соответствующая износу h_{35} , существенно меньше для износа h_{34} . Ясно, что такая кривая имеет экстремум в виде «вершинь» кривой. Ордината «вершинь» соответствует максимальному значению суммарной стойкости $\sum T_{\text{ max}}$, а абсцисса – оптимальному износу $h_{3\text{ onm}}$, при которой достигается этот максимум суммарной стойкости. Далее откладывают в соответствующем масштабе на кривой износа (рис. 6.4, а) по оси ординат значение $h_{3\text{ onm}}$, проводят линию, параллельную оси абсцисс до пересечения с кривой износа и получают точку b . Абсцисса этой точки – это есть значение оптимального периода стойкости (время между переточками), который обеспечивает максимальную суммарную стойкость инструмента.

Попытка продлить период стойкости за точку b на кривой износа, наряду с резким снижением качества обработки, ведет к тому, что нарастающие температурные и силовые факторы будут вызывать все более глубокие структурные изменения в поверхностных слоях лезвия, обуславливают их дефектное состояние (сколы, прожоги, микротрещины). При переточке инструмента придется снять уже увеличенный слой инструментального материала, чтобы полностью удалить образовавшиеся дефекты структуры. Это ведет к увеличению времени

на переточку и сокращает количество переточек. То есть уменьшается суммарная стойкость инструмента. Это хорошо видно и на рисунке 6.4, б (пунктирный участок кривой за точкой 5).

Методика экспериментального определения зависимости периода стойкости от скорости резания

Среди режимных факторов решающее, главное воздействие на стойкость инструмента оказывает скорость резания V . Зависимость периода стойкости T от скорости резания V для твердосплавного инструмента представлена в общем виде на рисунке 6.6. Видно, что функциональная зависимость $T = f(V)$ имеет сложный, экстремальный характер, обусловленный сложной природой изнашивания лезвия и превалированием одних механизмов износа над другими в различных диапазонах изменения скорости резания.

Методика построения зависимости $T = f(V)$ заключается в следующем. Проводится серия экспериментов, на основании которой строят семейство кривых износа (рисунок 6.5) для возрастающих по значению скоростей резания ($V_1 < V_2 < V_3 < V_5 < V_6$) при сохранении неизменными всех остальных факторов. Построение кривой стойкости для каждой скорости резания и определение периодов стойкости T_1, T_2, \dots, T_6 осуществляется по методике, изложенной в п. 2.3.

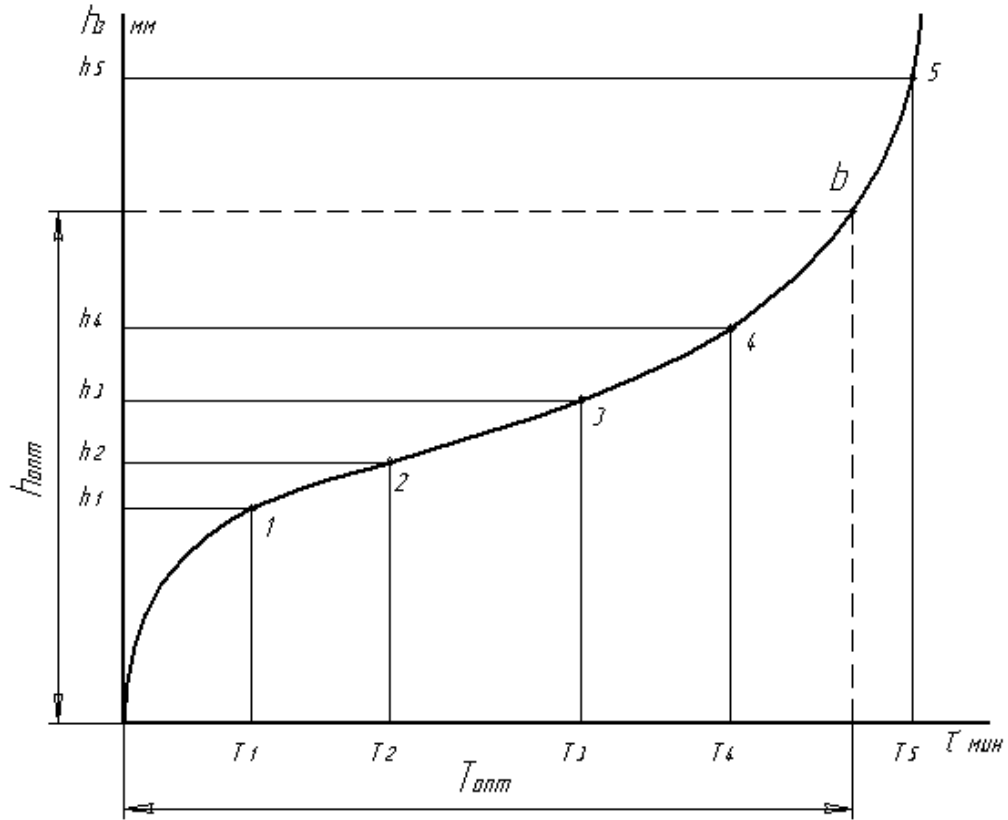
Используя значения скоростей резания и соответствующие им периоды оптимальной стойкости, строят графическую зависимость $T = f(V)$ (рисунок 6.6). Исследования и практика металлообработки показали, что твердосплавной инструмент экономически выгодно использовать при высоких скоростях резания в интервале от V_3 до V_6 и выше (то есть используется нисходящая ветвь графика). В этом диапазоне скоростей, хотя стойкость с ростом V и понижается, достигается высокая производительность (из-за значительной величины V).

Используя данные графика на рис. 6.6, построим нисходящий участок, заключенный между точками ν и z , в несколько ином виде (рисунок 6.7, а). На оси абсцисс отложим значения стойкости T , а по оси ординат – соответствующие значения скорости резания V . То есть получим графическое отображение функциональной зависимости $T = f(V)$ на нисходящем участке, когда увеличение T обусловлено снижением V .

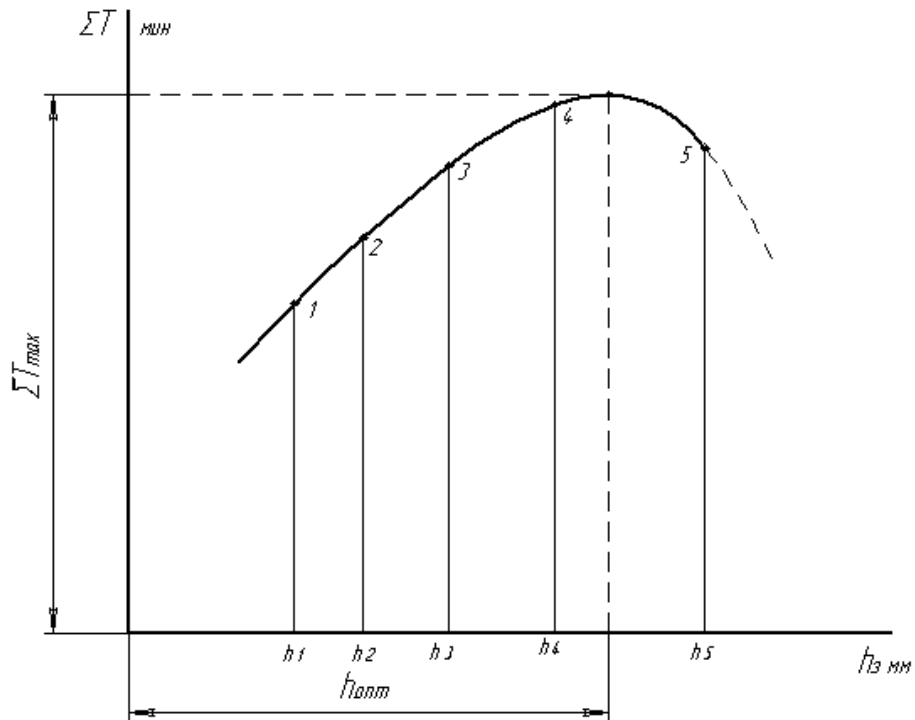
Видно, что частная функциональная зависимость $T = f(V)$ (то есть речь идет лишь об участке « ν - z »), представляет собой кривую, близкую к гиперболической, которая, как известно, может быть аппроксимирована степенной функцией вида:

$$V = \frac{C_V}{T^m}, \quad (6.8)$$

где C_V – коэффициент, зависящий от свойств инструментального и обрабатываемого материала, подачи, глубины резания, геометрии режущего лезвия и др.; m – показатель относительной стойкости, зависит от совокупности ряда факторов и принимает значение в интервале $0,1 \dots 0,75$.



a)



б)

Рисунок 6.4. К определению величины оптимального износа:
 а) построение экспериментальной кривой износа б) построение зависимости $\Sigma T = f(h_3)$

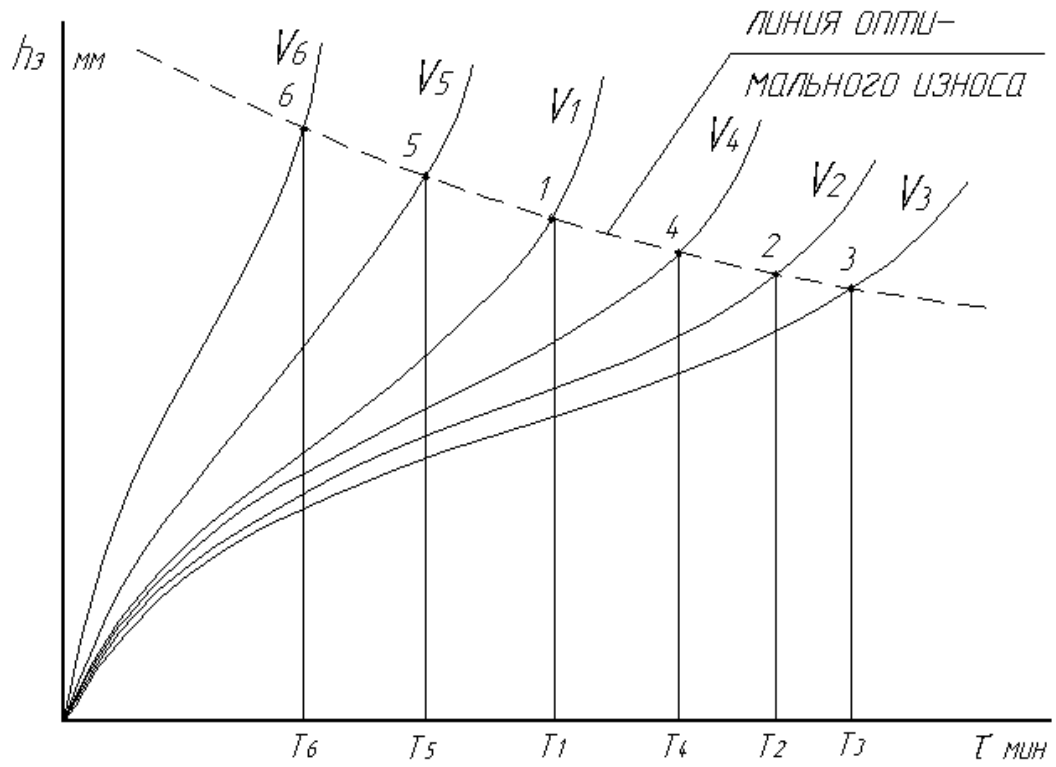


Рисунок 6.5. Семейство кривых износа

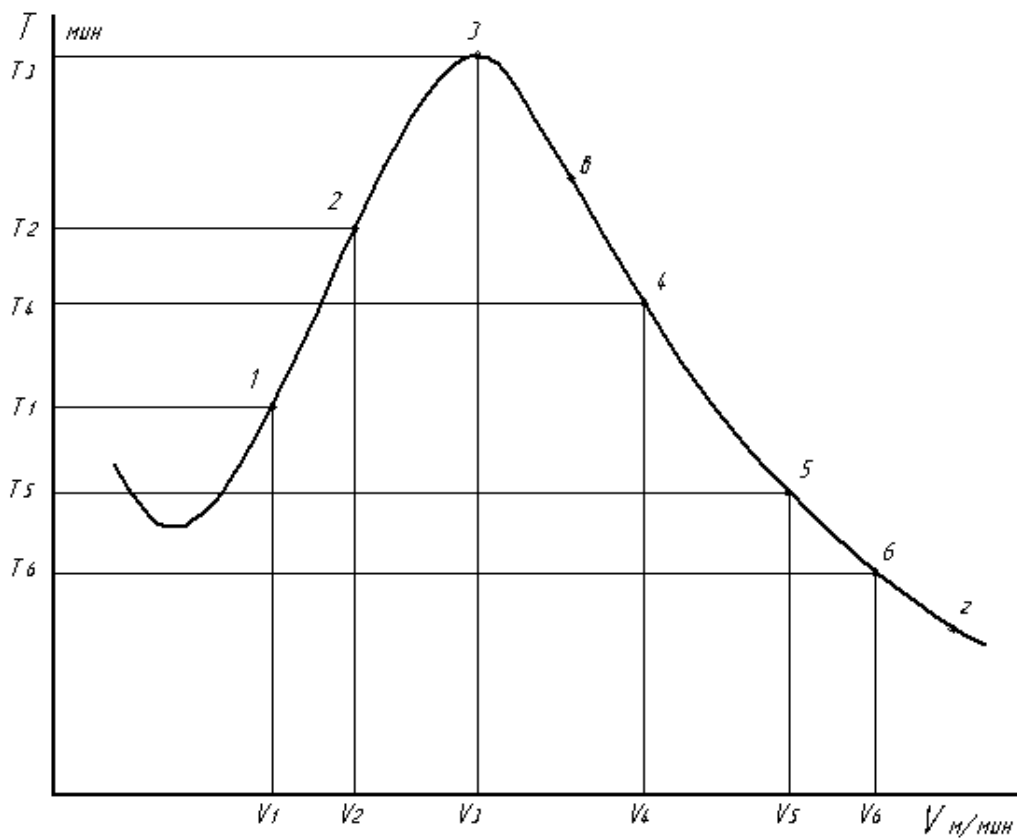


Рисунок 6.6. Зависимость стойкости твердосплавного инструмента от скорости резания

Если факторы, влияющие на C_V и m в течение всей серии экспериментов, остаются постоянными, то для данных конкретных условий обработки $C_V = const, m = const$.

После логарифмирования уравнение (6.8) принимает вид:

$$\lg V = \lg C_1 - m \cdot \lg T \quad (6.9)$$

Но это есть уравнение прямой линии, наклоненной к оси абсцисс под некоторым углом. Следовательно, если построить частную функциональную зависимость $V = f(T)$ в логарифмических координатах (рис 6.7, б), то есть откладывать по осям в определенном масштабе не сами значения скоростей резания и стойкости, а логарифмы этих значений, то участок в-г на рис. 6.7, а изобразится прямой, наклоненной к оси абсцисс (ось T) под углом Ψ , при этом:

$$m = \operatorname{tg} \Psi = A / B \quad (6.6)$$

где A и B – катеты прямоугольного треугольника, построенного на двух произвольно выбранных точках прямой линии.

Значение коэффициента C_V можно определить, если в формуле (6.8) принять $V=1$. Тогда $C_V = T^m$. Возможно и графическое определение C_V как отрезка ординаты линии $V=f(T)$ на рисунке 6.7, а.

3 Оборудование, приборы, инструменты

3.1 Токарно-винторезный станок.

3.2 Обрабатываемая заготовка из стали 45 диаметром $d=100\dots 160$ мм, длиной $L=400\dots 600$ мм.

3.3 Токарный, проходной отогнутый твердосплавной резец: $\gamma=10^\circ$; $\alpha=10^\circ$; $\lambda=0^\circ$; $\psi=45^\circ$; $\psi_1=45^\circ$.

3.4 Штангенциркуль.

3.5 Лупа 24^x (лупа к твердомеру Бринелля).

3.6 Секундомер.

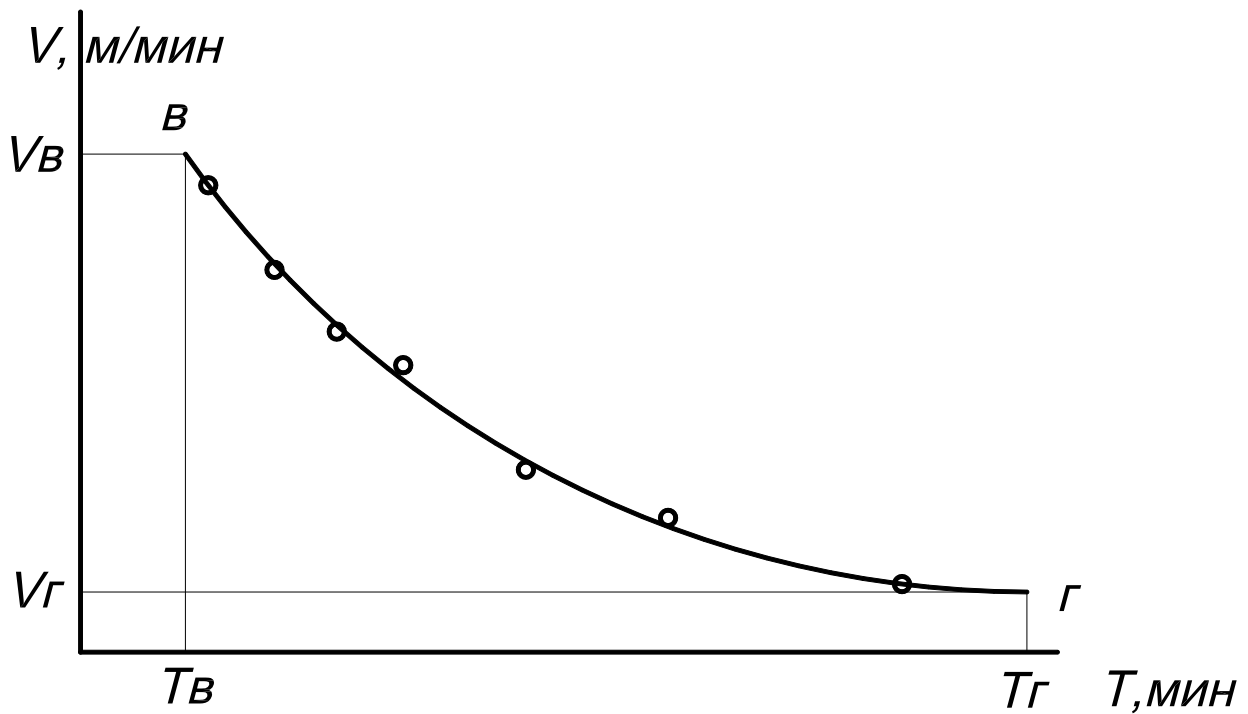
4 Содержание и порядок выполнения работы

4.1 Ознакомиться с учебным материалом, изложенным в п. 2; подготовить протокол по форме, представленной в таблице 6.1; все измерения, произведенные при опытах, необходимо заносить в протокол по мере выполнения экспериментов.

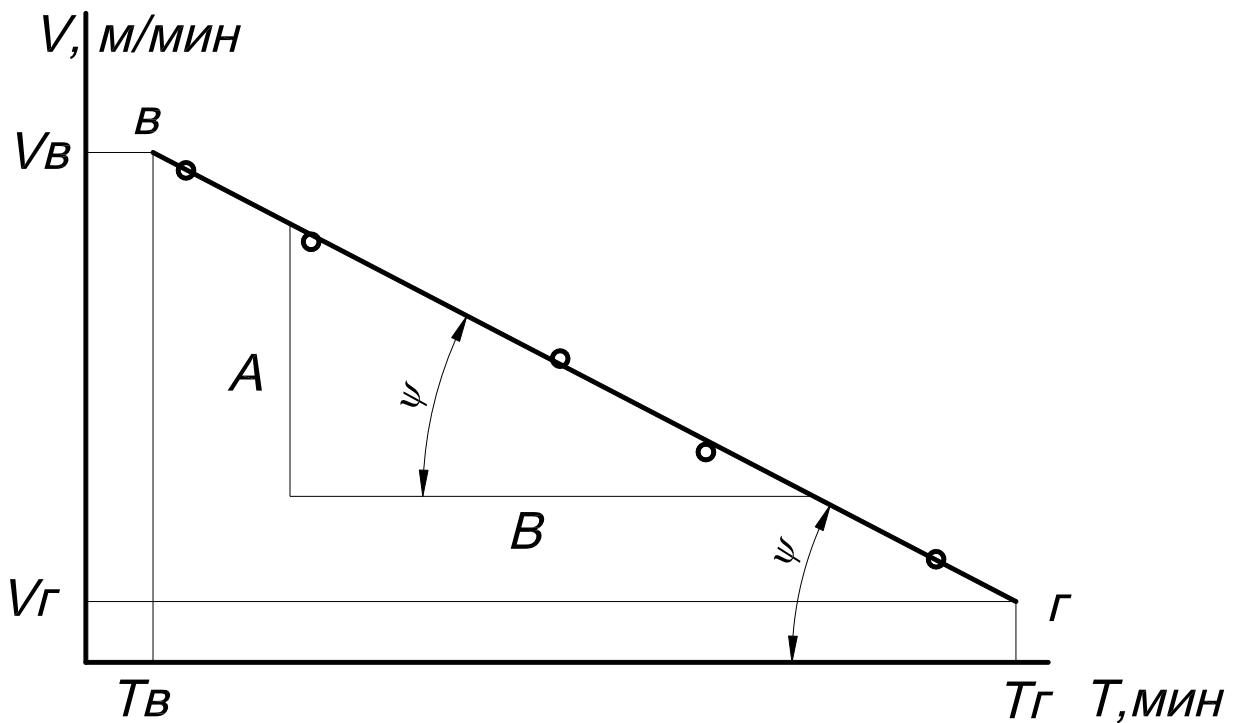
4.2 Измерить главный задний и передний угол резца, предназначенного для проточки заготовки.

4.3 Установить инструмент и заготовку на станок (под руководством учебного мастера).

4.4 Провести обработку заготовки при заданных значениях скорости резания V_I (частоты вращения шпинделя n), подачи S , глубины резания t . Измерить длину проточенной поверхности.



a)



б)

Рисунок 6.7. Частная зависимость скорости резания от стойкости (в пределах участка в-з);

a) в линейной системе координат; б) в логарифмической системе координат

4.5 Снять резец со станка и измерить с помощью лупы ширину площадки износа h_3 на задней поверхности резца.

4.6 Установить резец заново (необходимо следить, чтобы установка была идентична первоначальной) и при тех же значениях n, S, t вести проточку заго-

товки еще 2 минуты. Далее п. 4.4, 4.5, 4.6 повторяются. Обработку заготовки ведут до тех пор, пока износ h_3 не достигнет предельной величины. Затупление резца выше какого-то предельного для него значения может быть установлено по внешним признакам: темно-фиолетовый или коричневые цвета побеголости стружки (повышенная температура в зоне резания); резкое ухудшение качества проточенной поверхности; появление вибраций инструмента; звуковые эффекты («скрип», «визг» и т. п.). Количество замеров h_3 должно быть не менее 5.

4.7 Заточить резец заново. Если имеется несколько одинаковых заточенных резцов (не менее 4...5), то взамен изношенного можно ставить новый резец. Установить новую частоту вращения шпинделя n_2 , соответствующую новой скорости резания $V_2 > V_1$. все остальные режимы (S и t) остаются неизменными. Повторить все действия по п. 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 при проточке заготовки на скорости резания V_2 .

4.8 Повторить все действия по п. 4.6 последовательно для скоростей резания $V_3 > V_2$, $V_4 > V_3$, $V_5 > V_4$.

4.9 Оформить протокол испытаний.

4.10 Подсчитать суммарную стойкость резца $\sum T$ для каждого измеренного значения h_3 и всего диапазона изменения скорости резания (то есть при $V=V_1, V_2, V_3$ и т.д.). Методика расчета представлена в п. 2.2.

4.11 Определить период стойкости резца для каждого значения скорости резания V (см. п. 2.3).

Для чего необходимо для каждого значения V :

а) построить кривую износа (рисунок 6.4, а);

б) построить рядом соответствующую зависимость суммарного износа от линейного износа, т. е. $\sum T=f(h_3)$ (рисунок 6.4, б);

в) найти значение $h_{3\text{ опт}}$, и соответствующее ему значение $T_{\text{ опт}}$ (методика изложена в п. 2.3)

4.12 Построить зависимость скорости резания от стойкости $V=f(T)$ в линейных и логарифмических координатах (см. п. 2.4 и рисунок 6.7)

4.13 Установить зависимость скорости резания от стойкости инструмента, то есть определить конкретные значения коэффициента C_1 и показателя относительной стойкости m в формуле (6.4) (методика изложена в п. 2.4)

$$V = \frac{C_V}{T^m}, \text{ м/мин}$$

Для чего необходимо:

а) рассчитать тангенс угла Ψ (рисунок 6.7, б) и принять $m = \text{tg } \Psi$;

б) определить коэффициент C_V , приняв $V=1\text{ м/мин}$ и проверив полученный результат по уже построенной графической зависимости $V=f(T)$.

5 Содержание отчета

Отчет по работе должен содержать:

5.1 Наименование работы, формулировка цели и задач работы.

5.2 Наименование и модель станка.

5.3 Материал и размеры обрабатываемой заготовки.

5.4 Наименование режущего инструмента, его характеристика, сечение державки, материал режущей части, значения главного заднего и переднего углов.

5.5 Эскиз режущей части резца с размерами B и H (рисунок 6.3, б).

5.6 Протокол проведения опытов, выполненный по следующей форме:

Таблица 6.1. Протокол опытов

Номер опыта	Скорость резания V , $м/мин$	Частота вращения шпинделя n , $мин^{-1}$	Подача S , $мм/об$	Глубина резания t , $мм$	Номер прохода	Длина прохода L , $мм$	Время работы до замера значения $h_{зр}$, $мин$	Величина износа $h_{зп}$, $мм$	Суммарная стойкость $\sum T$, $мин$	Максимальная суммар- ная стойкость $\sum T_{max}$, $мин$	Оптимальная величина износа $h_{з опт}$, $мм$	Период стойкости, соот- ветствующий значению $h_{з опт}$, $мин$

5.7 Кривую стойкости $h_3=f(T)$ и графическую зависимость $\sum T = f(h_3)$ для всех исследуемых значений скорости резания.

5.8 Графическую зависимость $V=f(T)$ в линейных и логарифмических координатах

5.9 Расчеты по определению C_V и m .

5.10 Формулу для определения скорости резания V в зависимости от периода стойкости T в исследованном диапазоне скоростей.

6 Контрольные вопросы

6.1 Что принимается за количественную меру износа резцов, какие еще меры износа используются при исследовании изнашивания инструментов?

6.2 Какие поверхности лезвия и участки его режущих кромок подвергаются износу и почему, каким образом внешние признаки изнашивания резца взаимосвязаны с режимами точения?

6.3 Что такое кривая износа? Назовите характерные периоды изнашивания инструмента, особенности каждого периода объясните на основе физической природы износа.

6.4 Что такое суммарная стойкость резца и критерии оптимального износа? Кратко изложите методику определения оптимальной стойкости резца.

6.5 Почему зависимость суммарной стойкости от линейного износа по задней поверхности имеет вид экстремальной, «горбообразной» кривой? Почему после экстремума суммарная стойкость уменьшается? Что будет с инструментом, если срок до его переточки продлить более оптимального периода стойкости?

6.6 Какой вид имеет графическая зависимость периода стойкости от скорости резания для твердосплавного инструмента и почему? Объясните особенности каждой зависимости на основе физической природы изнашивания.

6.7 Кратко изложите методику построения графической зависимости периода стойкости от скорости резания.

6.8 Какой вид имеет функция $V = f(T)$ и почему? В чем заключается графоаналитический метод определения относительной стойкости?

Лабораторная работа № 7

Определение зависимости размерного износа резца от пути Резания

1 Цели и задачи работы

Цель работы: получение практических умений и навыков установления на основе исследований функциональной взаимосвязи размерного износа резца от пути резания.

Задачи работы: ознакомление с размерным износом резцов и его характеристиками; ознакомление с методами и средствами измерения размерного износа; ознакомление с методиками исследования размерного износа инструмента и обработки экспериментальных данных.

2 Размерный износ инструмента

2.1 Характеристики размерного износа

При чистовой обработке используют технологические критерии износа, когда инструмент считается затупившимся не потому, что он уже «не режет», а, например, потому, что размеры обрабатываемой поверхности или её шероховатость перестают удовлетворять техническим требованиям.

На точность размера обработанной поверхности при точении существенное влияние оказывает размерный износ инструмента h_p в направлении, перпендикулярном к этой поверхности (рисунок 7.1) – который называют ещё радиальным. Радиальный износ резца h_p при обработке наружных поверхностей приводит к увеличению диаметра на $2h_p$ (рисунок 7.2), а при расточке отверстий к уменьшению диаметра на $2h_p$.

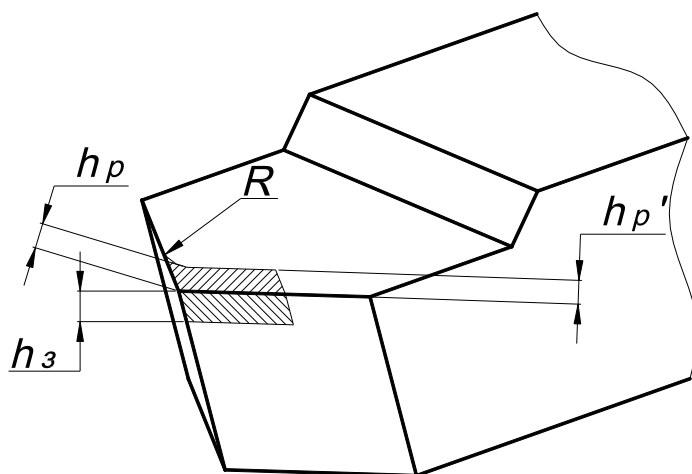


Рисунок 7.1. Износ резца по задней поверхности и вершине

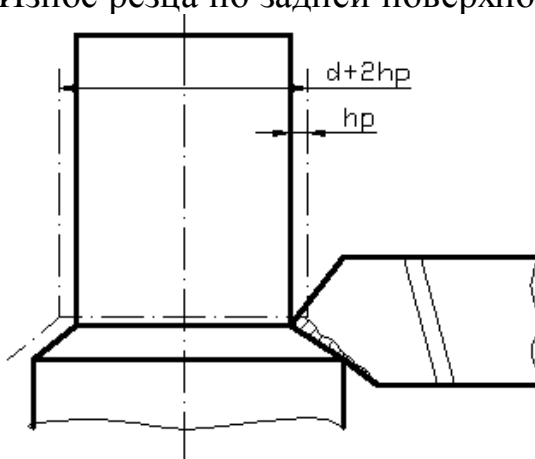


Рисунок 7.2. Влияние радиального износа резца на диаметр проточки

Величина h_p обусловлена суммарным износом инструмента по задней поверхности h_3 и износом непосредственно вершины лезвия в виде появления (или увеличения) радиуса R . Взаимосвязь h_p с параметрами h_3 , R , а также с геометрическими характеристиками режущего лезвия, устанавливается следующей формулой

$$h_p = \frac{h_3 \cdot \cos \gamma \cdot \sin \alpha \cdot \sin \varphi_1}{\cos(\alpha + \gamma) \cdot \sin(\varphi + \varphi_1)} + R \cdot \left(\operatorname{ctg} \frac{\varphi - \varphi_1}{2} - \cos \frac{\varphi - \varphi_1}{2} \right), \quad (7.1)$$

где γ – передний угол; α – главный задний угол; φ – главный угол в плане; φ_1 – вспомогательный угол в плане (рисунок 7.3).

Расчёт радиального износа по формуле (7.1), исходя из износа по задней поверхности h_3 , в ряде случаев может привести к большим погрешностям, так как вывод формулы основан на идеализированной геометрической схеме износа и некоторых упрощениях.

Намного точнее и проще радиальный износ определяется непосредственно с помощью тех или иных приспособлений и приборов.

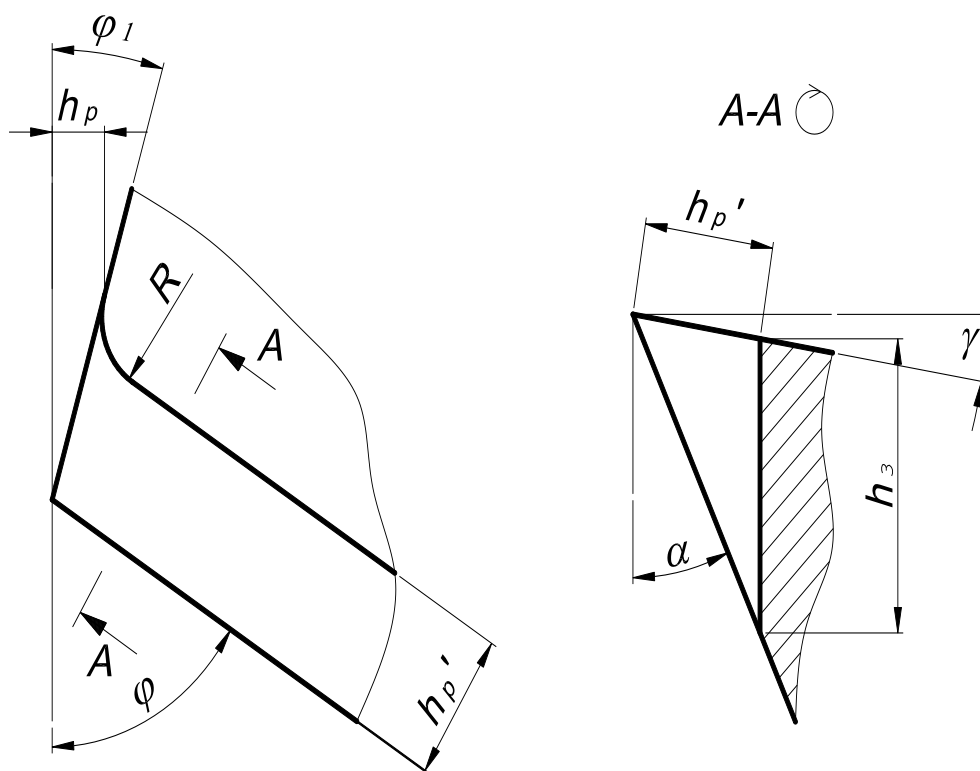


Рисунок 7.3. Геометрические характеристики лезвия, определяющие радиальный износ h_p

2.2 Приспособления и устройства для измерения размерного износа

На рисунке 7.4 представлено приспособление для измерения величины радиального износа h_p с помощью индикатора часового типа.

На основании 1 закреплён упор 2. В правой кронштейне с помощью контргайки зафиксирован упорный винт 3. В левой кронштейне установлен индикатор часового типа 4, который фиксируется в осевом направлении с помощью винта 5. Контролируемый резец 6 устанавливается в приспособлении таким образом, что его торцовая поверхность упирается в торец упорного винта 3, предварительно выставленного на размер H_1 , при этом поджимается к упору 2, который предварительно выставлен на размер H_2 . В результате наконечник индикатора, который должен иметь плоский торец, упирается в вершину резца.

Установив в приспособлении неизношенный, заточенный резец, выставляют лимб индикатора на ноль. Далее этот резец устанавливается на станок и им производится проточка заготовки. Периодически снимают резец со станка, устанавливают его в приспособление так, как описано выше и измеряют радиальный износ, который имеет резец на данный момент времени. Недостатком метода является его относительно невысокая точность, трудоёмкость проведения измерений, влияние погрешности установки резца в приспособление на точность измерений, необходимость для измерения снятия резца со станка. Достоинство – простота и относительно низкая стоимость приспособления.

На рисунке 7.5 представлено приспособление, которое позволяет контролировать радиальный износ резца, не снимая его со станка.

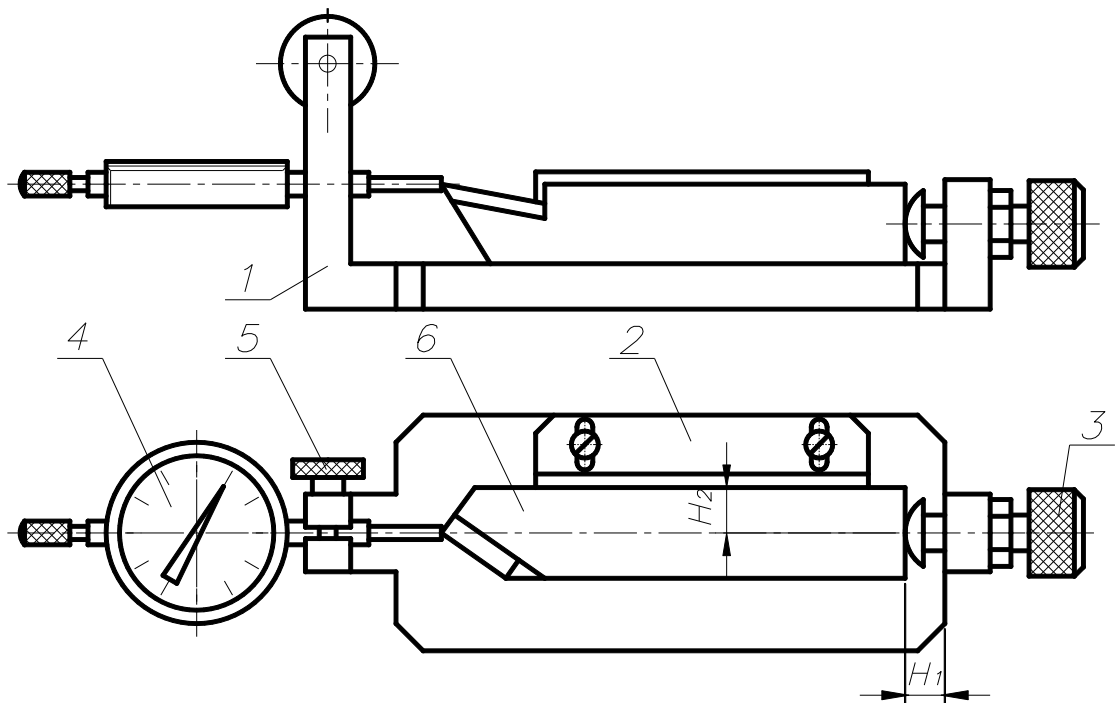


Рисунок 7.4. Приспособление для измерения радиального износа

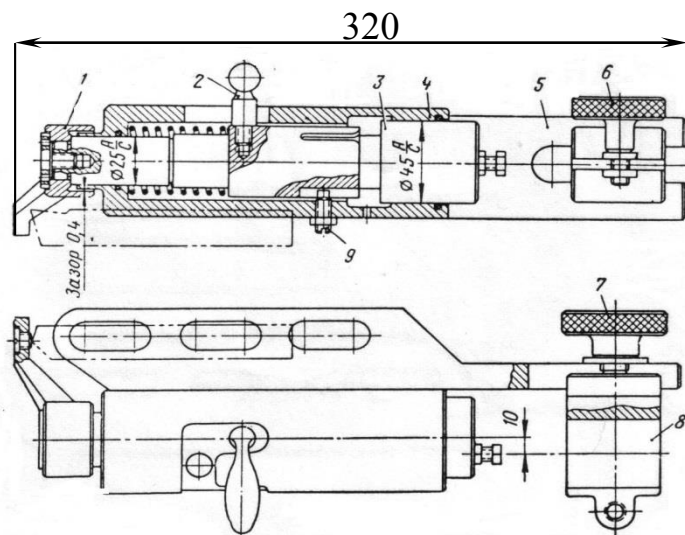


Рисунок 7.5. Приспособление для контроля радиального износа резца

Приспособление крепится на резцедержателе и состоит из кронштейна 5, к которому винтами прикреплен корпус 4. В корпусе плавно перемещается шпindelь 3 с измерительным наконечником 1. В задний торец шпинделя ввёрнут винт, в головку которого упирается наконечник индикаторной головки. При обработке заготовки резцом наконечник 1 отведён от резца путём перемещения рукоятки 2 по П – образному вырезу влево и назад; при этом наконечник индикаторной головки выходит из контакта с головкой винта. Индикатор закрепляется винтом 6 в хомутке 8, который перемещается по пазу кронштейна 5 и фиксируется в нужном направлении винтом 7. В корпус 4 ввёрнут винт 9, цилиндрическая часть которого входит в паз шпинделя 3 и обеспечивает определённое угловое положение наконечника 1 при его повторных установках. Достоинства приспособления по сравнению с предыдущей конструкцией – возможность из-

мерения износа резца без его снятия со станка, что повышает точность измерения (отсутствуют погрешности переустановки резца).

Недостатком рассмотренных конструкций является невозможность использования их на станках-автоматах, поскольку процедура измерения производится самим оператором.

На рисунке 7.6 представлен прибор (Тилипалов В.Н. Устройства волоконной оптики в автоматизированных станочных системах / Учебное пособие. – Калининград: КГТУ, 1999) на основе волоконной оптики, предназначенный для контроля размерного износа инструмента в автоматизированных станочных системах. Схема прибора (модуль контроля размерного износа инструмента – МКИРИ-2) представлен на рисунке 7.6. Модуль контроля состоит из оптоэлектронного блока и измерительной головки; используется на станках с числовым программным управлением, а также для настройки инструмента вне станка как составная часть специальных измерительных устройств. Погрешность измерения ± 1 мкм, диапазон измерений 100 мкм. Питание прибора от сети переменного тока напряжением 230В.

Принцип действия модуля контроля МКИРИ-2 заключается в следующем. От блока питания 1 запитаны генератор 2 и усилитель 3. Генератор 2 вырабатывает сигналы, которые с помощью светодиода 4 преобразуются в инфракрасное излучение. Импульсы инфракрасного светового потока по световоду 5 попадают на отражающую пластину 6 (рисунок 7.6, б). Часть светового потока отражаясь от пластины, поступает в принимающий световод 7 и по нему – на фотодиод 8. Сигнал от диода 8 усиливается усилителем 3 и поступает на цифровой вольтметр 9, на табло которого высвечивается комбинация цифр, характеризующих размер Δ между торцом коллектора 10 и отражающей пластиной 6. (Примечание: при использовании прибора не для лабораторной работы, а для контроля качества износа инструмента на станках-автоматах, сигнал с усилителя поступает не на цифровой вольтметр, а в соответствующий блок системы числового программного управления, где он сравнивается с заранее запрограммированной величиной допускаемого износа. На основании сравнения система ЧПУ «принимает решение» о продлении работы инструмента или его замене).

Размер зазора Δ зависит от взаимного положения плунжеров 11 и 12, на которых, с помощью кронштейнов 15 и 16, неподвижно закреплены соответственно пластина 6 и коллектор 10. Плунжер 11 упирается своим наконечником 13 в вершину контролируемого резца, а наконечник 14 плунжера 12 – в измерительную базу (фрезерованная площадка на державке). Таким образом положение плунжеров относительно друг друга определяется расстоянием A от вершины резца до его измерительной базы.

Пусть для резца не работавшего, то есть не изношенного, размер $A=N$. Соответственно и зазор между торцом коллектора 10 и измерительной пластины 6 $\Delta=K$, чему соответствует определённое число на табло цифрового вольтметра 7. Начальное и все последующие измерения инструмента осуществляются без съёма его со станка, для чего суппорт вместе с резцедержателем перемещается из рабочей позиции в измерительную позицию, где и закреплена головка

прибора. Если через определённый промежуток времени, в течении которого инструмент находится в работе, вновь переместить суппорт в измерительную позицию и прикоснуться вершиной резца и его измерительной базой к наконечникам 13 и 14 (рисунок 7.6, в) то, в связи с появившимся радиальным износом инструмента h_p , размер A уменьшится: $A=H-h_p$.

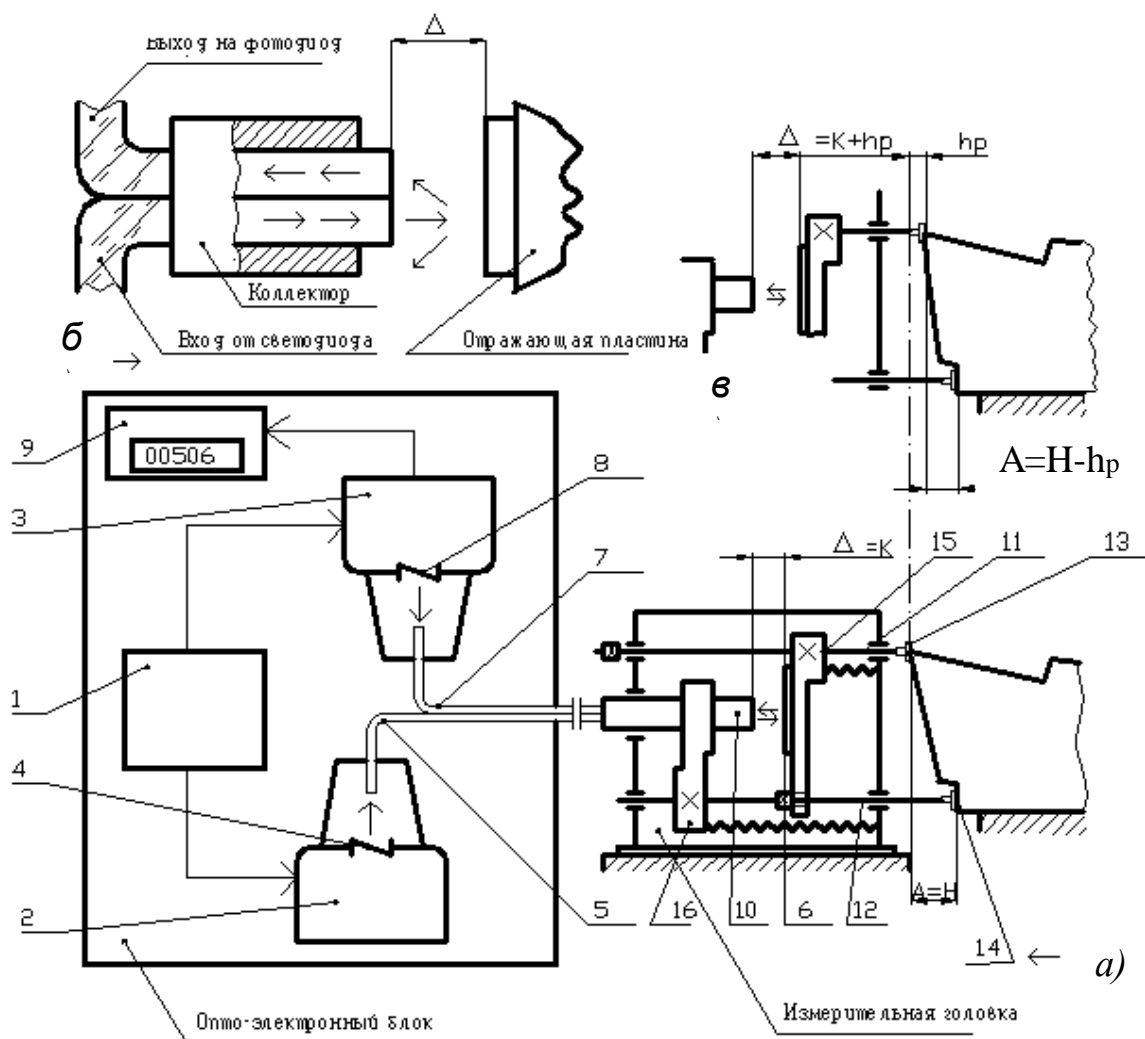


Рисунок 7.6. Принципиальная схема прибора на основе волоконной оптики для контроля радиального износа:

а – схема прибора; б – схема изменения расстояния A

Соответственно изменится зазор Δ : $\Delta=K+h_p$. Изменение зазора Δ вызывает изменение интенсивности отражённого светового потока, что будет отображено на табло цифрового вольтметра новой комбинацией цифр. Разница между числовым показанием прибора при данном конкретном измерении, и начальным измерением не изношенного инструмента пропорциональна радиальному износу резца h_p . Зная коэффициент пропорциональности, который выясняется при предварительной тарировке прибора, определяют оперативно и с высокой точностью величину h_p . Методика тарировки изложена в пункте 2.3.

2.3 Техника измерения радиального износа. Тарировка модуля контроля

При измерении радиального износа резца с помощью приспособления, изображенного на рисунке 7.4, последовательность и суть действий оператора заключается в следующем.

Заточенный резец, ещё не участвовавший в работе, устанавливают в приспособление и регулируют размеры H_1 и H_2 таким образом, чтобы ножка индикатора упиралась торцом наконечника в вершину резца с определённым натягом. Поворотом лимба выставляют показания индикатора на ноль. Как при этом, так и при последующих измерениях, необходимо следить, чтобы резец был плотно поджат рукою оператора своими поверхностями к торцу винта 3 и кронштейну 2. Далее резец устанавливается на станок и осуществляется процесс обработки. Через определённый промежуток времени резец снимается со станка и, для исключения влияния температурных деформации, охлаждается, например, в воде в течении 5 минут. Устанавливая резец в приспособление, измеряют радиальный износ h_p инструмента. При постановке резца вновь в резцедержатель необходимо следить, чтобы он занимал такое же положение, которое было и при первой установке.

Измерения проводятся столько раз, сколько необходимо для построения зависимостей радиального износа от каких-либо изменяемых факторов, например, от скорости резания.

Если используется приспособление, представленное на рисунке 7.5, то измерения осуществляются следующим образом. Поворотом шпинделя 3 за рукоятку 2 отводят наконечник 1 в холостое положение I, не мешающее постановке резца. Устанавливают резец в резцедержатель таким образом, чтобы его вершина упиралась во вновь подведённый наконечник 1 (положение II), с определённым натягом. Выставляют показания индикатора на ноль. Вновь поворачивают шпиндель в положение I. Проводят проточку резцом определённое время. Выводят суппорт вместе с резцедержателем и резцом из рабочей зоны. Поворачивают шпиндель приспособления в измерительное положение II и осуществляют измерение радиального износа. Вновь переводят шпиндель в холостое положение I. Процедуру проводят необходимое количество раз через определённые промежутки времени.

Для измерения износа резца прибором на основе волоконной оптики измерительную головку 1 (рисунок 7.7) устанавливают на продольный суппорт станка на специальном кронштейне 2.

Устанавливают резец с заранее подготовленной измерительной базой (см. рисунок 7.6) в резцедержатель и подводят его, за счёт перемещения поперечного суппорта, к наконечникам плунжеров измерительной головки. Плавно вращая маховик поперечной подачи, упирают измерительную базу (площадка на резце) в наконечник нижнего плунжера. Продолжая плавно перемещать поперечный суппорт, утапливают нижний плунжер в корпус головки и приближают вершину резца к наконечнику верхнего плунжера. При этом на цифровом табло будут изменяться цифровые показания. В тот момент, когда вершина резца упрётся в наконечник верхнего плунжера, цифровые показания прибора стабили-

лизируются. Дальнейшую поперечную подачу резца необходимо прекратить и записать конкретные показания цифрового вольтметра, которые должны лежать в пределах $-275 \dots -285\text{В}$.

Отводят резец от измерительной головки и осуществляют им проточку заготовки на настроенных режимах. Выводят суппорт из рабочей зоны и вновь подводят резец к измерительной головке согласно процедуре, описанной выше. В момент, когда измерительная база резца и его вершина, уже изношенная на определённую величину радиального износа h_p , одновременно будут касаться ножек плунжеров, на табло высветится стабилизовавшееся показание прибора, которое и покажет износ h_p в микрометрах как разницу между измерениями резца до и после проточек заготовки.

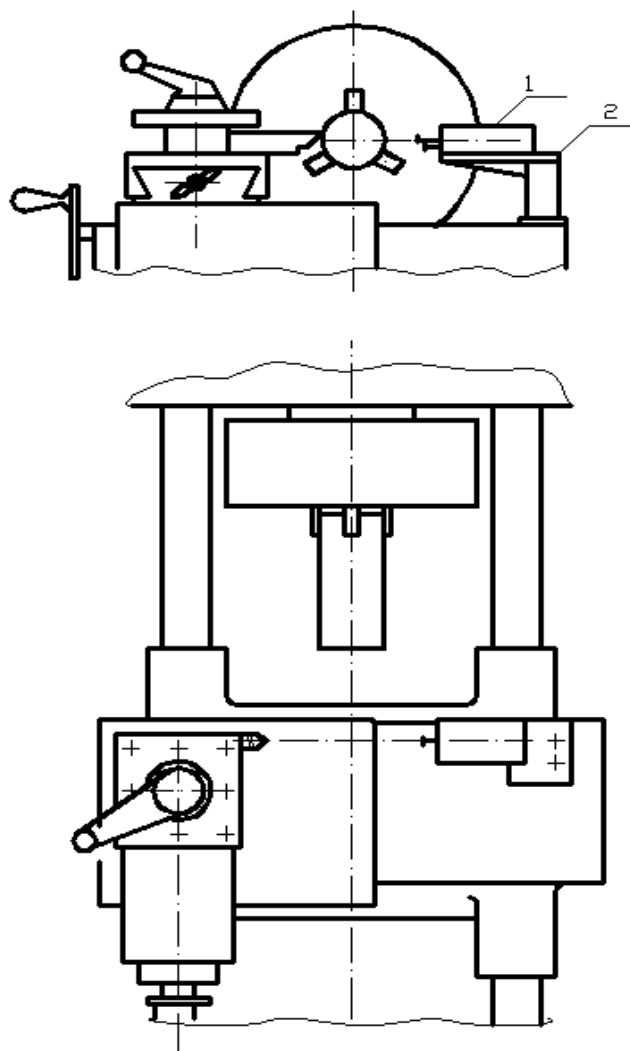


Рисунок 7.7. Установка измерительного блока на станок

Далее процедура проточки и измерения износа повторяется столько раз, сколько необходимо получить точек для построения графической зависимости $h_p=f(L)$.

В связи со сложным характером зависимости отражённого светового потока от зазора Δ (рисунок 7.6) прибор волоконной оптики предварительно дол-

жен быть исследован для построения этой зависимости и выявления линейного участка на ней. Исследование проводят следующим образом.

Вместо резца в резцедержатель устанавливают любую пластинку с гладким торцом и, перемещая поперечный суппорт, приводят её до начального соприкосновения с наконечником нижнего плунжера. При этом наконечник верхнего плунжера на всех этапах исследования ни во что не упирается.

Плавное перемещение суппорта получить показание прибора P в интервале $-470..-480$. Остановить суппорт конкретное показание прибора записать как начальное. Поставить на продольной суппорт магнитную стойку с индикатором многооборотного типа 1МИГ с ценой деления $0,001$ мм и пределом измерения 1 мм; упереть ножку индикатора в поверхность резцедержателя со стороны, противоположной измерительной головке на кронштейне. Индикатору необходимо дать предварительный натяг в 8 оборотов, что обеспечит $0,8$ мм хода его измерительной ножки. Плавное перемещение поперечный суппорт «на себя» через каждые 30 мкм снимают показания индикатора U и записывают показания цифрового табло прибора P . Используя полученные данные строят график $P=f(U)$ (рисунок 7.8).

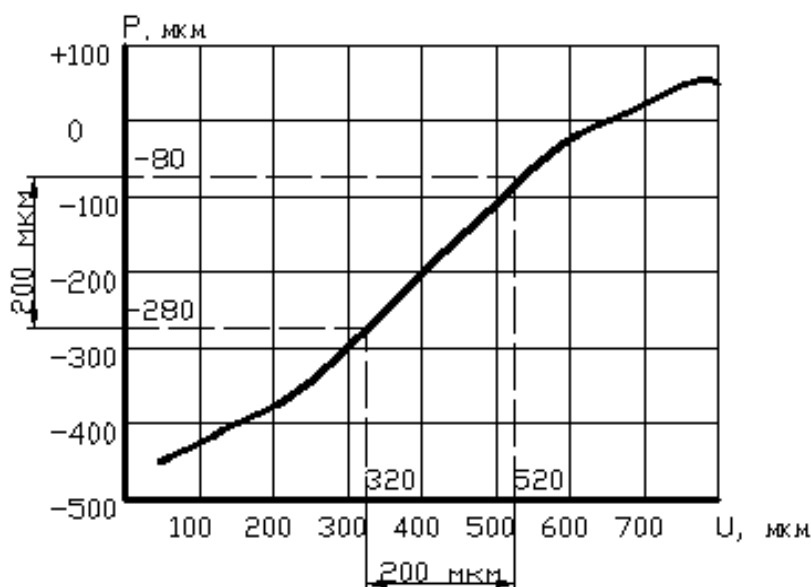


Рисунок 7.8. Поверочная кривая прибора МКИРИ-2

Видно, что линейный характер графика сохраняется лишь в интервале показаний прибора $-280..-80$. Именно этот интервал и необходимо использовать при исследованиях. На этом интервале разница между показаниями прибора до и после изнашивания резца даст значения радиального износа h_p в микрометрах. Тарировка прибора может быть сделана учебным мастером во внеучебное время.

2.4 Зависимость размерного износа от пути резания. Характеристики размерной стойкости инструмента

С принципиальной точки зрения изнашивание инструмента в самом общем виде характеризуется кривой износа, представленной на рисунке 4.2 (Ла-

бораторная работа № 4). Однако, как отмечалось в п. 2.1, эксплуатацию инструмента при чистовой обработке прекращают по технологическим ограничениям (потеря инструментом и, соответственно, получаемой деталью необходимого размера), а не из-за того, что лезвие потеряло свою режущую способность. То есть на кривой износа в этом случае не будет точки 2, разделяющей участки нормального и катастрофического износа. Тогда кривая износа, для случая именно размерного износа, имеет вид, представленный на рисунке 7.9. Здесь на оси абсцисс откладывают не время, в течение которого эксплуатировался резец, а путь L в метрах, который проходит лезвие относительно заготовки в процессе точения за контролируемый период времени τ в минутах (путь резания). Величину L для каждого конкретного момента τ можно получить как

$$L = V \cdot \tau = \frac{\pi \cdot d \cdot l}{1000 \cdot s} \quad (7.2)$$

где V – скорость резания, м/мин; τ – время обработки, мин; l – длина проточенной поверхности, мм; s – подача, мм/об; d – диаметр проточки, мм.

Зависимость размерного износа h_p от пути резания L представлена на рисунке 7.9.

Видно, что на графике имеется период начального повышенного износа до точки 1 (период приработки), в течение которого резец проходит путь резания $L_{\text{нач}}$. После точки перегиба наступает период нормального износа, которому соответствует путь резания $L_{\text{норм}}$. В сумме $L_{\text{нач}}$ и $L_{\text{норм}}$ составляют общий путь резания L , которому соответствует размерный (радиальный) износ резца h_p . На участке радиального изнашивания зависимость h_p от L , носит линейный характер.

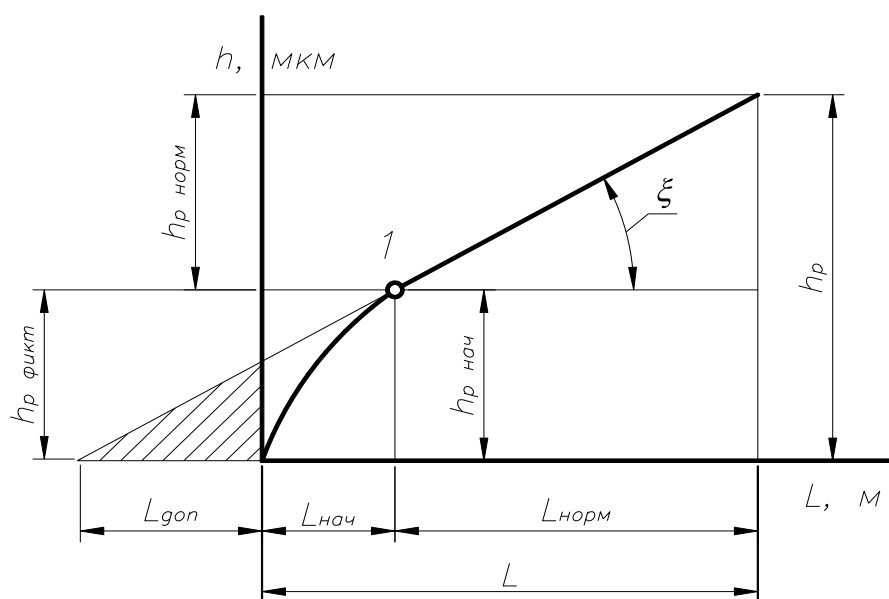


Рисунок 7.9. Зависимость размерного износа инструмента h_p от пути резания L

Наличие периода начального износа и его продолжительность зависят, прежде всего, от качества заточки и доводки инструмента. При высоком качестве заточенных поверхностей (низкая шероховатость, отсутствие дефектов поверхностного слоя, прижогов и др.) период приработки может быть крайне незначительным, то есть линейный характер графика будет сохранён, начиная с самого начала работы инструмента.

Интенсивность изнашивания инструмента может быть оценена с помощью относительного линейного износа U_0 :

$$U_0 = \frac{h_{p, \text{норм.}}}{L_{\text{норм.}}} = \text{tg} \xi \cdot \frac{M_{\text{hp}}}{M_L} \quad \text{мкм/км}, \quad (7.4)$$

где $h_{p, \text{норм.}}$ – размерный износ в период нормального изнашивания (в микрометрах); $L_{\text{норм.}}$ – путь резания соответствующий периоду нормального изнашивания (в километрах); M_{hp} – масштаб размерного износа мкм/мм; M_L – масштаб пути резания в км/мм.

Величина относительного износа является наиболее полной и объективной характеристикой размерного износа инструмента.

Для того, чтобы при расчётах точности обработки деталей наряду с нормальным износом учесть и начальный (повышенный) износ в период приработки, прибавляют к пути резания L «дополнительный путь» $L_{\text{доп}}$ (рисунок 7.9). В этом случае завышается величина размерного износа в самые первые мгновения работы резца. Так, при $L=0$, имеем фиктивную величину радиального износа $h_{p, \text{фикт.}}$. Но зато, существенно упрощаются технологические расчёты, и величина радиального износа определяется по формуле

$$h_p = U_0 \cdot (L + L_{\text{доп}}) \quad (7.5)$$

Величины U_0 и $L_{\text{доп}}$ могут быть найдены на основе прямой линии, отражающей линейный характер износа на его нормальной стадии. Значение $L_{\text{доп}}$ можно также принимать приблизительно, на основании рекомендаций: $L_{\text{доп}} = 500 \dots 1500$ м. Обычно принимают $L_{\text{доп}} = 1000$ м = 1 км.

С другой стороны, размерный износ h_p можно определить по формуле

$$h_p = h_{p, \text{фикт.}} + U_0 L \quad (7.6)$$

Зависимость $h_p = f(L)$ на участке нормального износа может быть представлена графически, как некая спрямляющая линия, построенная по экспериментальным точкам

Однако для технологических расчётов размерной точности обработки деталей, а также в исследовательских целях, часто требуется получение данной зависимости не в графической, а в аналитической форме. Поскольку на участке нормального износа функция $h_p = f(L)$ графически представлена в виде прямой, наклонённой под углом ξ к оси абсцисс (рисунок 7.9), то аналитически это есть линейная функция вида:

$$y = A_0 + A_1 x$$

Замена одной функциональной зависимости на другую называется аппроксимацией. В данном случае проведена линейная аппроксимация, поскольку

использована линейная функция. Для исследуемой зависимости $h_p=f(L)$ имеем $y=h_p$; $x=L$; и тогда:

$$h_p = A_0 + A_1 L, \quad (7.7)$$

где A_0 и A_1 – коэффициенты, которые необходимо определить.

Наиболее точным методом, при этом, является метод наименьших квадратов Согласно данному методу, описанному в соответствующей литературе, имеем:

$$\left\{ \begin{array}{l} n \cdot A_0 + A_1 \cdot \sum_{i=1}^n L_i = \sum_{i=1}^n h_{pi} , \\ A_0 \cdot \sum_{i=1}^n L_i + A_1 \cdot \sum_{i=1}^n L_i^2 = \sum_{i=1}^n L_i \cdot h_{pi} \end{array} \right. \quad (7.8)$$

где n – количество экспериментов; L_i и h_{pi} – значения соответственно пути резания и радиального износа для конкретного времени измерения с начала эксперимента.

Решая совместно уравнения системы (7.8) определяют A_0 и A_1 . Следует иметь в виду, что полученная линейная функция отражает лишь период нормального износа и не учитывает точки графика, принадлежащие периоду приработки (начальный износ). Учёт периода приработки возможен на основе формулы (7.6). Сравнивая формулы (7.6) и (7.7) видно, что $U_0 = A_1$, $h_p = A_0$. С другой стороны, по формуле 7.4 $U_0 = \text{tg} \xi$ и тогда $\text{tg} \xi = A_1$. Из заштрихованного треугольника (рисунок 7.9) имеем:

$$L_{дон} = \frac{h_{p.факт.}}{\text{tg} \xi} = \frac{A_0}{A_1} \quad (7.9)$$

Пример. Пусть в результате эксперимента получены следующие данные:

Путь резания от начала опыта L , км	2	3	4	5	6	7
Размерный износ резца h_p , мкм	21	25	31	38	40	45

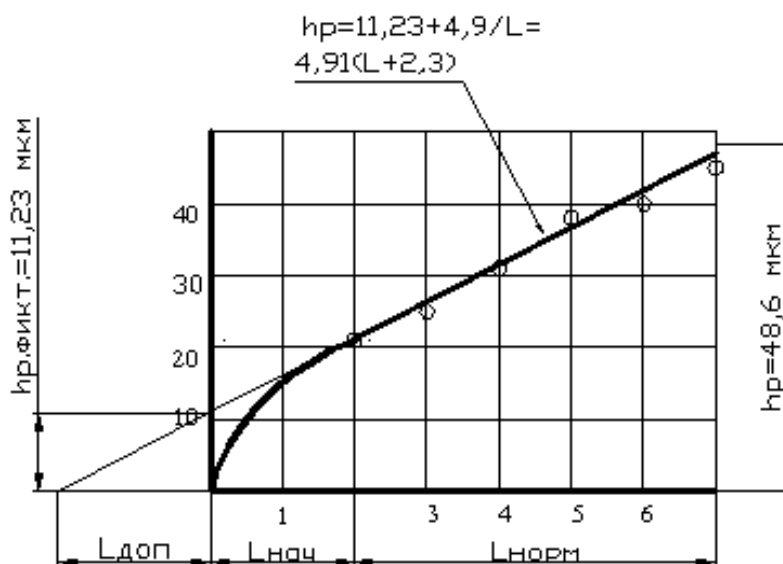


Рисунок 7.10. Зависимость $h_p=f(L)$ для условий обработки: заготовка Сталь45, резец – Т30К4; $t=0,25$ мм; $s=0,3$ мм/об; $V=300$ м/мин

Здесь количество экспериментов $n=6$. По экспериментальным точкам построена графическая зависимость $h_p=f(L)$ (рисунок 7.10).

Для нахождения аналитической зависимости, то есть определения коэффициентов A_0 и A_1 в уравнении (7.8), все исходные данные для расчёта удобно занести в таблицу.

Таблица 7.1. Исходные данные для расчёта

L	L^2	h_p	$L \cdot h_p$
2	4	21	42
3	9	25	75
4	16	31	124
5	25	38	190
6	36	40	240
7	49	45	315
$\sum_{i=1}^n L_i = 27$	$\sum_{i=1}^n L_i^2 = 139$	$\sum_{i=1}^n h_{pi} = 200$	$\sum_{i=1}^n (L_i \cdot h_{pi}) = 986$

При подстановке конкретных данных уравнение (7.8) будет иметь вид:

$$6 \cdot A_0 + A_1 \cdot 27 = 200,$$

$$A_0 \cdot 27 + A_1 \cdot 139 = 986.$$

Решая уравнения совместно, получаем: $A_0=11,23$; $A_1=4,91$. Используя формулу (7.7) окончательно имеем:

$$h_p = 11,23 + 4,91 \cdot L$$

На основании полученного линейного уравнения проводим прямую, аппроксимирующую участок нормального изнашивания инструмента. Крайние точки прямой находят, принимая последовательно $L=0$ (тогда $h_p=11,23$ мкм) и $L=7$ (тогда $h_p=48,6$ мкм) (рисунок 7.10).

Таким образом, имеем:

$U_0=A_1=4,91$ мкм/км; $h_{p.ф.икт.} = A_0=11,23$ мкм; $L_{доп} = A_0/A_1=11,23/4,91=2,3$ км.

И тогда: $h_p = U_0(L + L_{доп}) = 4,9(L + 2,3)$.

3 Оборудование, приборы, инструменты

3.1 Токарно-винторезный станок

3.2 Резец токарный проходной, прямой. Материал лезвия – быстрорежущая сталь. Геометрические характеристики: $\alpha=10^\circ$, $\gamma=15^\circ$, $\varphi=60^\circ$; $\varphi_1=30^\circ$

3.3 Прибор на основе волоконной оптики – модуль контроля размерного износа инструмента МКИРИ-2. Кронштейн для монтажа на станке измерительной головки прибора. (Лабораторная работа может быть проведена также на основе приспособлений, представленных на рисунках 7.4, 7.5)

3.4 Заготовка согласно эскизу, на рисунке 7.11. Материал – сталь 45.

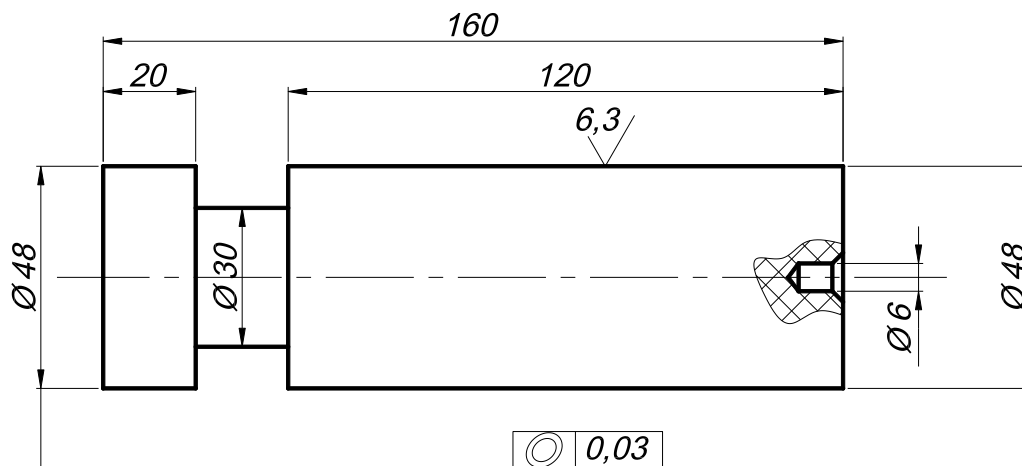


Рисунок 7.11. Эскиз заготовки

3.5 Штангенциркуль

3.6 Задний центр, вращающийся.

4 Содержание и порядок выполнения работы

4.1 Ознакомится с учебным материалом, изложенным в п.2.

4.2 Установить заготовку в токарный патрон. Радиальное биение заготовки не должно превышать 0,03 мм. Для избежания биения можно заготовку предварительно, перед собственно экспериментами, проточить «как чисто» на длине 120 мм проходным резцом, но не тем, который будет участвовать в экспериментах.

4.3 Установить с помощью кронштейна измерительную головку прибора на станок.

4.4 Установить исследуемый резец в резцедержатель. Продольная ось резца должна быть перпендикулярна оси шпинделя станка.

4.5 Перемещая маховиком поперечный суппорт, подвести резец к наконечникам измерительной головки и упереться вершиной резца в наконечник 13, а опорной базой в наконечник 14 (рисунки 7.6, 7.7). Записать показания цифрового вольтметра, которое должно быть в интервале 280...290. В противном случае необходима подналадка прибора (п. 2.2).

4.6 Вернуть поперечный суппорт с инструментом в исходное положение.

4.7 Измерить диаметр заготовки штангенциркулем.

4.8 Установить режимы резания: $n=400 \text{ мин}^{-1}$; $s=0,15 \text{ мм/об}$; $t=0,25 \text{ мм}$. Заготовку поджать задним центром. Точить на длине 120 мм, что при установленных n и s соответствует 2 минутам резания материала заготовки.

4.9 После каждого прохода, то есть через каждые 2 минуты резания, производить с помощью прибора измерение радиального износа и записывать показания цифрового вольтметра в таблицу (образец – таблица 7.2). Так же измерять диаметр проточенной поверхности и заносить данные в таблицу.

Таблица 7.2. Опытные данные

Параметры измерения	Время от начала эксперимента, мин.					
	2	4	6	8	10	12
Диаметр проточенной поверхности d , мм						
Путь резания от начала опыта L , км						
Размерный износ резца h_p , мкм						

Путь резания подсчитывается по формуле (7.2)

$$L = \frac{V \cdot \tau}{1000} = \frac{V \cdot \tau}{1000} \cdot 10^{-3} \text{ км}$$

Скорость резания:

$$V = \frac{\pi \cdot d_p \cdot n}{1000} \text{ м/мин,}$$

где d_p – расчётный диаметр. При малых значениях t можно считать $d_p = d$, где d – диаметр проточенной поверхности.

4.10 По результатам эксперимента построить графическую зависимость $h_p = f(L)$. Образец построения – рисунок 7.10.

4.11 Методом наименьших квадратов обработать результаты эксперимента и произвести линейную аппроксимацию функции $h_p = f(L)$ на участке нор-

мального износа (см. п.2.3). Данные для расчета занести в таблицу (таблица 7.1).

4.12 Составить отчет.

5. Содержание отчета

Отчёт по работе должен содержать следующие сведения.

5.1 Наименование работы. Цель и задачи.

5.2 Наименование и модель станка.

5.3 Эскиз головки резца с геометрическими параметрами: α , γ , φ , φ_1 , материал лезвия и его расшифровку

5.4 Материал заготовки, режимы резания n , s , t , V .

5.5 Результаты опытов и расчетов (см. таблицы 7.1, 7.5 и пример в пункте 2.3).

5.6 График зависимости $h_p=f(L)$.

5.7 Найденные величины U_o , $h_{p \text{ фикт}}$, $L_{\text{доп}}$, и формулу вида (7.7) с конкретными числовыми значениями.

6 Контрольные вопросы

6.1 Какие критерии для оценки износа инструмента принимают при чистовой обработке?

6.2 Что такое размерный износ инструмента и как он влияет на точность обрабатываемой поверхности: при наружной проточке, при растачивании отверстия?

6.3 Каким образом связан размерный износ h_p с линейным износом по задней поверхности h_z ?

6.4 С помощью каких устройств и как измеряется размерный износ резцов?

6.5 Как устроен прибор волоконной оптики для измерения размерного износа, как он работает?

6.6 Каким образом зависит величина размерного износа h_p от пути резания. Объясните полученную графическую зависимость?

6.7 Какой вид имеет функциональная зависимость $h_p=f(L)$. Объясните методику проведения экспериментов и обработки полученных результатов?

Лабораторная работа № 8

Расчет погрешности обработки при точении от размерного износа резца и определение его периода стойкости

1 Цель и задачи

Цель: получение практических умений и навыков расчета погрешности при точении от размерного износа инструмента; практических расчетов, связанных с размерным износом резцов.

Задачи: ознакомление с критериями размерного износа и методикой их определения; ознакомление с нормативными материалами по размерному износу.

2 Влияние размерного износа инструмента на точность обработки. Методика расчета погрешности от размерного износа резца

Размерный износ инструмента в направлении, перпендикулярном обрабатываемой поверхности (радиальный износ), существенным образом влияет на точность получаемого размера. Пусть, например, осуществляется наружная проточка поверхности диаметром d и длиной l (рисунок 8.1).

Изначально резец настроен на размер d . Однако, к концу проточки, то есть когда резец в продольном движении пройдет путь l , неизбежный радиальный износ инструмента h_p вызовет увеличение диаметра на втором торце заготовки на $2h_p$. То есть полученная поверхность будет являться не строго цилиндрической, а конусной. Если это увеличение размера укладывается в поле допуска, то деталь соответствует требованиям точности, если нет – то должна подвергаться выбраковке. Ясно, что величина h_p при обработке единичной детали весьма незначительна, однако и допуск на диаметр может быть весьма мал. С другой стороны, даже при малом h_p идет непрерывное увеличение (суммирование) радиального износа резца при обработке последующих деталей в партии. Если не осуществить коррекцию положения резца относительно заготовки, то погрешность размера детали, обусловленная суммарным размерным износом резца, быстро выйдет за пределы поля допуска. При этом резец, с точки зрения его режущей способности, еще вполне может быть пригоден к эксплуатации.

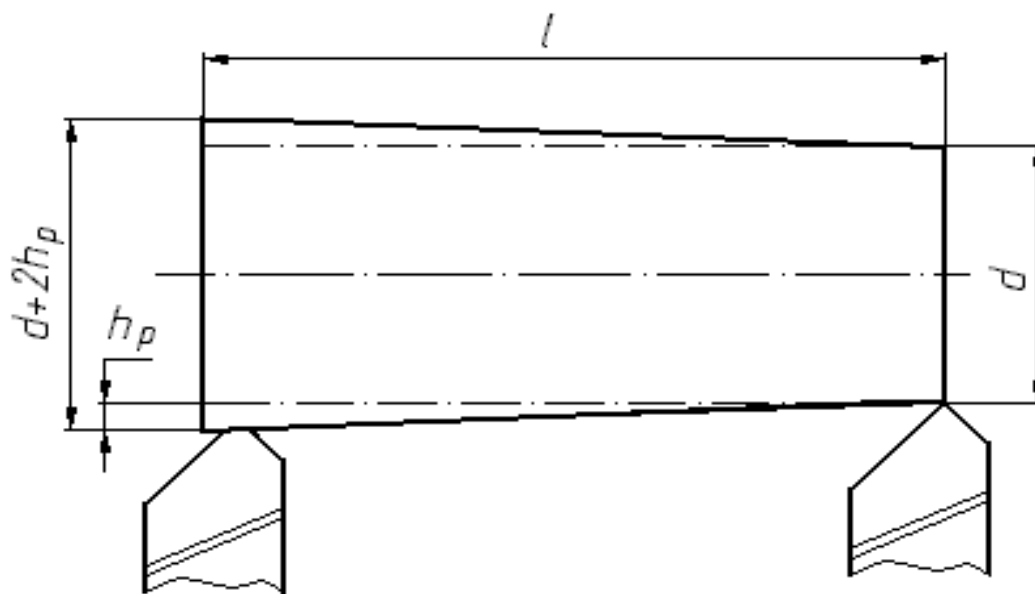


Рисунок 8.1. Изменение диаметра проточки в связи с радиальным износом h_p инструмента

Таким образом, при чистовой обработке высокоточных деталей важно уметь рассчитывать и учитывать погрешность обработки, обусловленную размерным износом инструмента, что и осуществляется на основе нормативных материалов по размерному износу [7]. Эти расчеты имеют большое значение при обработке деталей на автоматизированных станках, в том числе на станках с числовым программным управлением. На этих станках замена инструмента из-за размерного износа, или соответствующая коррекция его положения, во многих случаях осуществляется автоматически.

Для этого надо знать интервал времени между заменами инструмента или его подналадкой, что и рассчитывается на основе нормативных материалов. Возможен так же учет размерного износа инструмента путем его периодического и автоматического измерения с помощью тех или иных устройств (см. п. 2.2 лаб. работы № 7). Однако и в этом случае в управляющую программу необходимо ввести расчетные данные по предельно допустимому износу, сравнивая с которыми значение текущего износа, система ЧПУ принимает решение о замене инструмента или коррекции его положения.

Интенсивность размерного износа обычно оценивают величиной относительного (удельного) износа U_0 в микрометрах на 1000 метров (1 км) пути резания L .

Согласно формуле (7.3) имеем:

$$U_0 = \frac{h_p}{L}, \text{ мкм/км.}$$

Если, в результате предварительных исследований, установлена величина удельного износа U_0 для каких-то конкретных условий обработки, то, используя U_0 уже как нормативную величину и зная длину пути резания L_d , можно подсчитать радиальный износ инструмента при обработке одной детали:

$$h_{pD} = U_0 \cdot L_d, \quad (8.1)$$

где L_d – путь резания при обработке одной детали.

Длина пути резания L_d в метрах заготовки подсчитывается по формуле:

$$L_d = V \cdot \tau = \frac{\pi d l}{1000 \cdot s}, \quad (8.2)$$

где V – скорость резания, м/мин; τ – время обработки, мин; d – диаметр проточки, мм; s – подача, мм/об.

Длина пути резания L_N в метрах для партии, состоящей из N деталей:

$$L_N = L_d \cdot N. \quad (8.3)$$

Если между коррекциями своего положения инструмент обработал N_K деталей, то соответствующая длина пути резания L_K составляет:

$$L_K = L_d \cdot N_K \quad (8.4)$$

Общая суммарная длина пути резания L_Σ в метрах для всех деталей N_Σ , обработанных инструментом за его период стойкости T , равна:

$$L_{\Sigma} = L_{\partial} \cdot N_{\Sigma} \quad (8.5)$$

С другой стороны, период стойкости – это есть время, в течении которого резец «прошел» суммарный путь резания L_{Σ} в материале заготовки со скоростью резания V , т. е.

$$T = \frac{L_{\Sigma}}{V} \quad (8.6)$$

Для того, чтобы установить, сколько деталей N_K можно обработать инструментом до корректировки его положения относительно заготовки (размерная поднастройка инструмента), рассмотрим проточку наружной цилиндрической поверхности в размер d , заданный с каким-то допуском T – рисунок 8.2 (не следует путать допуск на размер T с периодом стойкости инструмента, который обозначается так же буквой T). Очевидно, что допуск на размер T равен:

$$T = es - ei, \text{ мкм,}$$

где es – верхнее отклонение размера от номинала; ei – нижнее отклонение размера от номинала.

Пусть вся система станок-приспособление-инструмент-деталь настроена таким образом, что при обработке первой детали из партии получен размер d , отстоящий от нижней границы поля допуска d_{\min} на 15% от T . "Запас" в 15% гарантирует, что при наложении каких-либо случайных погрешностей, в том числе и погрешностей измерения, размер детали не выйдет за пределы диаметра увеличивается на h_p после обработки каждой последующей детали в нижней границы поля допуска. По мере радиального износа инструмента партии. Когда диаметр детали достигнет величины, отстоящей от верхней границы поля допуска D_{\max} на 15% от T , необходимо осуществить коррекцию положения резца, то есть переместить поперечный суппорт по направлению к оси детали на величину $h_{\text{корр.}} = h_{\text{D. CVMM}}$.

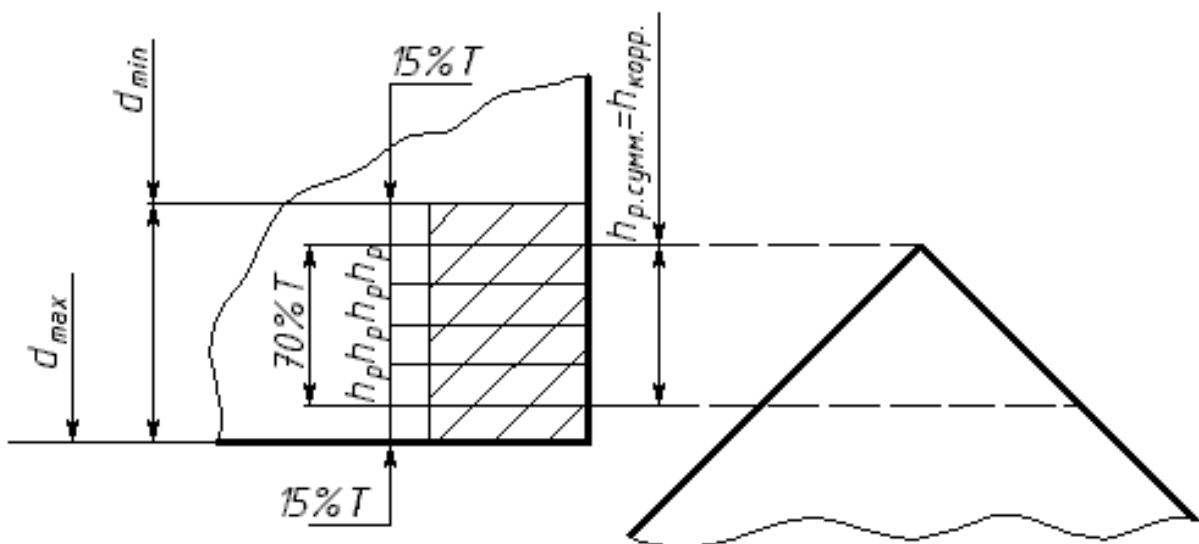


Рисунок 8.2. Распределение поля допуска в связи с радиальным износом резца

Запас 15 % от верхней границы поля допуска выбран по той же причине, что и для нижней границы. Исходя из схемы на рисунке 8.2 видно, что:

$$h_{p.сумм.} = 0,7T .$$

Но в то же время:

$$h_{p.сумм.} = N_K \cdot h_p ,$$

где N_K – количество деталей, которое может обработать инструмент до корректировки его положения. Следовательно:

$$h_{p.сумм.} = 0,7T = N_K \cdot h_p \quad (8.7)$$

Отсюда: можно определить N_K как

$$N_K = \frac{0,7 \cdot T}{h_p} \quad (8.8)$$

Очевидно, что если инструмент еще не потерял своей режущей способности, то его эксплуатация после корректировки продолжается и до следующей корректировки может быть обработана новая партия, состоящая из N_K деталей.

Однако режущая способность инструмента постепенно снижается, поскольку радиальный износ h_p по сути есть следствие износа резца по задней поверхности h_3 (см. рисунок 7.1 – лаб. работа № 7). При чистовой обработке можно считать, что предельно допустимое значение h_3 для твердосплавных резцов составляет 0,8 мм. При этом износ резца в радиальном направлении h_p составляет примерно 0,1 мм или 100 мкм. Таким образом можно считать, что предельный износ резца в радиальном направлении $h_{p.пред.} = 100$ мкм .

Определение общего количества деталей N_Σ , которое инструмент может обработать до замены в связи с его предельным размерным износом, осложняется тем, что на начальной стадии (период приработки) изнашивание идет более интенсивно и не подчиняется линейному закону. Для учета этого условно увеличивают полученную расчетную длину резания для всех обработанных деталей L_Σ на некоторую величину «дополнительного пути» $L_{доп}$ (рисунок 7.9). Обычно в среднем принимают $L_{доп} = 1000\text{м} = 1\text{км}$. Тогда путь резания L_Σ , пройденный резцом в материале заготовки, равен:

$$L_\Sigma = L_d \cdot N_\Sigma + L_{доп} , \quad (8.9)$$

где L_d – путь резания для одной детали; $L_{доп}$ – «дополнительный» путь, 1 км.

Но тогда для всех обработанных деталей радиальный износ $h_{p.\Sigma}$, который должен быть не больше или равен предельному размерному износу $h_{p.пред.}$, составит:

$$h_{p.\Sigma} = U_0 \cdot L_\Sigma = U_0 (L_d \cdot N_\Sigma + L_{доп}) \leq h_{p.пред.} \quad (8.10)$$

Отсюда:

$$N_{\Sigma} = \frac{h_{p.пред.} - U_0 \cdot L_{доп}}{U_0 \cdot L_d} \quad (8.11)$$

Тогда количество коррекций инструмента:

$$K = \frac{N_{\Sigma}}{N_K} \quad (8.12)$$

Значение относительного износа U_0 для наиболее типовых обрабатываемых и инструментальных материалов представлены в таблице 8.1 [7]. В связи с тем, что глубина резания несущественно влияет на величину относительного износа, в таблице данный параметр резания не указывается. Учитывая, что числовые данные таблицы относятся именно к чистовой, окончательной обработке, можно считать, что глубина резания в среднем составляет 0,5 мм. Значения подач могут изменяться в интервале 0,1...0,6 мм/об.

Таблица 8.1. Относительный износ (мкм/км) резцов при чистовом точении

Материал режущего инструмента	Материал заготовки	
	Углеродистая сталь	Легированная сталь
T30K6	0,7 ... 0,4	0,7 ... 0,4
T30K4	3 ... 4	4 ... 6
T15K6	5 ... 7	9 ... 10
T15K10	8	12 ... 13
BK8		17 ... 25
BK4		25 ... 30

Размерный износ инструмента является хоть и важной, но лишь одной из погрешностей обработки деталей на станках и входит составной частью при расчетах или исследованиях суммарной погрешности обработки. Учет всех, так называемых, элементарных погрешностей при расчете рассматривается в рамках дисциплины «Технология машиностроения». В данной практической работе в учебных целях рассматривается лишь расчет именно погрешности от износа инструмента. Ниже представлен пример такого расчета.

3 Пример расчета

Исходные данные. Осуществляется проточка вала из Стали 45: длина проточки $l=320$ мм, диаметр проточки $d=80h7$. Инструмент – проходной прямой резец, материал режущей части – твердый сплав T15K6. Скорость резания $v=200$ м/мин, подача $S=0,3$ мм/об. Глубина резания $t=0,5$ мм.

Определить: количество деталей, которое может быть проточено без дополнительной корректировки положения инструмента, указать, в чем должна заключаться корректировка; общее количество деталей, которое можно обработать резцом до его замены; количество коррекций положения инструмента; период стойкости резца.

Решение. Допуск на диаметр 80h7 определяем исходя из верхнего и нижнего отклонения данного размера от его номинальной величины (величины отклонений определяем по справочной литературе): верхнее отклонение $es = 0$, нижнее отклонение $ei = -30\text{мкм}$. Тогда допуск:

$$T = es - ei = 0 - (-30) = 30\text{мкм}.$$

Относительный износ U_0 по таблице 8.1 для стали 45 (углеродистая сталь) и материала инструмента Т15К6 составляет 5...7 мкм/км. Принимаем для расчета $U_0 = 6\text{мкм/км}$.

Путь резания при обработке одной детали составляет:

$$L_d = \frac{\pi d l}{1000 \cdot S} = \frac{3,14 \cdot 80 \cdot 320}{1000 \cdot 0,3} = 268\text{м} \approx 0,27\text{км}.$$

Радиальный износ h_p при этом равен:

$$h_p = U_0 \cdot L_d = 6 \cdot 0,27 = 1,62 \text{ мкм}.$$

Количество деталей, которое резец может обработать до корректировки:

$$N_K = \frac{0,7 \cdot T}{h_p} = \frac{0,7 \cdot 30}{1,62} \approx 13 \text{ деталей}$$

Общее количество обработанных инструментом деталей до его замены:

$$N_\Sigma = \frac{h_{p,\text{пред.}} - U_0 \cdot L_{\text{доп}}}{U_0 \cdot L_d} = \frac{100 - 6 \cdot 1}{6 \cdot 0,27} \approx 58 \text{ деталей}$$

Количество корректировок положения инструмента:

$$K_{\text{и}} = \frac{N_\Sigma}{N_K} = \frac{58}{13} = 4,46$$

Количество корректировок округляем в меньшую сторону, т. е. $K_{\text{и}} = 4$. Это ведет к уменьшению общего количества обработанных деталей, но гарантирует большую вероятность получения требуемых характеристик качества поверхности, например, шероховатости, для всех деталей, в том числе и тех, которые будут обработаны после последней корректировки инструмента, когда его износ уже близок к предельному значению.

Таким образом, окончательно, общее количество деталей, обработанное резцом до его замены, составит:

$$N_\Sigma = N_K \cdot K_{\text{и}} = 13 \cdot 4 = 52 \text{ детали}.$$

Период стойкости резца равен:

$$T = \frac{L_\Sigma}{v} = \frac{L_d \cdot N_\Sigma}{v} = \frac{268 \cdot 52}{200} \approx 70 \text{ мин}.$$

4 Содержание отчета

Согласно индивидуальному заданию (таблица 8.2) необходимо рассчитать и представить в качестве отчета следующее.

4.1 Наименование практического занятия, номер индивидуального задания.

4.2 Эскиз заготовки со схемой её установки на станке (см. эскиз в таблице 8.2).

4.3 Условие поставленной задачи и все исходные числовые данные.

4.4 Решение поставленной задачи со всеми расчетами. При решении необходимо:

- определить количество деталей, которое может быть обработано без дополнительной коррекции положения инструмента;
- определить количество коррекций положения инструмента за период его постановки в работу до замены в связи с износом;
- определить общее количество деталей, которое обработает инструмент до его замены;
- определить период стойкости инструмента;
- оформить схему распределения поля допуска в связи с радиальным износом резца в пределах времени между коррекциями инструмента (то есть при обработке N_k деталей). Пример оформления – рисунок 8.2. Схему строить в произвольном масштабе. Вместо обозначений в общем виде проставить конкретные значения величин согласно произведенным расчетам.

5 Контрольные вопросы

5.1 Каким образом размерный износ резца влияет на точность формы и размеров: при проточке наружной цилиндрической поверхности; при расточке отверстия; при подрезке торца? В чем заключается коррекция положения инструмента при данных видах обработки?

5.2 Что является характеристикой размерного износа резца?

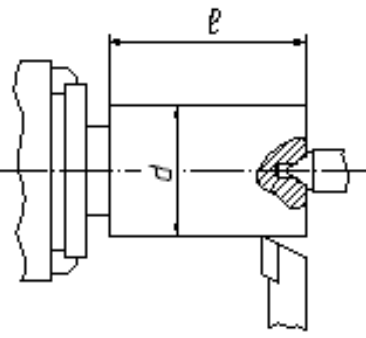
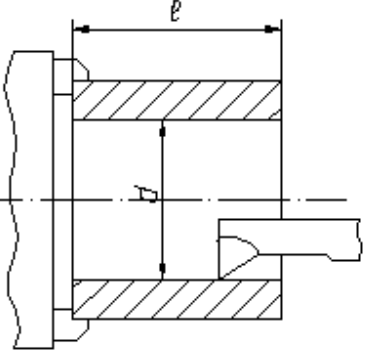
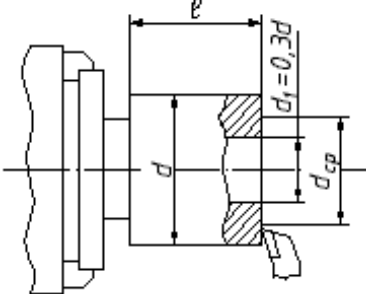
5.3 Чем оценивается интенсивность размерного износа, и какова размерность принятого для оценки параметра?

5.4 Каким образом рассчитывается путь резания: для одной детали, для партии деталей, обработанных инструментом между корректировками его положения; для всех деталей, обработанных за весь период стойкости инструмента?

5.5 Что такое «дополнительный путь резания» и почему его приходится учитывать при расчетах?

5.6 Каким образом радиальный износ связан с износом резца по задней поверхности? Каков предельно допустимый радиальный износ твёрдосплавного резца и почему?

Таблица 8.2. Индивидуальные задания

Вариант	Эскиз детали, условия обработки	d , мм	l , мм	Материал заготовки	Инструмен- тальный ма- териал	V , м/ми н	S , мм/ об
1	 <p>Проточить наружную по- верхность прямым проход- ным резцом в размер d.</p>	40h9	250	Сталь45	T15K6	160	0,1
2		50d9	280	40X	T30K6	140	0,25
3		60f8	300	Сталь50	T5K10	200	0,4
4		70h8	350	30ХГС	BK8	150	0,35
5		80e8	400	У8	T30K4	250	0,2
6		90f8	420	65Г	BK4	200	0,25
7		100h 8	450	12X18H1 0T	BK8	180	0,1
8		110h 9	500	30ХГС	BK8	250	0,25
9	 <p>Расточить отверстие диа- метром d расточным резцом.</p>	70h8	100	12X18H1 0T	BK8	200	0,2
10		80f8	110	Сталь45	T15K6	250	0,25
11		90h7	120	65Г	BK4	180	0,3
12		100f 7	140	30ХГС	BK8	150	0,1
13		110h 8	160	20ХГСА	T30K4	250	0,15
14		120f 7	180	40X	T30K6	240	0,35
15		130e 8	190	Сталь20	T5K10	180	0,4
16	140h 9	200	У7	T15K6	200	0,1	
17	 <p>Подрезать торец подрезным</p>	200	100f8	40X	T30K6	240	0,1
18		210	110h8	30ХГС	T30K4	200	0,1
19		230	115e8	20X	T30K6	250	0,15
20		250	120f8	Сталь45	T5K10	150	0,2
21		280	125h8	У7	T30K4	220	0,25
22		290	130f8	20ХГСА	BK8	180	0,15

Вариант	Эскиз детали, условия обработки	d , мм	l , мм	Материал заготовки	Инструмен- тальный ма- териал	V , м/ми н	S , мм/ об
23	резцом в размер l . (Приме- чание: скорость резания в задании указана как усред- ненная для $d_{cp} = \frac{d + d_1}{2}$)	300	140h8	Сталь50	T5K10	150	0,2
24		320	150f8	65Г	BK4	150	0,25

Лабораторная работа № 9 Исследование силовых зависимостей при точении

1 Цели и задачи

Цель работы – получение практических умений и навыков исследований зависимостей силы резания при точении от режимов обработки, глубины резания, подачи, скорости резания.

Задачи: ознакомление с методикой и аппаратурой для измерения сил резания при точении; получение навыков экспериментального исследования силовых зависимостей и умения математической обработки полученных результатов.

2 Сила резания, и её составляющие при точении

2.1 Физическая природа сил, действующих на лезвие

В процессе резания на лезвие инструмента со стороны заготовки действуют силы, представленные на рисунке 9.1.

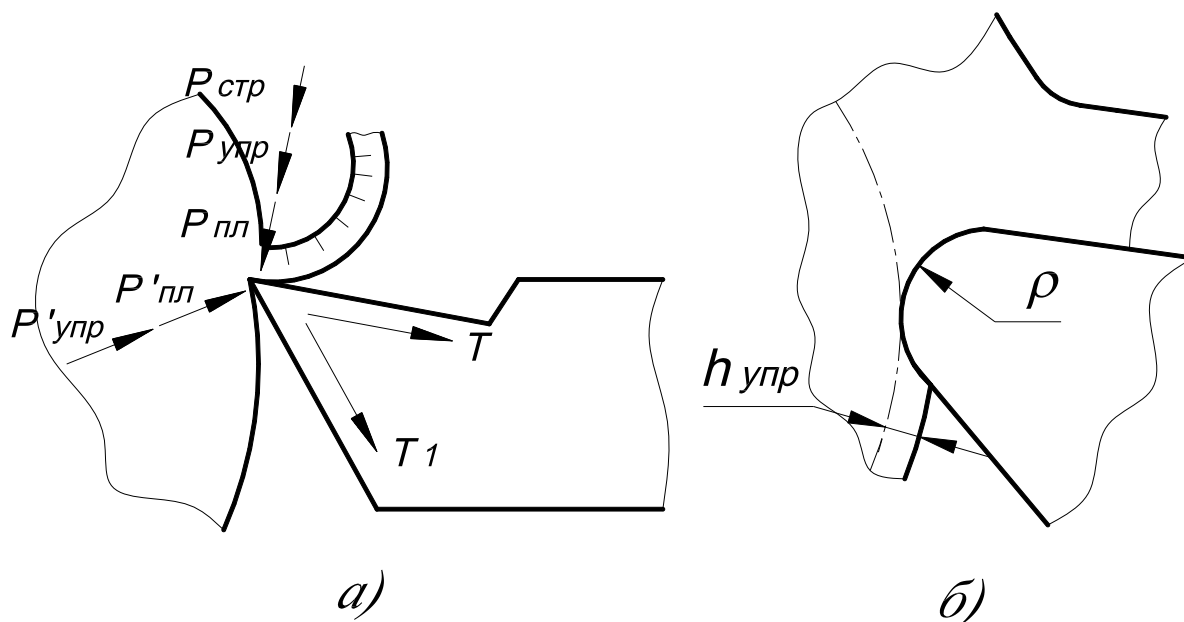


Рисунок 9.1. Физическая природа сил, действующих на режущее лезвие: а – схема сил; б – схема образования наклёпанного слоя

Физическая природа этих сил различна: $P_{упр}$, $P_{пл}$ – соответственно сила упругой и сила пластической деформации металла срезаемого слоя, действующие на переднюю поверхность лезвия; $P'_{упр}$, $P'_{пл}$ – соответственно сила упругой и пластической деформации металла обработанной поверхности действующие на заднюю поверхность лезвия; $P_{стр}$ – сила сопротивления срезаемой стружки дополнительной деформации изгиба и ломанию; T , T_1 – соответственно сила трения, действующая на переднюю и на заднюю поверхности, режущего лезвия. При движении лезвия в материале заготовки вновь образованная поверхность детали (поверхность резания), частично восстанавливается на некоторую величину $h_{упр}$ за счёт упругих (рисунок 9.1, б) сил. В результате задняя поверхность лезвия в районе, прилегающем непосредственно к режущей кромке, испытывает со стороны обработанной поверхности интенсивное силовое воздействие в виде сил $P'_{упр}$, $P'_{пл}$, T_1 . Это воздействие характерно и для остро заточенного лезвия, но оно тем более имеет место из-за наличия на режущей кромке радиуса закругления ρ (см. так же лаб. работу № 4, рисунок 4.4). С увеличением затупления инструмента все силы, действующие на лезвие, существенно растут.

2.2 Составляющие силы резания

Теоретический расчёт отдельных сил, действующих на лезвие, исходя из прочностных свойств обрабатываемого материала, геометрических параметров лезвия, размеров контактных площадок, значения ρ и других показателей, хотя и возможен, но является сложным, трудоёмким, не даёт стабильного результата. Задача решается более просто, если суммарную силовую нагрузку на лезвие со стороны рассмотренных сил заменить некоторой, изначально неизвестной равнодействующей – векторной величиной \vec{R} . Равнодействующую \vec{R} представляют в декартовой системе координат как сумму векторов \vec{P}_x , \vec{P}_y , \vec{P}_z (см.

рисунок 9.2), которые по сути, являются проекциями \vec{R} на соответствующие оси.

То есть:

$$\vec{R} = \vec{P}_x + \vec{P}_y + \vec{P}_z \quad (1)$$

или:

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

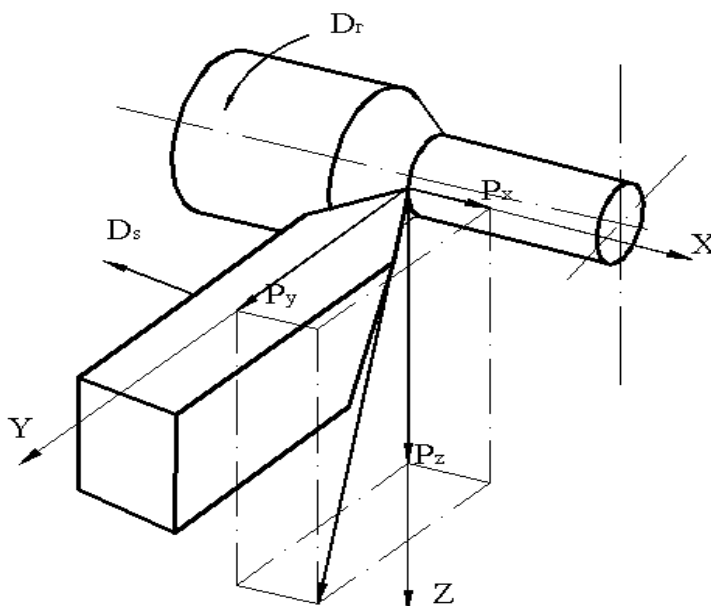


Рисунок 9.2. Составляющие силы резания

Составляющие силы R получили следующие названия:

P_x – осевая составляющая;

P_y – радиальная составляющая;

P_z – вертикальная (главная) составляющая.

Соотношения величин P_x , P_y , P_z не постоянно и существенно зависит как от геометрических параметров лезвия, так и от режимов резания. Как правило, вертикальная составляющая P_z в 3...4 раза больше, чем P_x и P_y . Поэтому при расчётах режимов резания под «силой резания» принято понимать именно P_z и часто эта составляющая пишется без индекса, то есть как P .

Значение составляющих силы резания, прежде всего P_z , и их зависимости от режимов резания достаточно просто и надёжно могут быть определены экспериментом. Это знание необходимо для расчётов, например, изгибной прочности державки инструмента, крутящего момента на шпинделе и мощности привода и др.

2.3 Аппаратура и методика экспериментального определения сил резания

Силы резания определяют экспериментальным путём с помощью различных устройств и приборов, которые называются динамометрами. Динамомет-

ры, имеющие лишь один измерительный элемент, применяются обычно для измерения вертикальной (главной) составляющей силы резания P_z и называются однокомпонентными. Именно такой динамометр используется в данной лабораторной работе. Конструкция динамометра представлена на рисунке 9.3.

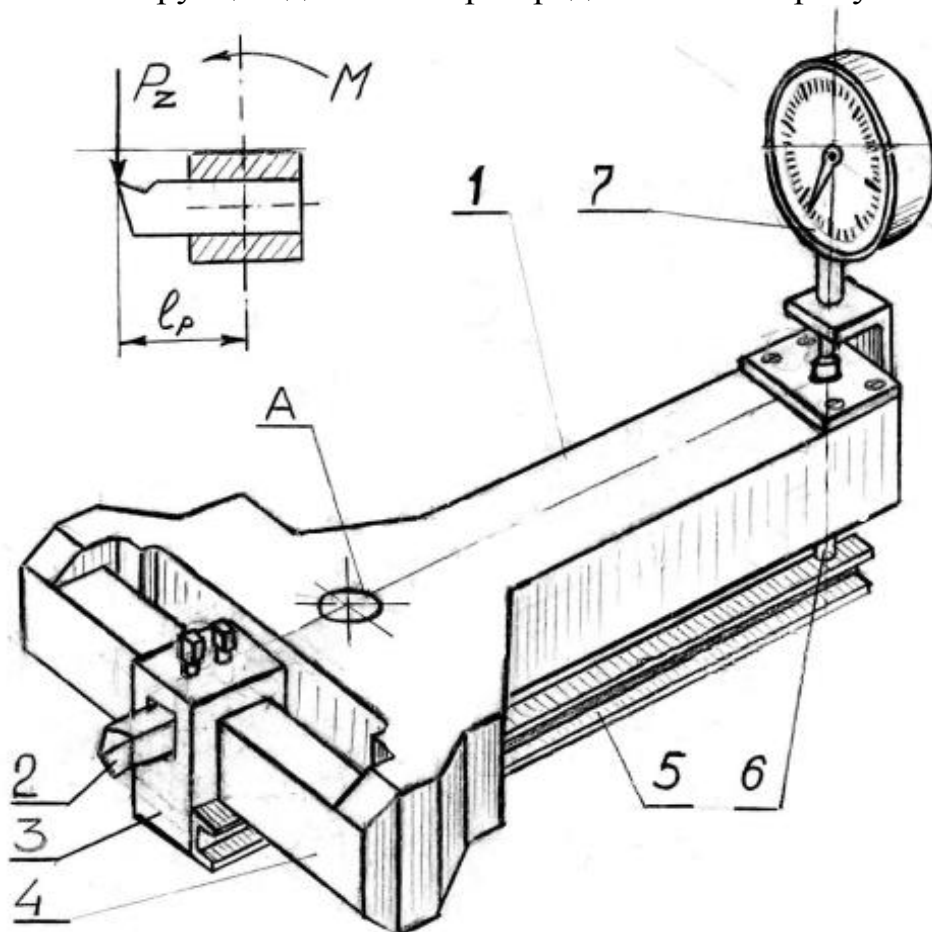


Рисунок 9.3. Рычажный токарный динамометр

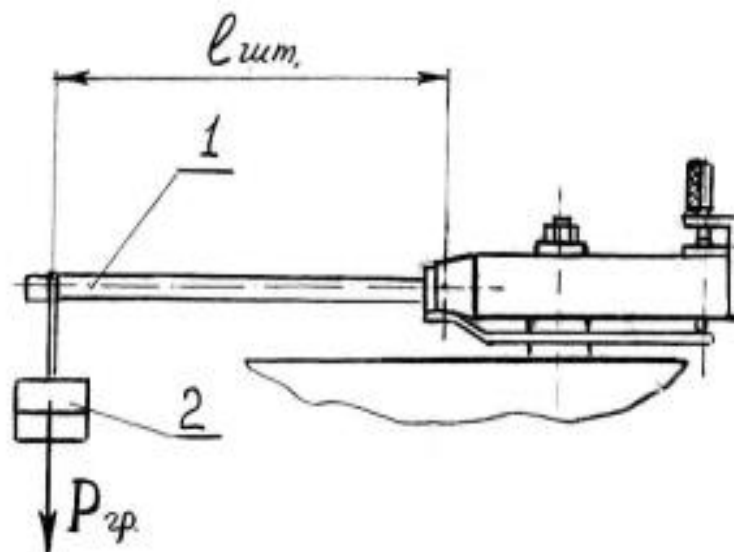


Рисунок 9.4. Схема тарирования динамометра

Динамометр устанавливается на суппорт токарного станка, с которого предварительно демонтируют резцедержатель. Корпус 1 отверстием А монти-

руют на оси, на которой находился резцедержатель. Резец 2 закрепляют болтами в державке, жестко связанной с поперечиной 4, выполненной в виде бруса прямоугольного сечения, который связан по концам с корпусом 1. К державке 4 прикреплён рычаг 5, который вторым своим концом упирается в стержень 6, смонтированный подвижно в направляющих корпуса 1. Стержень 6 упирается в измерительную ножку индикатора 7.

Работает динамометр следующим образом. При протачивании резцом заготовки вертикальная (главная) составляющая силы резания P_z , действуя на резец, стремится отклонить его вершину вниз, создавая крутящий момент относительно оси поперечины 4. Закручиваясь, брус поперечины поворачивается на весьма малый угол.

Вместе с брусом поворачивается и рычаг 5, который вторым своим концом перемещает стержень 6 вверх. Величина перемещения стержня фиксируется индикатором. Очевидно, чем больше сила резания, тем больше величина перемещения стержня и выше показания индикатора.

Перед экспериментальными исследованиями динамометр необходимо протарировать, то есть получить тарировочный график. Тарировка производится в следующем порядке (рисунок 9.4):

- 1) Динамометр устанавливается на станок вместо резцедержателя.
- 2) Вместо резца в державку устанавливают штангу 1 (рисунок 9.4), измеряют длину $l_{шт}$;
- 3) Индикатор выставляют на «Ноль»;
- 4) На свободный конец штанги навешивают груз 2 и записывают показания индикатора.
- 5) Последовательно и равномерно увеличивают вес груза, каждый раз фиксируя показание индикатора. Необходимо получить не менее пяти точек на тарировочном графике, для чего используют набор специальных тарировочных грузов.
- 6) Строят тарировочный график, для чего вес грузов откладывают по оси абсцисс, а соответствующие показания индикатора откладывают по оси ординат. При пользовании графиком, во время экспериментов для определения силы резания, необходимо показания индикатора пересчитывать с учётом длин плеч резца l_p (рисунок 9.3) и штанги $l_{шт}$ (рисунок 9.4) по следующей формуле:

$$P_z = k \cdot P'_z = \frac{l_{шт}}{l_p} \cdot P'_z, \quad (9.3)$$

где k – поправочный коэффициент; P_z – фактическая сила резания, кг; P'_z – сила, соответствующая показанию индикатора согласно тарировочному графику, кг; $l_{шт}$ – длина плеча штанги, мм; l_p – длина вылета резца, мм.

Кроме рассмотренного выше динамометра при исследовании сил резания используются и другие, более сложные и совершенные конструкции: двухкомпонентные динамометры для измерения одновременно сил P_z и P_y или P_z и P_x ; трёхкомпонентные – для измерения одновременно P_x , P_y , P_z . По принципу действия они могут быть электрические (на основе тензодатчиков), гидравличе-

ские, механические. Достоинства и недостатки каждого типа, область их применения подробно представлены в технической литературе [2, 3, 8].

2.4 Методика обработки экспериментальных данных

Взаимосвязь сил резания и технологических режимов может быть достаточно точно представлена эмпирической зависимостью, которая описывается степенной функцией вида представленной на рисунке 9.5 а.

$$y = Ax^m, \quad (9.4)$$

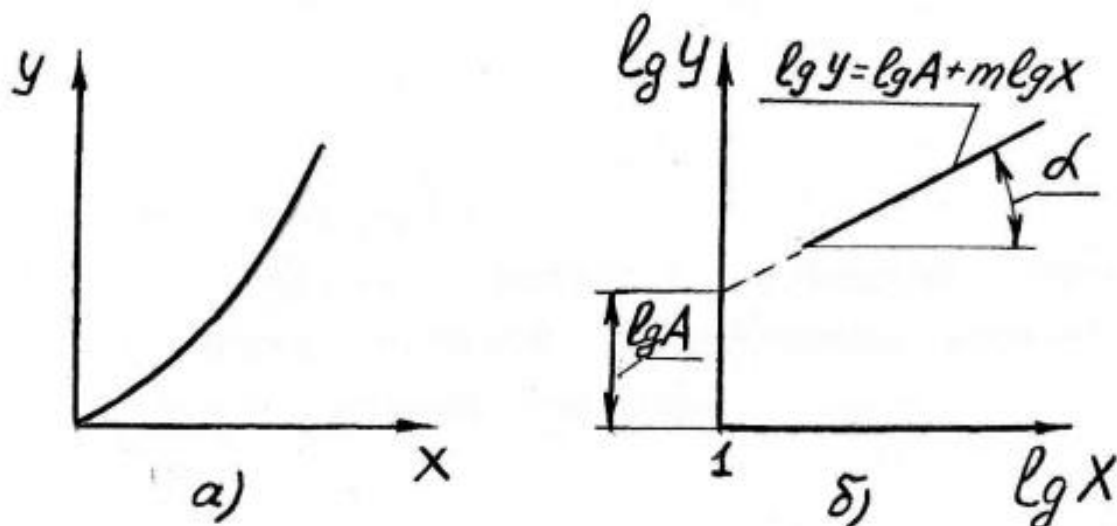


Рисунок 9.5. Графики степенной функции

Нахождение величин, входящих в данное уравнения, возможно при использовании двойной логарифмической системы координат. В этом случае по координатным осям откладывают не сами величины, а их логарифмы.

Если прологарифмировать выражение (4), то получим

$$\lg y = \lg A + m \lg x, \quad (9.5)$$

Что аналогично уравнению прямой линии

$$y = a + bx. \quad (9.6)$$

Это означает, что в двойной логарифмической системе координат степенная функция представлена как прямая линия. Причём значение показателя степени m в выражении (9.4) и (9.5) соответствует тангенсу угла α наклона, прямой к положительному направлению оси абсцисс, а $\lg A$ – отрезку, отсекаемому прямой на оси ординат при $x = 1$ (рисунок 9.5, б).

Допустим, надо установить функциональную зависимость силы P_z от глубины резания t , то есть $P_z = f(t)$. Известно, что эта зависимость выражается степенной функцией вида (4), а именно:

$$P_z = C'_{pz} \cdot t^{X_{pz}} \quad (9.7)$$

Задача исследования заключается в определении значений X_{pz} и C'_{pz} . Для этого проводят эксперименты по определению силы резания P_z при различных

значениях глубин резания (не менее пяти значений), оставляя все остальные режимы резания (скорость резания V и подачу S) неизменными. Результаты опытов наносят на двойную логарифмическую сетку (рисунок 9.6).

Используя полученные точки, проводят прямую, таким образом, чтобы сумма расстояний от экспериментальных точек до неё была минимальной. Тангенс угла наклона, который можно измерить непосредственно транспортиром или рассчитать из заштрихованного треугольника по величинам катетов, даст величину X_{pz} : $X_{pz} = \text{tg}\alpha$.

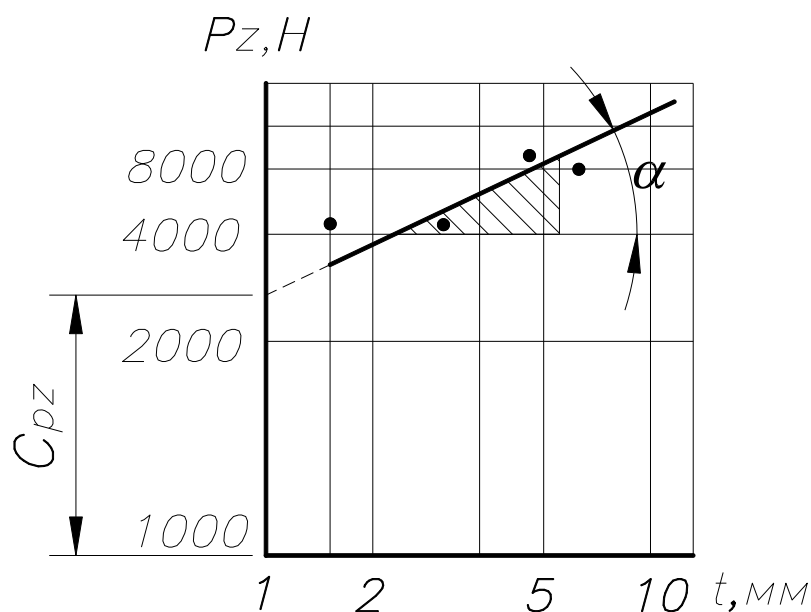


Рисунок 9.6. Графическое определение констант в выражении (7)

Отрезок, который отсечет прямая на оси ординат при $t=1$, т. е. при $\lg t=0$, даст значение C'_{pz} .

Аналогичным образом могут быть найдены значения констант и в частных зависимостях силы P_z от подачи S и скорости резания V , а именно:

$$P_z = C''_{pz} \cdot S^{Y_{pz}}, \quad (9.8)$$

$$P_z = C'''_{pz} \cdot V^{Z_{pz}}. \quad (9.9)$$

Для нахождения обобщённой зависимости силы P_z одновременно от t , S , V проводят математическую обработку частных зависимостей (решают их совместно). Обобщенная зависимость имеет вид:

$$P_z = C_{pz} \cdot t^{X_{pz}} \cdot S^{Y_{pz}} \cdot V^{Z_{pz}} \quad (9.10)$$

Представленный выше графический метод обработки результатов экспериментов прост, но проведение прямой по экспериментальным точкам не всегда отвечает требованиям точности. Поэтому, наряду с графическим методом, используются и другие, например, метод наименьших квадратов (см. лаб. работу № 7).

По степени значимости, то есть по степени влияния на силу резания, режимные факторы располагаются следующим образом: наибольшее влияние на P_z оказывает глубина резания t ; второй по значимости фактор – подача S ; ско-

рость резания V – наименее значимый фактор. При этом влияние скорости резания носит сложный характер? что связано с воздействием на процесс резания наростообразования.

Влияние на P_z свойств обрабатываемого материала (твёрдость, пластичность, вязкость и др.) характеризуется коэффициентом C_{pz} . Что касается составляющих силы резания P_x и P_y , то определение их зависимости от режимных факторов, при наличии соответствующих динамометров, производится так же, как и P_z .

3 Оборудование, приборы, инструменты

3.1 Токарно-винторезный станок.

3.2 Резец проходной отогнутый с пластинкой твёрдого сплава Т15К6, сечение державки 25x25 мм, длина резца – 150 мм. Углы резания: $\alpha=8...10^\circ$; $\gamma=10^\circ$; $\varphi=45^\circ$; $\varphi_1=45^\circ$; $r=0,3$ мм.

3.3 Рычажный токарный динамометр.

3.4 Грузы и штанга для тарировки динамометра (5 грузов по 10 кг).

3.5 Индикатор часового типа с ценой деления 0,01 мм.

3.6 Штангенциркуль.

3.7 Обрабатываемые образцы из Ст3 или стали 45. Размеры образца – $\varnothing 60...80$ мм, $l=100...200$ мм.

4 Порядок выполнения работы

4.1 Снять с суппорта резцедержатель, установить на ось резцедержателя динамометр.

4.2 Вместо резца в державке динамометра закрепить штангу. Измерить вылет штанги $l_{шт}$ от оси поперечины (прямоугольный брус) динамометра до места подвески грузов (рисунок 9.4).

4.3 Установить индикатор на ноль.

4.4 Последовательно навешивая на штангу грузы суммарным весом 10, 20, 30, 40, 50 килограмм, каждый раз записывать показания индикатора. Данные занести в таблицу (образец – таблица 9.1).

4.5 Построить тарировочный график, откладывая по оси абсцисс вес грузов, а по оси ординат – соответствующие этим показания индикатора.

4.6 Снять штангу и вместо неё в державке динамометра закрепить резец.

4.7 Измерить вылет резца из державки l_p (см. рисунок 9.3) от оси поперечины до вершины резца.

4.8 Установить в токарный патрон и подпереть задним центром образец для исследований. Измерить диаметр заготовки. Это измерение проводить перед каждым экспериментом.

4.9 Провести исследование зависимости силы резания P_z от глубины резания t при постоянных значениях скорости резания: $n=400$ мин⁻¹, пересчитать на частоты вращения шпинделя, используя диаметр заготовки – см. формулу (9.9), $S=0,25$ мм/об. Глубину резания последовательно назначать: 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5 мм. При каждой глубине резания и указанных значениях v и S провести

проточки заготовки и записать показания индикатора в таблице 9.1. Частоту вращения шпинделя n пересчитать в скорость резания V по формуле (9.11).

4.10 Провести исследование зависимости силы резания P_z от величины подачи при постоянных значениях скорости резания и глубины резания. Для этого установить следующие режимы обработки: $n=400\text{мин}^{-1}$; $t=1$ мм; подачу S последовательно назначать: 0,3; 0,5; 0,7; 0,9; 1,1 мм. При каждой подаче провести проточку заготовки и записать показания индикатора в таблицу 9.1. Частоту вращения шпинделя n пересчитать в скорость резания V по формуле (9.11).

4.11 Провести исследование зависимости силы резания P_z от величины скорости резания при постоянных значениях глубины резания и подачи. Для этого установить следующие режимы обработки: $t=2$ мм; $S=0,25$ мм/об. Частоту вращения шпинделя последовательно назначать: 400; 500; 630; 800мин^{-1} .

Пересчитать частоту вращения шпинделя в скорость резания в мм/мин по формуле:

$$V = \frac{\pi d n}{1000} \text{ м / мин}, \quad (9.11)$$

где d – диаметр заготовки, мм.

При каждой частоте вращения шпинделя провести проточку заготовки и записать показания индикатора в таблицу 9.1 (Примечание: в связи с относительно меньшей значимостью и сложным влиянием скорости резания на силу резания данное исследование, при недостатке времени можно не проводить).

5 Оформление отчёта

5.1 Указать наименование работы, дать формулировку её целей и задач.

5.2 Указать тип станка и его обозначение.

5.3 Указать размеры исходной заготовки, марку материала, дать расшифровку обозначения материала заготовки.

5.4 Дать наименование режущего инструмента. Указать материал режущей части и дать его расшифровку. Выписать геометрические параметры заточки: α ; γ ; ϕ ; ϕ_1 ; r .

5.5 Построить тарифовочный график и рассчитать поправочный коэффициент k (см. формулу 3). Коэффициент и его расчёт представить под таблицей.

5.6 Оформить результаты проведения экспериментов в виде таблицы 9.1.

Таблица 9.1 Результаты исследований

№ опыта	Диаметр образца до обработки, мм.	Технологические режимы				Показания индикатора, в делениях	P_z , н
		t , мм	S , мм/об	n , мин^{-1}	V м/мин		

5.7 По результатам каждого из исследований, проведённых согласно п. 4.9, 4.10, 4.11, построить соответствующие графические зависимости в обычных и логарифмических координатах.

Например, по результатам исследования зависимости силы P_z от глубины резания t строят график функций $P_z=f_1(t)$. Для чего по оси абсцисс откладывают значения глубин резания, назначаемых при эксперименте, а на оси ординат – соответствующие значения силы P_z . По полученным точкам строят «графически сглаженную» кривую $P_z=f_1(t)$. При правильно проведённом эксперименте характер полученной кривой должен соответствовать графической зависимости на рисунке 9.5, а. Рядом с полученным графиком строят график этой же функции, т. е. $P_z=f_1(t)$, но в двойных логарифмических координатах. При этом шкалы по осям абсцисс и ординат принято оформлять не как логарифмы величин, а как сами величины, т. е. по оси абсцисс пишут значения t , а по оси ординат – P_z . Однако координаты точек на осях (в соответствующем масштабе) определяются как логарифмы t и P_z . Образец – рисунок 9.7.

Графики зависимостей $P_z=f_2(t)$ и $P_z=f_3(t)$ строятся аналогично.

5.8 Используя графики, построенные в двойных логарифмических координатах, определяют значения коэффициентов C'_{pz} , C''_{pz} , C'''_{pz} и показателей степеней X_{pz} , Y_{pz} , Z_{pz} в формулах (9.7), (9.8), (9.9). Все необходимые пояснения и расчёты, а также полученные функциональные зависимости для P_z дать под соответствующим графиком.

6 Контрольные вопросы

- 6.1 Каков вид эмпирических формул для определения составляющих сил резания?
- 6.2 Какими приборами измеряются силы резания, типы этих приборов, их достоинства и недостатки?
- 6.3 На каком принципе работает рычажный токарный динамометр?
- 6.4 С какой целью графики зависимостей составляющих сил резания от глубины резания и подачи строят в логарифмической системе координат?
- 6.5 Как определяются константы в формулах зависимостей составляющих сил резания от глубины резания, подачи, скорости резания.
- 6.6 Почему зависимость составляющих сил резания от скорости резания носит сложный, немонотонный характер?

Лабораторная работа № 10 Оптимизация режимов резания

1 Цель и задачи

Цель: получение практических умений и навыков графической оптимизации режимов резания, практических расчётов по оптимизации режимов резания.

Задачи: уяснение критериев оптимальности и технических ограничений, используемых при оптимизации режимов токарной и фрезерной обработки.

2 Оптимизация режимов обработки резанием

2.1 Общие положения

Режимы резания, рассчитанные по традиционной методике, которая заключается в последовательном определении или назначении, согласно нормативам, глубины резания, подачи, скорости резания, силы резания и т.п., ориентированы на максимальное использование режущих свойств инструмента и не могут считаться оптимальными.

Решение же оптимизационной задачи при расчёте режимов резания требуют разработки соответствующей математической модели. Разработка математической модели включает в себя нахождение технических ограничений, которые в наибольшей степени влияют на описываемый процесс обработки и, соответственно, на т.н. оценочную функцию (выбранный критерий оптимальности). Оптимизация режимов резания на основе математической модели может быть осуществлена различными методами. Широкое применение получил метод линейного программирования. При этом методе технические ограничения и оценочная функция, представленные в модели в виде уравнений, приводятся к упрощённому, линейному виду путём логарифмирования. Решая совместно полученные уравнения на ЭВМ по специальным программам, рассчитывают оптимальные режимы резания. Эта же самая задача может быть решена и графическим путём.

В качестве оценочной функции (критерии оптимальности) как правило используют себестоимость

$$F = \frac{c}{n \cdot S},$$

где n – частота вращения шпинделя; S – подача, c – коэффициент, не зависящий от n и S .

Очевидно, что оптимальными следует считать такие режимы резания, когда достигается минимальная себестоимость обработки при заданном качестве получаемых поверхностей и точности размеров. Из уравнения видно, что себестоимость будет минимальной при максимальном значении $n \cdot S$. Поэтому в качестве оценочной функции может быть представлена в более удобном для расчётов виде:

$$f = nS = \max \quad (10.1)$$

Что касается технических ограничений, то их выбор зависит от вида обработки и определяется конкретными условиями технологического, конструкционного и организационного характера. Однако можно выделить ряд наиболее важных технических ограничений, которые составляют основу математических моделей процесса резания при точении, фрезеровании, сверлении и других методах обработки. Такими ограничениями являются: режущие возможности инструмента; мощность электродвигателя привода главного движения; заданная

производительность станка; наименьшая и наибольшая скорости резания и подачи, допускаемые кинематикой станка; прочность и жесткость режущего инструмента; точность обработки; шероховатость обработанной поверхности.

2.2 Технические ограничения

Рассмотрим особенности построения технических ограничений для наиболее распространенных методов обработки – продольного наружного точения и фрезерования торцовыми и цилиндрическими фрезами.

Ограничение 1. Режущие возможности инструмента.

Это ограничение устанавливает связь между скоростью резания, определяемой принятой стойкостью инструмента, его геометрией, глубиной резания, подачей и механическими свойствами обрабатываемого материала, с одной стороны, и скоростью резания, определяемой кинематикой станка, – с другой.

Скорость резания для различных видов обработки определяется по формуле:

$$v = C_v \cdot \frac{D^{q_v} \cdot K_v}{T^{m_v} \cdot t^{x_v} \cdot s_z^{y_v} \cdot B^{u_v} \cdot z^{p_v}}, \quad (10.2)$$

где C_v – постоянная скорости резания; D – диаметр заготовки (инструмента); K_v – коэффициент скорости резания; T – стойкость инструмента; t – глубина резания; s_z – подача на зуб; B – ширина резания; z – число режущих кромок; $q_v, m_v, x_v, y_v, u_v, p_v$ – эмпирические коэффициенты скорости резания.

В то же время скорость резания определяется кинематикой станка согласно зависимости:

$$v = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000}, \quad (10.3)$$

где n – частота вращения.

Приравняв правые части формул (10.2) и (10.3) и делая преобразования, получаем выражение первого технического ограничения в виде неравенства:

$$n \cdot s_z^{y_v} \leq 318,3 \cdot C_v \cdot \frac{D^{q_v-1} \cdot K_v}{T^{m_v} \cdot t^{x_v} \cdot B^{u_v} \cdot z^{p_v}}. \quad (10.4)$$

Выражение (10.4) описывает фрезерование. Это техническое ограничение достаточно просто приводится к виду, описывающему, например, продольное наружное точение. Для этого $q_v = 0, u_v = 0, p_v = 0$. Получается следующее неравенство:

$$n \cdot s_z^{y_v} \leq 318,3 \cdot C_v \cdot \frac{K_v}{T^{m_v} \cdot t^{x_v} \cdot D}. \quad (10.5)$$

Ограничение 2. Мощность электродвигателя привода главного движения станка.

Этим ограничением устанавливается взаимосвязь между эффективной мощностью, затрачиваемой на процесс резания, и мощностью электропривода

главного движения станка. Эффективная мощность, затрачиваемая на процесс резания при точении и фрезеровании, определяется по формуле:

$$N_e = \frac{P_z \cdot v}{1020 \cdot 60}, \quad (10.6)$$

где P_z – тангенциальная составляющая силы резания; v – скорость резания.

Учитывая необходимое условие протекания процесса резания, получаем следующее неравенство:

$$N_e \leq N_{np} \cdot \eta, \quad (10.7)$$

где N_{np} – мощность электродвигателя привода главного движения станка; η – КПД механизма главного движения.

Тангенциальная составляющая силы резания для точения определяется по формуле:

$$P_z = 10 \cdot C_p \cdot t^{x_p} \cdot s^{y_p} \cdot v^{n_p} \cdot K_p, \quad (10.8)$$

где C_p – постоянная силы резания; K_p – коэффициент, учитывающий фактические условия резания; t – глубина резания; s – подача; v – скорость резания; x_p, y_p, n_p – эмпирические коэффициенты формулы силы резания.

Для фрезерования имеем следующую формулу для P_z :

$$P_z = 10 \cdot C_p \cdot \frac{t^{x_p} \cdot s_z^{y_p} \cdot B^{u_p} \cdot z \cdot K_{mp}}{D^{q_p} \cdot n^{w_p}}, \quad (10.9)$$

где C_p – постоянная силы резания; D – диаметр фрезы; K_{mp} – коэффициент, учитывающий влияние физико-химических свойств обрабатываемого материала на силу резания; t – глубина резания; s_z – подача на зуб; B – ширина резания; z – число зубьев фрезы; n – частота вращения фрезы, мин⁻¹; q_p, x_p, y_p, u_p, w_p – эмпирические коэффициенты формулы силы резания

Приравнявая правые части выражений (10.6), (10.7) и подставляя выражения (10.3), (10.8), получаем второе техническое ограничение в виде неравенства:

для точения:

$$n^{n_p+1} \cdot s^{y_p} \leq \frac{10^{3 \cdot n_p+3} \cdot 6120 \cdot N_{np} \cdot \eta}{C_p \cdot \pi^{n_p+1} \cdot t^{x_p} \cdot D^{n_p+1} \cdot K_p}; \quad (10.10)$$

для фрезерования:

$$n^{1-w_p} \cdot s_z^{y_p} \leq \frac{1948056,5 \cdot N_{np} \cdot \eta}{\pi \cdot C_p \cdot t^{x_p} \cdot B^{u_p} \cdot D^{1-q_p} \cdot z \cdot K_{mp}}. \quad (10.11)$$

Ограничение 3 и 4. Наименьшая и наибольшая допустимые скорости резания.

Эти ограничения устанавливают взаимосвязь расчетной скорости резания с кинематикой станка по минимуму и максимуму. Они записываются в следующем виде

$$n \geq n_{cm.min}, \quad (10.12)$$

$$n \leq n_{cm.max}. \quad (10.13)$$

Ограничение 5 и 6. Наименьшая и наибольшая допустимые подачи.

Эти ограничения аналогично двум предыдущим устанавливают взаимосвязь расчетных величин подачи с подачами, допустимыми кинематикой станка по минимуму

$$S \geq S_{cm.min}, \quad (10.14)$$

и максимуму

$$S \leq S_{cm.max}. \quad (10.15)$$

Ограничение 7. Прочность режущего инструмента.

Это ограничение устанавливает взаимосвязь между расчетной скоростью резания и подачей с одной стороны, и напряжениями изгиба в державке инструмента – с другой. В основу построения этого ограничения закладывают условие нагружения режущего инструмента, например, резца, как консольной балки, с приложением на ее конце усилия, равного окружной составляющей силы резания P_z (рисунок 10.1) или составляющей силы резания перпендикулярной направлению подачи фрезы P_v (рисунок 10.2).

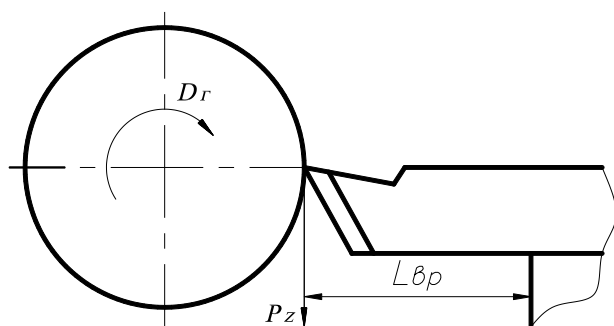


Рисунок 10.1

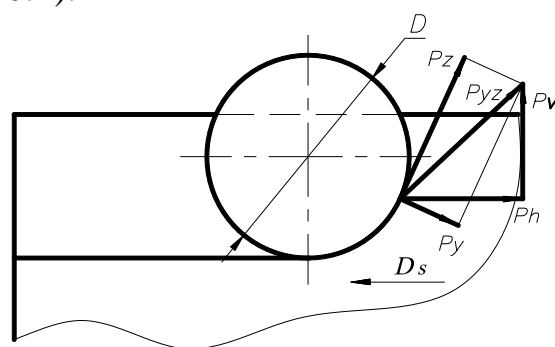


Рисунок 10.2

В этом случае предел прочности материала державки при изгибе будет определяться зависимостью:

$$\sigma_u \geq \frac{M_{изг.} \cdot k_{з.п.}}{W}, \quad (10.16)$$

где $M_{изг.}$ – изгибающий момент в месте закрепления инструмента, Н·мм;
 W – момент сопротивления сечения крепежного элемента инструмента, мм³;
 $k_{з.п.}$ – коэффициент запаса прочности.

Изгибающий момент в месте закрепления резца

$$M_{изг.} = P_z \cdot l_{в.п.}, \quad (10.17)$$

фрезы

$$M_{изг.} = P_V \cdot l_{в.ф.}, \quad (10.18)$$

где $l_{в.р.}$ – вылет резца, мм; $l_{в.ф.}$ – вылет фрезы, мм.

Момент сопротивления сечения державки резца при точении (для прямоугольного сечения)

$$W = \frac{B_{\delta} \cdot H_{\delta}^2}{6}, \quad (10.19)$$

где B_{δ} – ширина державки, мм; H_{δ} – высота державки, мм.

Момент сопротивления сечения крепежного элемента концевой фрезы при фрезеровании (для круглого сечения)

$$W = \frac{\pi \cdot d^3}{32}, \quad (10.20)$$

где d – диаметр сечения крепежного элемента концевой фрезы, мм.

Для получения выражения ограничения 7 для точения подставляем выражения (10.3), (10.8), (10.17), (10.19) в выражение (10.16). Преобразовывая неравенство, получаем

$$n^{n_p} \cdot s^{y_p} \leq \frac{1000^{n_p} \cdot B_{\delta} \cdot H_{\delta}^2 \cdot \sigma_u}{60 \cdot C_p \cdot \pi^{n_p} \cdot t^{x_p} \cdot D^{n_p} \cdot K_p \cdot l_{в.р.} \cdot k_{з.н.}}; \quad (10.21)$$

аналогично для фрезерования:

$$n^{-w_p} \cdot s_z^{y_p} \leq \frac{\pi \cdot D^{q_p} \cdot d^3 \cdot \sigma_u}{320 \cdot 0,7 \cdot C_p \cdot t^{x_p} \cdot B^{u_p} \cdot z \cdot K_{mp} \cdot k_{з.н.} \cdot l_{в.ф.}}. \quad (10.22)$$

Ограничение 8. Требуемая шероховатость поверхности.

Это ограничение устанавливает взаимосвязь расчетной скорости резания и подачи с допустимыми по обеспечению требуемой высоты или формы шероховатости согласно ГОСТ 2789-73. Известно, что выбор скорости резания и особенно подачи при полустойковой и чистовой обработках очень часто определяется требуемой шероховатостью поверхности.

В основу этого ограничения могут быть положены многочисленные экспериментальные зависимости для различных характеристик шероховатости поверхности R (R_a , R_z , R_{max} , шага микронеровностей S_m , величины опорной поверхности t_p).

Для точения имеем:

$$R_a = k_0 \cdot \frac{s^{k_1} \cdot (90^\circ + \gamma)^{k_4}}{\rho^{k_2} \cdot v^{k_3}}, \quad (10.23)$$

где s – подача инструмента, мм/об.; γ – передний угол, град.; ρ – радиус при вершине резца, мм; v – скорость резания, м/мин; k_0, k_1, k_2, k_3, k_4 – эмпирические коэффициенты.

Для фрезерования имеем:

$$R_a = k_0 \cdot \frac{s_z^{k_1} \cdot t^{k_5}}{\rho^{k_2} \cdot v^{k_3} \cdot \gamma^{k_4}}, \quad (10.24)$$

где s_z – подача на зуб, мм/зуб; γ – передний угол, град.; ρ – радиус при вершине зуба, мм; v – скорость резания, м/мин; t – глубина резания, мм; $k_0, k_1, k_2, k_3, k_4, k_5$ – эмпирические коэффициенты.

Подставляем выражение (10.3) в (10.23) и (10.24), преобразовываем и записываем получившиеся неравенства.

Для точения

$$s^{k_1} \cdot n^{-k_3} \leq \frac{R_a \cdot \rho^{k_2} \cdot D^{k_3} \cdot \pi^{k_3}}{k_0 \cdot (90^\circ + \gamma)^{k_4} \cdot 1000^{k_3}}, \quad (10.25)$$

Для фрезерования

$$s^{k_1} \cdot n^{-k_3} \leq \frac{R_a \cdot \rho^{k_2} \cdot \gamma^{k_4} \cdot D^{k_3} \cdot \pi^{k_3}}{k_0 \cdot t^{k_5} \cdot 1000^{k_3}}, \quad (10.26)$$

2.3 Приведение технических ограничений к линейному виду

Для выбора оптимальных режимов резания с использованием методов линейного программирования все технические ограничения и оценочная функция приводятся к линейному виду логарифмированием. Для того, чтобы избежать получение отрицательных значений логарифмов в формулах, в которые были преобразованы в конечном счёте технические ограничения (например, (10.5), (10.10), (10.12) и др.), подачу S умножают на 100. Тогда, логарифмируя технические ограничения, то есть формулы (10.5), (10.10), (10.12), (10.13), (10.14), (10.15), (10.16), (10.21), (10.25) и оценочную функцию (1), имеем при точении следующую систему уравнений:

$$\ln n + y_v \cdot \ln(100 \cdot S) \leq \ln \left(318,3 \cdot C_v \cdot \frac{K_v}{T^{m_v} \cdot t^{x_v} \cdot D} \right); \quad (10.27)$$

$$(n_p + 1) \cdot \ln n + y_p \cdot \ln(100 \cdot S) \leq \ln \left(\frac{10^{3 \cdot n_p + 3} \cdot 6120 \cdot N_{np} \cdot \eta}{C_p \cdot \pi^{n_p + 1} \cdot t^{x_p} \cdot D^{n_p + 1} \cdot K_p} \right); \quad (10.28)$$

$$\ln n \geq \ln n_{cm.min}; \quad (10.29)$$

$$\ln n \leq \ln n_{cm.max}; \quad (10.30)$$

$$\ln(100 \cdot S) \geq \ln(100 \cdot S_{cm.min}); \quad (10.31)$$

$$\ln(100 \cdot S) \leq \ln(100 \cdot S_{cm.max}); \quad (10.32)$$

$$n_p \cdot \ln n + y_p \cdot \ln(100 \cdot S) \leq \ln \left(\frac{1000^{n_p} \cdot B_\delta \cdot H_\delta^2 \cdot \sigma_u}{60 \cdot C_p \cdot \pi^{n_p} \cdot t^{x_p} \cdot D^{n_p} \cdot K_p \cdot l_{e.p.} \cdot k_{3.n.}} \right); \quad (10.33)$$

$$k_1 \cdot \ln s - k_3 \cdot \ln n \leq \ln \left(\frac{R_a \cdot \rho^{k_2} \cdot D^{k_3} \cdot \pi^{k_3}}{k_0 \cdot (90^\circ + \gamma)^{k_4} \cdot 1000^{k_3}} \right). \quad (10.34)$$

$$f = \ln n + \ln(100 \cdot S) = \max \quad (10.35)$$

Выражения для фрезерования (10.4), (10.11), (10.22), (10.26) после логарифмирования будут иметь вид

$$\ln n + y_v \cdot \ln(100 \cdot S_z) \leq \ln \left(318,3 \cdot C_v \cdot \frac{D^{q_v-1} \cdot K_v}{T^{m_v} \cdot t^{x_v} \cdot B^{u_v} \cdot z^{p_v}} \right); \quad (10.36)$$

$$(1 - w_p) \cdot \ln n + y_p \cdot \ln(100 \cdot S_z) \leq \ln \left(\frac{1948056,5 \cdot N_{np} \cdot \eta}{\pi \cdot C_p \cdot t^{x_p} \cdot B^{u_p} \cdot D^{1-q_p} \cdot z \cdot K_{mp}} \right); \quad (10.37)$$

$$-w_p \cdot \ln n + y_p \cdot \ln(100 \cdot S_z) \leq \ln \left(\frac{\pi \cdot D^{q_p} \cdot d^3 \cdot \sigma_u}{320 \cdot 0,7 \cdot C_p \cdot t^{x_p} \cdot B^{u_p} \cdot z \cdot K_{mp} \cdot k_{3,n} \cdot l_{с.ф.}} \right); \quad (10.38)$$

$$k_1 \cdot \ln s - k_3 \cdot \ln n \leq \ln \left(\frac{R_a \cdot \rho^{k_2} \cdot \gamma^{k_4} \cdot D^{k_3} \cdot \pi^{k_3}}{k_0 \cdot t^{k_5} \cdot 1000^{k_3}} \right). \quad (10.39)$$

Кроме вышеуказанных формул (10.35), (10.37), (10.38), (10.39) в систему уравнений для фрезерования входят ещё выражения (10.29), (10.30), (10.31), (10.32), которые одинаковы и для фрезерной, и для токарной обработки; а также выражение (10.35).

Введём обозначения:

$$\ln n = x_1 \quad (10.40)$$

$$\ln(100 \cdot S) = x_2 \quad (10.41)$$

Правую часть полученных логарифмированием неравенств обозначим как b_i , где i – номер ограничения. Тогда получим математическую модель оптимального режима резания при точении в виде системы линейных уравнений:

$$x_1 + y_v \cdot x_2 \leq b_1; \quad (10.42)$$

$$(n_p + 1) \cdot x_1 + y_p \cdot x_2 \leq b_2; \quad (10.43)$$

$$x_1 \geq b_3; \quad (10.44)$$

$$x_1 \leq b_4; \quad (10.45)$$

$$x_2 \geq b_5; \quad (10.46)$$

$$x_2 \leq b_6; \quad (10.47)$$

$$n_p \cdot x_1 + y_p \cdot x_2 \leq b_7; \quad (10.48)$$

$$k_1 \cdot x_2 - k_3 \cdot x_1 \leq b_8. \quad (10.49)$$

$$f = x_1 + x_2 = \max \quad (10.50)$$

При фрезеровании система уравнений, помимо выражений (10.44), (10.45), (10.46), (10.47), (10.50), войдут также следующие выражения:

$$x_1 + y_v \cdot x_2 \leq b_1; \quad (10.51)$$

$$(1 - w_p) \cdot x_1 + y_p \cdot x_2 \leq b_2; \quad (10.52)$$

$$-w_p \cdot x_1 + y_p \cdot x_2 \leq b_7; \quad (10.53)$$

$$k_1 \cdot x_2 - k_3 \cdot x_1 \leq b_8. \quad (10.54)$$

Задача определения оптимального режима резания сводится к отысканию средних неотрицательных значений x_1 и x_2 таких значений x_{1onm} и x_{2onm} , при которых линейная функция принимает максимальное значение ($f_{0 \max}$).

Математическая модель процесса резания может быть изображена в графическом виде. В этом случае каждое техническое ограничение представляется граничной прямой, которая определяет полуплоскость, где возможно существование решений системы неравенств. Граничные прямые, пересекаясь, образуют многоугольник решений, внутри которого любая точка удовлетворяет всем без исключения неравенствам. Поэтому этот многоугольник принято называть многоугольником решений.

Теория линейного программирования показывает, что экстремальное значение оценочной функции (при выпуклом многоугольнике решений) обеспечивается для x_1 и x_2 , находящихся в точке, лежащей на одной из граничных прямых или в точке их пересечения. Поэтому задача отыскания оптимальных значений x_{1onm} и x_{2onm} сводится к последовательному вычислению координат всех возможных точек пересечения граничных прямых и затем определению для них наибольшей суммы $f_0 = (x_1 + x_2)_{\max}$.

После определения координат x_{1onm} и x_{2onm} вычисляют оптимальные значения элементов режима резания по формулам

$$n_{onm} = e^{x_{1opt}}; \quad (10.55)$$

$$s_{onm} = 0,01 \cdot e^{x_{2opt}}. \quad (10.56)$$

Для определения оптимального решения задачи, заданной системой линейных уравнений и неравенств, обычно используется метод полного перебора точек, образующих выпуклый многоугольник возможных решений. Определяются попарно точки пересечения прямых и подставляются координаты этих точек в неравенства системы. Точка, координаты которой удовлетворяют всем без исключения прямым (проверка на совместимость системы уравнений), и, одновременно, сумма координат которой $x_1 + x_2$ является наибольшей, и будет точкой оптимума.

2.4 Пример решения задачи оптимизации режимов резания

Построить математическую модель процесса резания и определить оптимальные режимы резания для максимальной производительности при точении поверхности заготовки типа вал $D=80$ мм, материал – сталь 20, требуемая шероховатость $R_a = 1,6$ мкм, глубина резания $t = 0,5$ мм.

Решение. Учитывая размеры заготовки, для обработки выбирают токарно-винторезный станок 1К62. Точение производят проходным упорным резцом с режущей пластиной Т15К6 с охлаждением. Размеры державки резца принимаются $B = 16$ мм, $H = 25$ мм, вылет резца $l_{e.p.} = 70$ мм. Период стойкости инструмента примем $T = 60$ мин.

Ограничение 1. Режущие возможности инструмента.

Находим значения коэффициентов, входящих в неравенство (10.5), согласно [7]:

$$C_v = 350; K_v = 1; m_v = 0,2; x_v = 0,15; y_v = 0,35.$$

Тогда:

$$n \cdot s^{0,35} \leq 318,3 \cdot 350 \cdot \frac{1}{60^{0,2} \cdot 0,5^{0,15} \cdot 80};$$
$$n \cdot s^{0,35} \leq 681,3. \quad (10.57)$$

Приведем неравенство (10.57) к линейному виду логарифмированием и после обозначения (см. п. 2.3) получим:

$$x_1 + 0,35 \cdot x_2 \leq 8,14. \quad (10.58)$$

Ограничение 2. Мощность электродвигателя привода главного движения станка.

Согласно паспортным данным станка 1К62 и справочным данным [7], находим значения коэффициентов, входящих в неравенство (10.10):

$$N_{np} = 10 \text{ кВт}; \eta = 0,8; C_p = 300; K_p = 1; x_p = 1; y_p = 0,75; n_p = -0,15.$$

Тогда

$$n^{-0,15+1} \cdot s^{0,75} \leq \frac{10^{3 \cdot (-0,15)+3} \cdot 6120 \cdot 10 \cdot 0,8}{300 \cdot 3,14^{-0,15+1} \cdot 0,5^1 \cdot 80^{-0,15+1} \cdot 1};$$
$$n^{0,85} \cdot s^{0,75} \leq 1056,2. \quad (10.59)$$

Приведем неравенство (10.59) к линейному виду логарифмированием и после обозначения получим

$$0,85 \cdot x_1 + 0,75 \cdot x_2 \leq 10,41. \quad (10.60)$$

Ограничение 3 и 4. Наименьшая и наибольшая допустимые скорости резания.

Согласно паспортным данным станка 1К62:

$$n_{ст.мин} = 12,5 \text{ мин}^{-1}; n_{ст.макс} = 2000 \text{ мин}^{-1}.$$

Тогда:

$$n \geq 12,5; \quad (10.61)$$

$$n \leq 2000. \quad (10.62)$$

Приведем неравенства (10.61) и (10.62) к линейному виду логарифмированием

$$x_1 \geq 2,53; \quad (10.63)$$

$$x_1 \leq 7,6. \quad (10.64)$$

Ограничение 5 и 6. Наименьшая и наибольшая допустимые подачи.

Согласно паспортным данным станка 1К62:

$$s_{cm.min} = 0,07 \text{ мм/об}; s_{cm.max} = 4,16 \text{ мм/об}.$$

Тогда:

$$s \geq 0,07; \quad (10.65)$$

$$s \leq 4,16. \quad (10.66)$$

Приведем неравенства (10.65) и (10.66) к линейному виду логарифмированием и после обозначения (см. приведение технических ограничений к линейному виду) получим

$$x_2 \geq 1,95; \quad (10.67)$$

$$x_2 \leq 6,03. \quad (10.68)$$

Ограничение 7. Прочность режущего инструмента.

Согласно зависимости (10.22) находим значения коэффициентов, входящих в неравенство:

$$k_{з.н.} = 1,5; \sigma = 600 \text{ МПа}; C_p = 300; K_p = 1; x_p = 1; y_p = 0,75; n_p = -0,15.$$

Тогда:

$$n^{-0,15} \cdot s^{0,75} \leq \frac{1000^{-0,15} \cdot 16 \cdot 25^2 \cdot 600}{60 \cdot 300 \cdot 3,14^{-0,15} \cdot 0,5^1 \cdot 80^{-0,15} \cdot 1 \cdot 70 \cdot 1,5};$$

$$n^{-0,15} \cdot s^{0,75} \leq 5,16. \quad (10.69)$$

Приведем неравенство (10.69) к линейному виду логарифмированием

$$-0,15 \cdot x_1 + 0,75 \cdot x_2 \leq 5,09. \quad (10.70)$$

Ограничение 8. Требуемая шероховатость поверхности.

Согласно зависимости (10.25) находим значения коэффициентов, входящих в неравенство:

$$\gamma = -20 \text{ град.}; \rho = 1 \text{ мм}; k_0 = 0,16; k_1 = 0,59; k_2 = 0,29; k_3 = 0,19; k_4 = 0,66.$$

Тогда:

$$s^{0,59} \cdot n^{-0,19} \leq \frac{1,6 \cdot 1^{0,29} \cdot 80^{0,19} \cdot 3,14^{0,19}}{0,16 \cdot (90 - 20)^{0,66} \cdot 1000^{0,19}};$$

$$s^{0,59} \cdot n^{-0,19} \leq 0,47. \quad (10.71)$$

Приведем неравенство (10.69) к линейному виду

$$0,59 \cdot x_2 - 0,19 \cdot x_1 \leq 1,95. \quad (10.72)$$

Графический метод

Строим в системе координат (x_1, x_2) граничные прямые, описываемые неравенствами (10.58), (10.60), (10.63), (10.64), (10.67), (10.68), (10.70), (10.72) (рисунок 10.3).

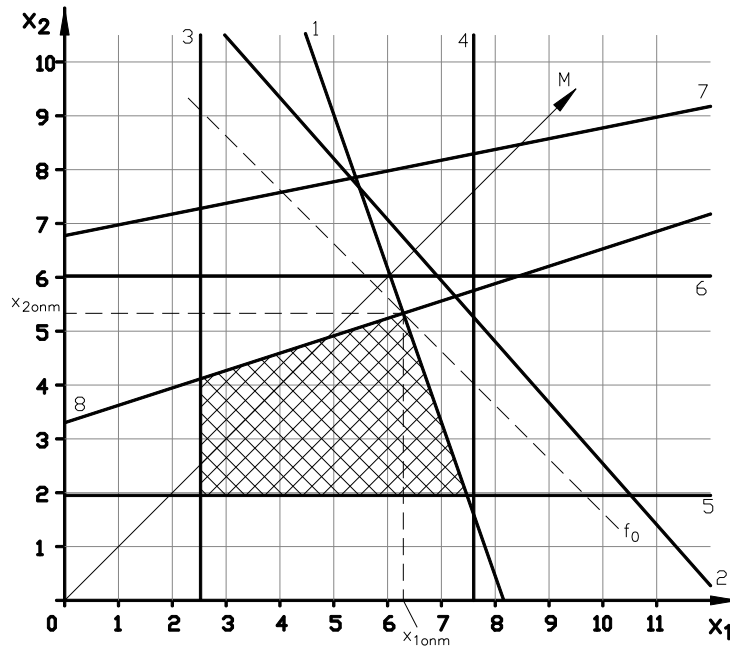


Рисунок 10.3. Графическое построение математической модели определения оптимальных режимов резания:

1 – ограничение 1; 2 – ограничение 2; 3 – ограничение 3; 4 – ограничение 4; 5 – ограничение 5; 6 – ограничение 6; 7 – ограничение 7; 8 – ограничение 8

В этом случае каждое техническое ограничение представляется граничной прямой, которая определяет полуплоскость, где возможно существование решений системы неравенств (10.58), (10.60), (10.63), (10.64), (10.67), (10.68), (10.70), (10.72). Граничные прямые, пересекаясь, образуют многоугольник решений (заштрихованная область на рисунке 10.3), внутри которого любая точка удовлетворяет всем без исключения неравенствам. Для определения оптимальных значений $x_{1\text{опт}}$ и $x_{2\text{опт}}$ под углом 45° к осям x_1 и x_2 строится вектор максимизации M для оценочной функции $f_0 = (x_1 + x_2)$, которая изображается прямой (штриховая линия), перпендикулярной этому вектору. Будем перемещать прямую f от начала координат параллельно самой себе. В процессе этого перемещения прямая f , пройдя многоугольник решений, коснется его крайней, наиболее удаленной от начала координат, точки. Координаты этой точки и являются оптимальным решением всей системы $x_{1\text{опт}}$ и $x_{2\text{опт}}$. Они определяются графически (рисунок 10.3) с учетом принятого масштаба $x_{1\text{опт}} = 6,28$ и $x_{2\text{опт}} = 5,33$.

2.5 Решение с помощью ЭВМ

В этом способе поиск решения осуществляется методом перебора решений с помощью ЭВМ. Далее приведен текст программы – решения, реализованной на языке программирования BASIC.

' ограничения 1 – 8, правые части формул (10.4), (10.9), (10.11), (10.12), (10.13), (10.14), (10.20), (10.24)

$$a1 = 318.3 * 350 * 1 / (60 ^ .2 * .5 ^ .15 * 80)$$

$$a2 = 6120 * 10 ^ (3 * (-.15) + 3) * 10 * .8 / (300 * 3.14 ^ (-.15 + 1) * .5 ^ 1 * 80 ^ (-.15 + 1) * 1)$$

$$a3 = 12.5$$

$$a4 = 2000$$

$$a5 = .07$$

$$a6 = 4.16$$

$$a7 = 1000 ^ (-.15) * 16 * 25 ^ 2 * 600 / (60 * 300 * 3.14 ^ (-.15) * .5 ^ 1 * 80 ^ (-.15) * 1 * 70 * 1.5)$$

$$a8 = 1.6 * 1 ^ .29 * 80 ^ .19 * 3.14 ^ .19 / (.16 * (90 - 20) ^ .66 * 1000 ^ .19)$$

' компенсируем подстановку $x2 = \text{Ln}(100s)$

$$a1 = a1 * 100 ^ .35$$

$$a2 = a2 * 100 ^ .75$$

$$a5 = a5 * 100$$

$$a6 = a6 * 100$$

$$a7 = a7 * 100 ^ .75$$

$$a8 = a8 * 100 ^ .59$$

' логарифмирование правых частей формул ограничений

$$b1 = \text{LOG}(a1)$$

$$b2 = \text{LOG}(a2)$$

$$b3 = \text{LOG}(a3)$$

$$b4 = \text{LOG}(a4)$$

$$b5 = \text{LOG}(a5)$$

$$b6 = \text{LOG}(a6)$$

$$b7 = \text{LOG}(a7)$$

$$b8 = \text{LOG}(a8)$$

$$\text{maxsum} = 0$$

FOR $x2 = b6$ TO $b5$ STEP $-.01$

' перебор значений $x1$ от 3 до 4 ограничения

FOR $x1 = b4$ TO $b3$ STEP $-.01$

' перебор значений $x2$ от 5 до 6 ограничения

IF $(x1 + .35 * x2) \leq b1$ THEN

' 1 ограничение

IF $((-.15 + 1) * x1 + .75 * x2) \leq b2$ THEN

' 2 ограничение

IF $(-.15 * x1 + .75 * x2) \leq b7$ THEN

' 7 ограничение

```

      IF (.59 * x2 - .19 * x1) <= b8 THEN
' 8 ограничение
      IF (x1 + x2) > maxsum THEN
' целевая функция f=x1+x2>max
      maxsum = x1 + x2 ' проверка результата на оптимальность
      xopt1 = x1 ' запоминание оптимального x1
      xopt2 = x2 ' запоминание оптимального x2
      END IF
    END IF
  END IF
END IF
NEXT x1
NEXT x2
n = EXP(xopt1) ' вычисление оптимального n
s = EXP(xopt2) / 100
' вычисление оптимального s
' вывод результатов расчета на экран
PRINT "Оптимальные значения: n= "; n; " об/мин; ", " s= "; s; " мм/об"

```

Результат расчета по программе на ЭВМ

$$n_{opt} = 650 \text{ мин}^{-1}; \quad (10.73)$$

$$s_{opt} = 0,3 \text{ мм / об.} \quad (10.74)$$

Принимаем ближайшие значения, которые обеспечиваются станком:
 $n_{opt}=630 \text{ мин}^{-1}$, $s_{opt}=0,27 \text{ мм/об.}$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аршинов, В. А. Резание металлов и режущий инструмент / В. А. Аршинов, Г. А. Алексеев. – 3-е изд., переработ. и доп. – Москва: Машиностроение, 1976. – 440 с.
2. Бобров, В. Ф. Основы теории резания металлов / В. Ф. Бобров. – Москва: Машиностроение, 1975.
3. Грановский, Г. И. Резание металлов / Г. И. Грановский, В. Г. Грановский. – Москва: Высшая школа, 1985.
4. Металлорежущие инструменты: учебник для вузов / Под ред. Г. Н. Сахарова, О. Б. Арбузова, Ю. Л. Борового [и др.]. – Москва: Машиностроение, 1982. – 328 с.
5. Нефёдов, Н. А. Сборник задач по резанию металлов и режущему инструменту / Н. А. Нефёдов, К. А. Осинцов. – 4-е изд., переработ. и доп. – Москва: Машиностроение, 1984. – 400 с.
6. Справочник инструментальщика / Под общей ред. И. А. Ординарцева. – Ленинград: Машиностроение, Ленингр. Отделение, 1987. – 846 с.
7. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. / Под ред. А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. – 4-е изд., переработ. и доп. – Москва: Машиностроение, 1985. – Т. 1. – 656 с., Т. 2. – 496 с.
8. Ящерицын, П. И. Теория резания. Физические и тепловые процессы в технологических системах: учебник для вузов / П. И. Ящерицын, М. Л. Ерёмченко, Е. Э. Фельдштейн. – Минск: Высшая школа, 1990. – 512 с.

Локальный электронный методический материал

Сергей Борисович Перетятко
Борис Петрович Борисов

ПРОЦЕССЫ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ И ИНСТРУМЕНТ

Редактор С. Кондрашова
Корректор Т. Звада

Уч.-изд. л. 11,0. Печ. л. 8,6.

Издательство федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Калининградский государственный технический университет»
236022, Калининград, Советский проспект, 1