

Т. И. КОЖЕНКОВА,
Е. Э. ФЕЛЬДШТЕЙН

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО РЕЗАНИЮ МЕТАЛЛОВ

Допущено Министерством высшего и среднего специального образования БССР в качестве учебного пособия для студентов по специальности 0501 «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты»

МИНСК
«ВЫШЭЙШАЯ ШКОЛА»
1985

ББК 34.63

К 58

УДК 621.9(075.8)

Рецензенты: кафедра «Инструментальное производство» Пензенского политехнического института; В. Г. Солоненко, канд. техн. наук, доцент кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» Краснодарского политехнического института.

- Коженкова Т. И., Фельдштейн Е. Э.**
К 58 Лабораторные работы по резанию металлов: [Учеб. пособие по спец. 0501 «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты»].— Мн.: Выш. шк., 1985.— 176 с., ил.
35 к.

Описываются методика проведения лабораторных работ и используемое оборудование. Рассматриваются геометрические параметры режущих инструментов; физические процессы в зоне резания; оптимизация процесса резания путем анализа износа инструмента и др. Излагаются современные методы математической обработки результатов экспериментов.

К 2704040000—019
М 304(05)—85 46—85

ББК 34.63

© Издательство
«Вышэйшая школа», 1985.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Современный уровень развития производства требует от будущего специалиста — инженера-механика — умения разрабатывать технологические процессы обработки деталей различного функционального назначения, выбирать оптимальные условия их проведения, проектировать технологическое оборудование, оснастку и режущий инструмент. Необходимые знания для этого формируются в процессе изучения таких предметов, как «Проектирование металлорежущего инструмента», «Металлорежущие станки и промышленные роботы», «Технология машиностроения» и др. Качественное изучение указанных курсов невозможно без понимания физических процессов, происходящих в зоне резания при обработке детали. Сведения о них излагаются в курсе «Теория резания», который служит основой для последующего изучения специальных дисциплин. Введенные с 1983 г. учебные планы предполагают уменьшение в 1,5 раза лекционного курса с одновременным увеличением объема лабораторных работ. В связи с этим в книге приводятся краткие теоретические сведения, необходимые для выполнения каждой работы.

В первой группе лабораторных работ даны сведения о типовых режущих инструментах (резцах, сверлах, фрезах), методах и устройствах для измерения их геометрических и конструктивных параметров. Во второй группе рассматриваются основные вопросы, связанные с исследованием физических процессов в зоне резания (деформация срезаемого слоя, силы резания, температура в зоне резания), в третьей — вопросы, определяющие оптимальные условия процесса резания (анализ характера износа резца, определение величины оптимального износа и стойкости, особенностей обрабатываемости стали). В завершающей части пособия излагаются современные методы обработки результатов эксперимента, используе-

мые в резании металлов, в том числе метод полного факторного планирования эксперимента. Теоретические сведения сопровождаются рассмотрением конкретных числовых примеров.

Используемая в книге терминология учитывает требования ГОСТ 25721—83 и ГОСТ 25762—83.

В каждой лабораторной работе указана цель ее проведения; даны вопросы для самоконтроля, краткие теоретические сведения, перечислено необходимое оборудование, инструменты и приспособления; изложены последовательность и методика выполнения работы, требования к оформлению отчета; приведена типовая форма протокола.

Авторы выражают признательность рецензентам В. Г. Солоненко, доценту кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» Краснодарского политехнического института и коллективу кафедры «Инструментальное производство» Пензенского политехнического института за предложения и замечания, позволившие улучшить содержание и методическую направленность книги.

Авторы

ГЕОМЕТРИЯ РАБОЧЕЙ ЧАСТИ РЕЗЦОВ

Цель работы. Закрепление сведений об основных поверхностях и геометрических параметрах резцов различных типов; ознакомление с методами измерения геометрических параметров резцов и приборами, применяемыми для этой цели; приобретение навыков эскизирования резцов.

Вопросы для самоконтроля. 1. Типы резцов. 2. Части и элементы резца. 3. Разделение резцов по направлению подачи, по форме и расположению рабочей части относительно стержня. 4. Какие поверхности различают на заготовке при снятии с нее стружки? 5. Дать определение элементов режима резания. 6. Дать определение элементов срезаемого слоя. 7. Какие координатные плоскости устанавливаются для определения углов резца? Дать определение этих плоскостей. 8. В каких плоскостях измеряются углы резца? Дать определение этих плоскостей. 9. Дать определение углов резца: α , β , γ , δ , ϕ , ϵ , ϕ_1 , λ . Какие соотношения между углами α , β и γ ; ϕ , ϕ_1 и ϵ ? 10. Как влияет на величину углов резца его положение относительно оси вращения обрабатываемой детали? 11. Каково влияние подачи и диаметра заготовки на величину углов резца в процессе резания?

Краткие теоретические сведения

Основные типы резцов. Применяемые в машиностроении резцы можно классифицировать по следующим признакам:

по виду станков (рис. 1.1): токарные, строгальные, долбежные, автоматнo-револьверные, расточные для горизонтально-расточных станков, специальные;

по виду обработки (рис. 1.2): проходные, подрезные,

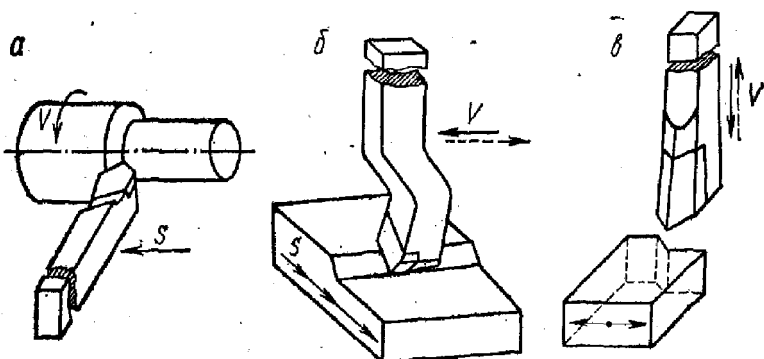


Рис. 1.1. Классификация резцов по виду станков:
а — токарные; б — строгальные; в — долбежные

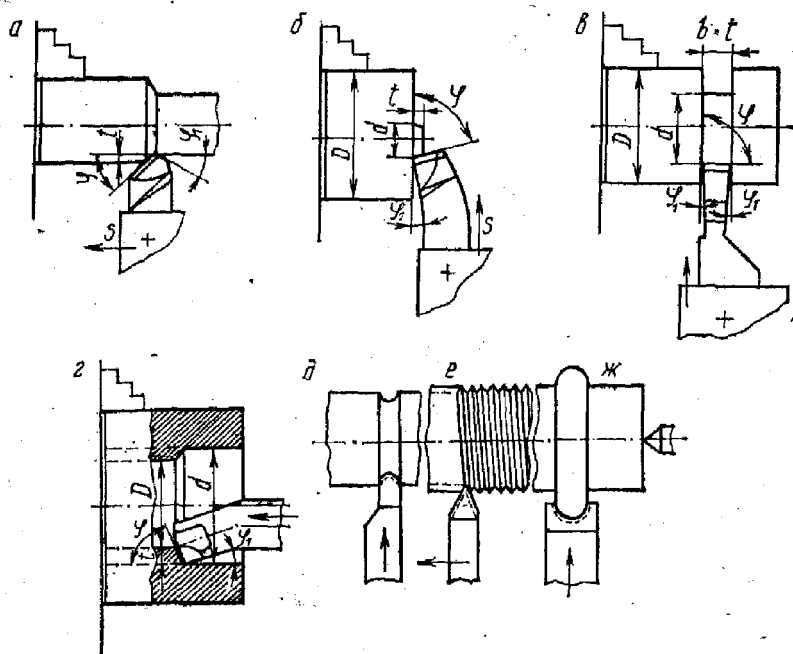


Рис. 1.2. Классификация резцов по виду обработки:
а — проходной; б — подрезной; в — отрезной, прорезной; г — расточной; д — галтельный; е — резьбовой; ж — фасонный

отрезные, прорезные, расточные, галтельные, резьбовые, фасонные;

по характеру обработки: обдирочные (черновые), чистовые, для тонкого точения;

по сечению крепежной части: прямоугольные, квадратные, круглые;

по конструкции рабочей части: прямые, отогнутые, изогнутые, с оттянутой головкой (рис. 1.3);

по направлению подачи: правые и левые (рис. 1.4);

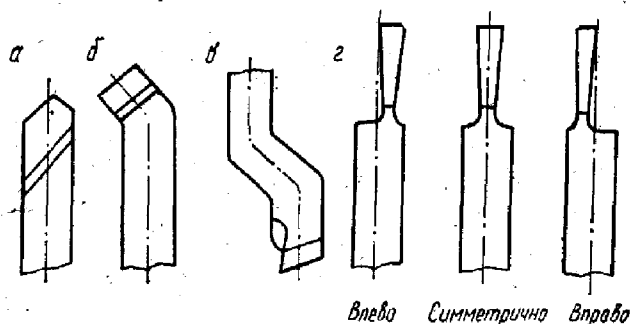


Рис. 1.3. Классификация резцов по конструкции рабочей части:
а — прямые; б — отогнутые; в — изогнутые; г — с оттянутой головкой

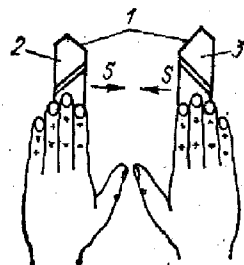


Рис. 1.4. Определение резцов по направлению подачи:

1 — главные режущие кромки; 2 — левый резец;
3 — правый резец

по способу изготовления: с рабочей частью, выполненной как одно целое с крепежной; с рабочей частью, приваренной встык; с наплавленной, напайной, клееной пластинкой; с механическим креплением пластинок или вставок;

по роду инструментального материала: из сверхтвердых материалов, с пластинками из твердого сплава, минералокерамическими пластинками, из быстрорежущей, легированной, углеродистой стали.

Элементы режима резания и срезаемого слоя. При обработке резанием заготовка и инструмент совершают определенные движения. Они разделяются на основные (для процесса резания) и вспомогательные (для подготовки к процессу резания и завершения операции).

Основные движения: главное движение и движение подачи.

При обработке на токарных станках главное движение — вращение заготовки, движение подачи — поступательное движение резца. Главное движение позволяет осуществлять процесс резания (превращать срезаемый слой в стружку); движение подачи дает возможность вести обработку по всей обрабатываемой поверхности.

На обрабатываемой заготовке при снятии стружки различают следующие поверхности: обрабатываемую, которая частично или полностью удаляется при обработке; обработанную, образованную на заготовке в результате обработки; поверхность резания, образуемую режущей кромкой в результирующем движении резания. Поверхность резания является переходной между обрабатываемой и обработанной поверхностями.

Скорость главного движения (скорость резания) v — скорость рассматриваемой точки режущей кромки или заготовки в процессе главного движения.

При точении, когда заготовка вращается с частотой вращения n (об/мин), скорость резания (м/мин) в разных точках режущей кромки будет разная. В расчетах принимается максимальное ее значение

$$v = \pi D n / 1000,$$

где D — наибольший диаметр поверхности резания, мм.

При продольном точении скорость резания постоянна, а при подрезке торца или отрезании при постоянном числе оборотов — переменная, наибольшее ее значение — у периферии.

Подача S — величина перемещения режущей кромки относительно обработанной поверхности в единицу времени в направлении движения подачи. Различают подачу за один оборот заготовки S_o (мм/об) и минутную $S_m = S_o n$ (мм/мин). При токарной обработке подача может быть поперечная и продольная.

Глубина резания t — величина срезаемого слоя за один проход, измеренная в направлении, перпендикулярном к обработанной поверхности. Глубина резания всегда перпендикулярна направлению подачи (рис. 1.5).

При продольном обтачивании

$$t = (D - d) / 2,$$

где D — диаметр заготовки; d — диаметр обработанной поверхности.

При отрезке заготовки глубина резания t равна ширине отрезного резца b .

Глубина резания и подача характеризуют процесс резания с технологической стороны: с точки зрения положения и движения инструмента, обеспечивающих процесс резания. Но при одной и той же подаче и глубине в зависимости от формы режущей кромки и ее расположения (углов в плане) меняются ширина и толщина поперечного сечения срезаемого слоя, от которых зависят

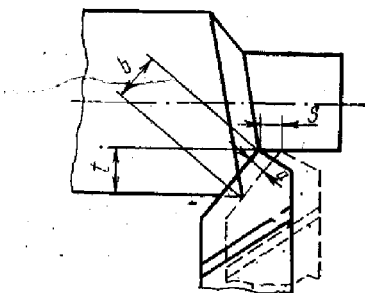


Рис. 1.5. Элементы сечения срезаемого слоя

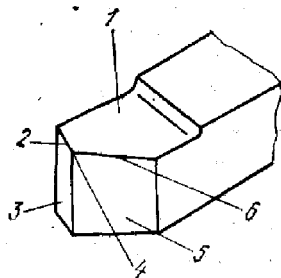


Рис. 1.6. Рабочие поверхности и режущие кромки резца

процесс пластической и упругой деформации, сопротивление металла деформированию, количество выделившегося тепла и условия теплоотвода.

Ширина среза b (мм) — длина стороны сечения срезаемого слоя, образованной поверхностью резания (см. рис. 1.5).

Толщина среза a (мм) — длина нормали к поверхности резания, проведенной через рассматриваемую точку режущей кромки, ограниченная сечением срезаемого слоя.

Толщина и ширина среза представляет собой не толщину и ширину стружки, а размеры до ее образования. Размеры стружки отличаются от размеров срезаемого слоя из-за явления усадки, происходящего вследствие деформации металла при резании. Между глубиной резания и шириной среза, подачей и толщиной среза существуют зависимости

$$a = S \sin \varphi; \quad b = t / \sin \varphi.$$

Произведение глубины резания на подачу или ширины среза на толщину дает номинальную или расчетную пло-

щадь среза (мм^2), которая при свободном резании* равна

$$f = tS = ab.$$

В случае несвободного резания действительная площадь среза отличается от номинальной на величину гребешков, остающихся на обработанной поверхности из-за наличия на резце углов в плане и закругления при вершине резца.

Объем срезаемого слоя ($\text{см}^3/\text{мин}$), равный объему стружки, снятой за 1 мин работы, равен

$$W = vtS.$$

Части и элементы резца. Резец состоит из рабочей части и крепежной части — стержня прямоугольного, квадратного или круглого сечения, служащего для закрепления резца в резцедержателе станка. Рабочая часть имеет форму клина. С ее помощью со срезаемого с заготовки слоя (припуска) отделяют слой определенной толщины, превращая его при этом в стружку.

На рабочей части резца затачивают переднюю поверхность 1, контактирующую в процессе резания со срезаемым слоем и стружкой; главную заднюю поверхность 5, контактирующую с поверхностью резания; вспомогательную заднюю поверхность 3, обращенную к обработанной поверхности (рис. 1.6).

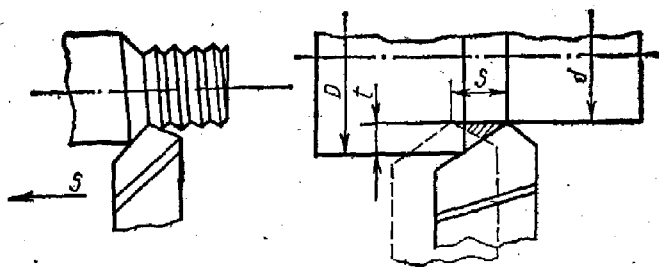


Рис. 1.7. Работа главной и вспомогательной режущих кромок

У резцов передняя и задняя поверхности чаще всего делаются плоскими.

Пересечение поверхностей рабочей части резца образует режущие кромки. Пересечение передней и главной задней поверхностей образует главную режущую кромку

* При свободном резании в работе участвуют одна режущая кромка, при несвободном — две или более.

6, пересечение передней и вспомогательной задней поверхностей — вспомогательную режущую кромку 2. Вспомогательных кромок может быть две. Главная режущая кромка формирует большую сторону сечения срезаемого слоя, а вспомогательная — меньшую сторону (рис. 1.7).

Место сопряжения главной и вспомогательной режущих кромок называется вершиной резца 4 (см. рис. 1.6). Сопряжение бывает по дуге окружности радиуса r (величина $r=0,5 \dots 2$ мм) или по переходной кромке под углом φ_0 ($\varphi_0=\varphi/2$) (рис. 1.8).

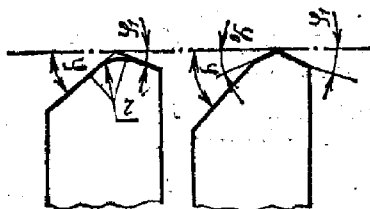


Рис. 1.8. Форма сопряжений главной и вспомогательной режущих кромок

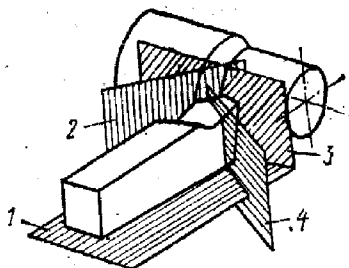


Рис. 1.9. Координатные плоскости резца

Геометрические параметры резца. Форма режущей части резца определяется конфигурацией и расположением в пространстве его поверхностей и кромок, т. е. с помощью углов, называемых геометрическими параметрами или просто геометрией резца.

Для определения геометрии резца принимают следующие координатные плоскости: 1 — основная плоскость, 2 — плоскость резания, 3 — рабочая плоскость, 4 — главная секущая плоскость (рис. 1.9).

Основной плоскостью (статической) называется плоскость, проведенная перпендикулярно направлению скорости главного движения. У токарных резцов эта плоскость совпадает с нижней опорной поверхностью резца.

Плоскостью резания называется плоскость, касательная к режущей кромке в рассматриваемой точке и перпендикулярная к основной плоскости. При установке токарного резца по линии центров станка и отсутствии подачи плоскость резания расположена вертикально.

Рабочая плоскость — плоскость, в которой расположены направления скоростей главного движения и движения подачи.

Так как углы резца двугранные, то для определения их величины пользуются секущими плоскостями. Секущие плоскости должны быть перпендикулярны ребру угла, которым является режущая кромка. Главной секущей плоскостью 4 называется координатная плоскость, перпендикулярная линии пересечения основной плоско-

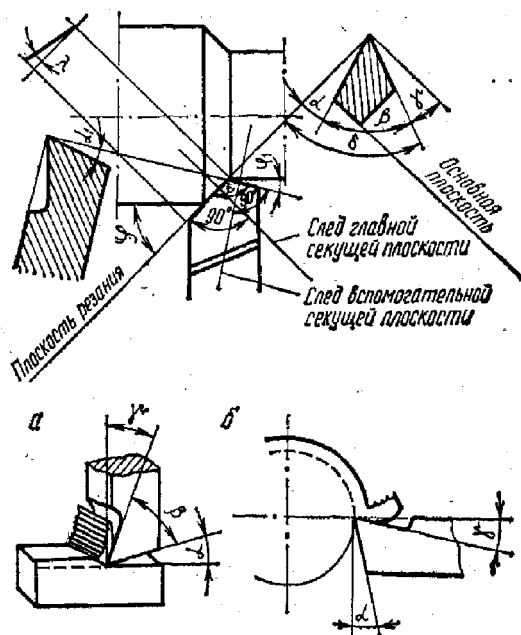


Рис. 1.10. Геометрические параметры резцов:
а — строгание; б — точение

сти 1 и плоскости резания 2. В связи с тем что плоскость резания касательна к главной режущей кромке в рассматриваемой точке, главная секущая плоскость всегда нормальна (перпендикулярна) к ней. Вспомогательной секущей плоскостью называется плоскость, перпендикулярная к вспомогательной режущей кромке в рассматриваемой точке.

Углы, измеряемые в главной секущей плоскости, называются главными (они определяют режущий клин, отделяющий от припуска слой металла, превращаемый в стружку), во вспомогательной плоскости — вспомогательными.

В главной секущей плоскости измеряют главный задний угол, передний угол, угол заострения и угол резания (рис. 1.10).

Главным задним углом α называется угол между главной задней поверхностью резца (или касательной к ней) и плоскостью резания.

Углом заострения β называется угол между главной задней и передней поверхностями резца (или касательными к ним).

Главным передним углом γ называется угол между передней поверхностью резца (или касательной к ней) и основной плоскостью в рассматриваемой точке главной

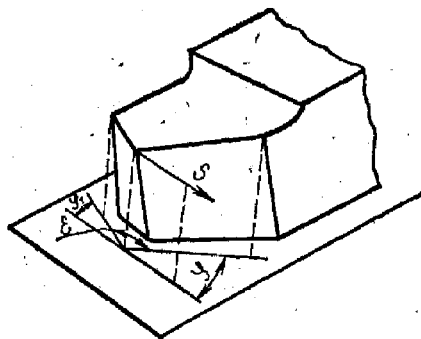


Рис. 1. 11. Углы резца в плане

режущей кромки. Он имеет положительное значение, если передняя поверхность направлена вниз от режущей кромки; имеет отрицательное значение, если передняя поверхность направлена вверх от нее; равен нулю, если передняя поверхность параллельна основной плоскости.

Углом резания δ называется угол между плоскостью резания и передней поверхностью резца (или касательной к ней).

Между этими углами существует соотношение

$$\alpha + \beta + \gamma = 90^\circ; \delta + \gamma = 90^\circ.$$

Во вспомогательной секущей плоскости измеряется *вспомогательный задний угол α_1* . Это угол между касательной к вспомогательной задней поверхности резца и плоскостью, проведенной через точки вспомогательной режущей кромки перпендикулярно основной плоскости.

В основной плоскости измеряются углы в плане (рис. 1.10, рис. 1.11).

Главным углом в плане ϕ называется угол между плоскостью резания и рабочей плоскостью. Для резца он определяется проекцией главной режущей кромки на ос-

новную плоскость и направлением подачи. Вспомогательным углом в плане φ_1 называется угол между проекцией вспомогательной режущей кромки на основную плоскость и направлением подачи. Углом в плане при вершине ε называется угол между проекциями главной и вспомогательной режущих кромок на основную плоскость. Между этими углами существует соотношение

$$\varphi + \varepsilon + \varphi_1 = 180^\circ.$$

В плоскости, проходящей через главную режущую кромку перпендикулярно к основной плоскости, измеряется *угол наклона главной режущей кромки*. От этого угла зависит прочность вершины резца и направление схода стружки (рис. 1.12).

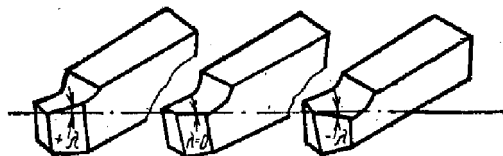


Рис. 1.12. Угол наклона главной режущей кромки резца

Углом наклона главной режущей кромки λ называется угол между режущей кромкой и основной плоскостью.

Если вершина резца — наинизшая точка, то угол λ — положительный, если наивысшая — отрицательный. Если режущая кромка параллельна основной плоскости, угол λ равен нулю.

При измерении углов α и γ угломерами плоскость резания считается вертикальной. Это может быть только при отсутствии подачи, при установке вершины резца на уровне линии центров заготовки и при значении угла наклона режущей кромки $\lambda = 0^\circ$ (когда все точки режущей кромки лежат на линии центров). При вращении заготовки точки режущей кромки описывали бы траекторию в виде окружности, и поверхность резания представляла бы собой усеченный конус. Если резец получает подачу, то поверхность резания — это винтовая поверхность с шагом, равным подаче, и касательная к ней плоскость резания будет расположена под углом наклона винтовой поверхности. Кинематический угол при этом становится меньше статического.

На рис. 1.13 упрощенно представлена работа при про-

дольном точении с углом $\varphi=90^\circ$ и $\lambda=0^\circ$. Режущая кромка резца установлена на уровне оси заготовки: $B-B$ — положение плоскости резания при вращении заготовки и отсутствии подачи (точки режущей кромки описывают окружности, и касательная к ним занимает вертикальное положение); $A-A$ — положение плоскости резания, ка-

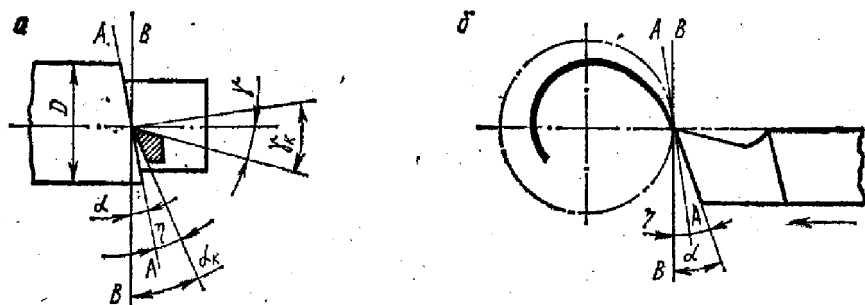


Рис. 1.13. Изменение углов резца в процессе работы:
а — продольное точение; б — поперечное точение

сательной к винтовой поверхности резания, при работе с включенной подачей; α_k — кинематический задний угол; η — угол рабочей плоскости между направлениями скоростей результирующего движения резания и главного движения.

Поверхность резания в действительности будет ближе к задней поверхности резца. В результате изменения положения плоскости резания задний угол уменьшится и будет иметь величину $\alpha_k = \alpha - \eta$, где η — это угол наклона винтовой траектории точки режущей кромки; α_k — кинематический задний угол (угловой зазор между поверхностью резания и задней поверхностью резца); α — статический задний угол при отсутствии подачи, когда плоскость резания занимает вертикальное положение.

Если развернуть на плоскость окружность вращения и винтовую траекторию точки режущей кромки, то мы получим треугольник, в котором катетами будут подача и окружность вращения, а гипотенузой — винтовая траектория. Отсюда определится угол η (рис. 1.14):

$$\eta = \arctg S/\pi D.$$

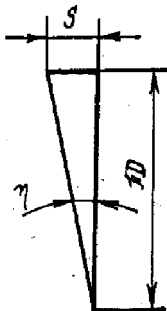


Рис. 1.14. Развертка траектории точки режущей кромки резца

С увеличением подачи увеличивается наклон винтовой траектории точки режущей кромки (эти траектории образуют поверхность резания), а кинематический задний угол уменьшается. Разные точки режущей кромки находятся на различных диаметрах заготовки; а следовательно, наклон их винтовых траекторий будет различным. Чем меньше диаметр заготовки, тем значительно уменьшается задний угол в процессе работы, так как наклон винтовой траектории больше.

Если резец имеет угол в плане $\varphi = 90^\circ$, то направление подачи и секущей плоскости, в которой измеряется угол α , совпадает. Если угол $\varphi \neq 90^\circ$, то угол между положениями плоскости резания, измеренный в главной секущей плоскости, η_φ можно определить по формуле

$$\operatorname{tg} \eta_\varphi = \operatorname{tg} \eta \sin \varphi.$$

Кинематический же задний угол в главной секущей плоскости будет равен:

$$\alpha_K = \alpha - \eta_\varphi.$$

При поперечном точении, при отрезании детали точки режущей кромки описывают архимедову спираль, следовательно, касательная к поверхности резания и плоскость резания также будут отклоняться от касательной к окружности вращения, и кинематический задний угол резца будет меньше.

Чем больше подача и меньше диаметр, на котором расположена точка режущей кромки, тем больше угол между положениями плоскости резания. Следовательно, кинематический задний угол при поперечном точении будет равен

$$\alpha_K = \alpha - \eta_\varphi,$$

где

$$\operatorname{tg} \eta_\varphi = \operatorname{tg} \eta \sin \varphi.$$

При обычно употребляемых при точении подачах угол η незначителен, и изменением заднего угла в процессе работы можно пренебречь. В процессе работы с большими подачами, при затыловочных работах, нарезании резьбы, обработке ходовых винтов необходимо учитывать изменение заднего угла резца и увеличивать величину его заточки на угол η_φ .

Передний угол резца γ в этом случае увеличивается на величину η_φ , так как изменяет свое положение основ-

ная плоскость (см. определение переднего угла и рис. 1.13). Угол заострения резца β сохраняет свою величину. Таким образом, во время работы резец в главной секущей плоскости будет иметь кинематический передний угол, равный

$$\gamma_k = \gamma + \eta_\phi.$$

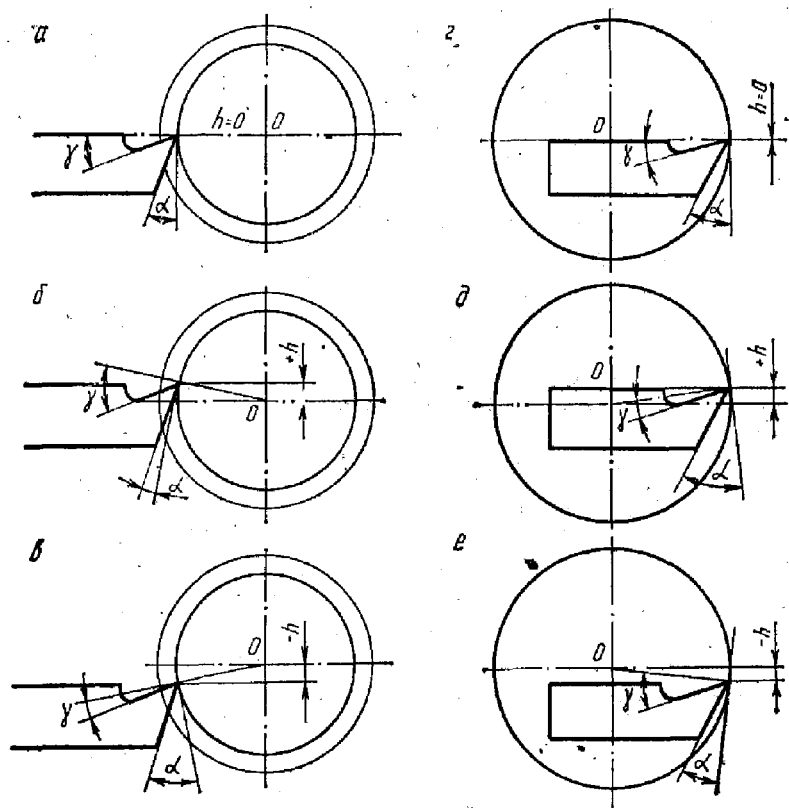


Рис. 1.15. Геометрические параметры резца в зависимости от положения его вершины относительно оси центров при:
а, б, в — наружном точении; г, д, е — растачивании

Для обеспечения в процессе работы оптимальной величины заднего угла, его затачивают большим на величину уменьшения. Это уменьшает угол заострения β , что ухудшает отвод тепла и уменьшает прочность резца. Чтобы сохранить оптимальные условия работы инструмента, можно затачить передний угол уменьшенным на такую же величину.

Бывают случаи, когда необходимо установить режу-

шую кромку ниже или выше оси заготовки. Наличие положительного или отрицательного угла наклона режущей кромки также приводит к тому, что точки режущей кромки располагаются ниже или выше оси заготовки. При этом будет меняться положение касательной к поверхности резания (из-за выпуклости или вогнутости поверхности резания). Величины переднего и заднего углов будут равны (рис. 1.15):

$$\gamma_y = \gamma \pm \tau_\phi; \alpha_y = \alpha \pm \tau_\phi.$$

Если угол $\phi = 0^\circ$, то $\tau = \arcsin h/R$.

Если угол $\phi \neq 0^\circ$, то $\operatorname{tg} \tau_\phi = \operatorname{tg} \tau \cos \phi$.

Таким образом, во время работы резец в главной секущей плоскости будет иметь кинематические углы:

$$\alpha_k = \alpha - \eta_\phi \pm \tau_\phi; \gamma_k = \gamma + \eta_\phi \pm \tau_\phi.$$

Методика выполнения работы

Лабораторное оборудование: резцы различных типов — 3 шт.; угломеры — 2 шт.; штангенциркуль; линейка; шаблоны.

При проведении работы требуется каждому из резцов дать характеристику и выполнить их эскизы.

На эскизах показать габаритные размеры резца и условными буквами обозначить все его углы. Измерить углы при помощи угломеров или шаблонов. Численную величину углов занести в соответствующую таблицу протокола. Габаритные размеры резцов измерять с помощью штангенциркуля и линейки с точностью ± 1 мм.

Углы резцов измерять при помощи угломеров: портативного, настольного МИЗ, настольного ЛМТ, маятникового, угломеров УН, УМ и др., а также с помощью шаблонов.

Углы резцов α , γ , β , δ , λ измерять с точностью $\pm 1^\circ$; ϕ , ϵ , ϕ_1 — с точностью $\pm 2^\circ$; α_1 и ϕ_1 у отрезных резцов — с точностью $\pm 30'$.

Рассмотрим устройство некоторых типов угломеров.

Настольный угломер МИЗ имеет плиту 1, на которую устанавливают измеряемый резец (рис. 1.16). В конце плиты находится вертикальный стержень 2, на котором передвигается ползунок 3. При помощи винта 4 этот ползунок может быть закреплен в любом положении. С пол-

зунком соединен сектор 5, снабженный шкалой в градусах. При измерении углов сектор устанавливают в плоскости, в которой требуется измерить углы. На секторе имеется поворотный измерительный рычаг 6. Верхнее плечо рычага имеет на конце риску и скользит по сектору шкалы с делениями, а нижнее плечо рычага имеет две взаимно перпендикулярные измерительные грани 7. Риска рычага показывает нуль на градусном делении шкалы

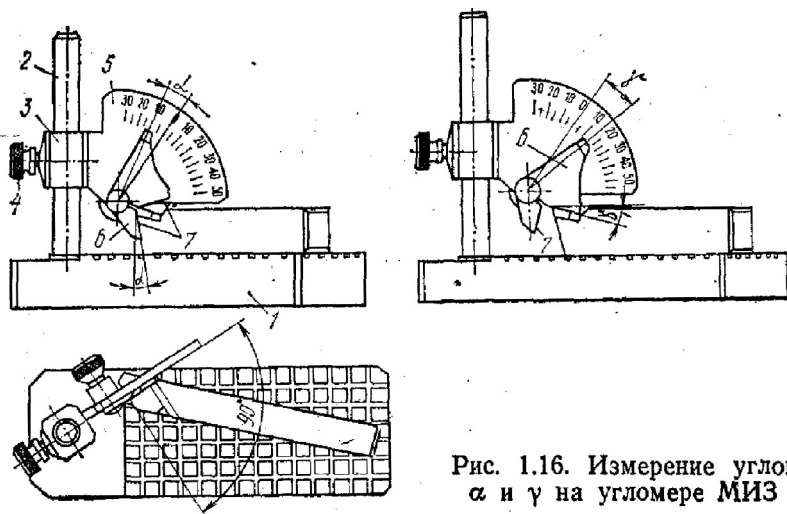


Рис. 1.16. Измерение углов α и γ на угломере МИЗ

сектора в том случае, когда одна измерительная грань находится в горизонтальном положении, а другая — в вертикальном.

При измерении главных углов плоскость сектора устанавливается перпендикулярно к главной режущей кромке. Для измерения переднего угла горизонтальная измерительная грань подводится до соприкосновения с передней гранью резца и по риске верхнего плеча рычага отсчитывается количество градусов на шкале сектора. При измерении главного заднего угла вертикальная измерительная грань поворачивается до соприкосновения с главной задней гранью резца и на шкале сектора отсчитывается показание в градусах по риске поворотного рычага.

После определения главного переднего угла и главного заднего угла подсчитываются:

угол резания — по формуле $\delta = 90^\circ - \gamma$;

угол заострения — по формуле $\beta = 90^\circ - \alpha - \gamma$.

Вспомогательный задний угол α_1 измеряется так же, как и главный задний угол, с той разницей, что измерения производятся не в плоскости, перпендикулярной к главной режущей кромке, а в плоскости, перпендикулярной к вспомогательной режущей кромке.

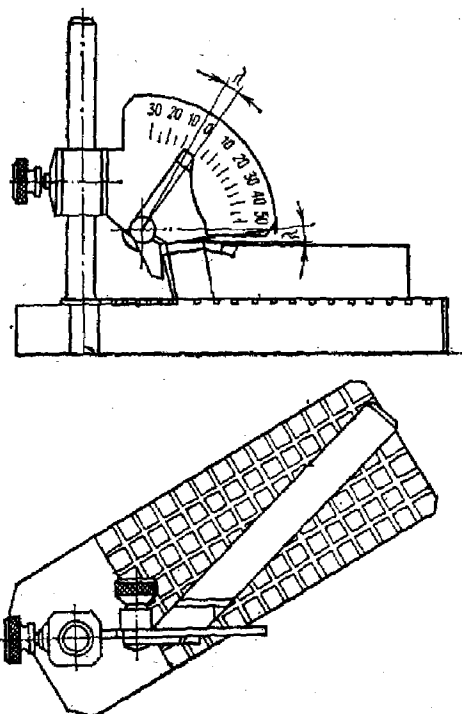


Рис. 1.17. Измерение угла λ на угломере МИЗ

Для измерения угла наклона главной режущей кромки λ сектор прибора устанавливается в плоскости, проходящей через главную режущую кромку резца, и горизонтальная измерительная грань опускается до полного соприкосновения с режущей кромкой. Величина угла отсчитывается на шкале сектора (рис. 1.17).

Настольный угломер КРИН (конструкции завода «Красный инструментальщик») состоит из основания 8 с вертикальной стойкой 4 (рис. 1.18), по шпоночному пазу которой перемещается измерительная головка 5 со шкалой 3 и измерительной линейкой с указателем 2. С помощью винта 6 измерительная головка закрепляет-

ся на любой высоте над столом *1*, который может поворачиваться на стойке *4*. Требуемое положение стола фиксируется винтом *7*.

Измерительная линейка имеет три ребра: *I*, *II* и *III*. При контроле углов инструмента они совмещаются без просвета (или с минимальным равномерным просветом) с соответствующей плоскостью инструмента. При положении штриха указателя напротив нулевого штриха шкалы ребро *III* параллельно рабочей плоскости стола *1*, а ребро *I* перпендикулярно к ней. Поэтому ребро *III* линейки *2* используется для измерения углов между плоскостью инструмента и плоскостью стола, а ребро *I* — между плоскостью инструмента и плоскостью, перпендикулярной плоскости стола. Ребро *II* измерительной линейки расположено под углом 45° к ребрам *I* и *III* и предназначено, главным образом, для измерения углов, значения которых больше 45° , например, углов резца в плане.

При работе на приборе плоскостью измерения является плоскость измерительной линейки, плоскость шкалы. Стол *1* поворачивается в удобное для работы положение и закрепляется винтом *7*. Опуская измерительную головку и поворачивая измерительную линейку, совмещают одно из ее ребер с измеряемой поверхностью инструмента в нужном направлении; винтами *6* и *9* закрепляют измерительную головку и линейку; по шкале прибора отсчитывают значение контролируемого угла. Необходимо иметь в виду, что нулевое значение измеряемой величины не всегда соответствует нулевому показанию прибора. Поэтому следует мысленно поставить измерительную линейку в положение, соответствующее нулевому значению измеряемой величины; соответствующее ей положение штриха указателя на шкале считать за начало отсчета угла. На исправном приборе началом отсчета служат деления шкалы: 0 или 45° .

Прямое назначение прибора — измерение углов заточки резца. В этом случае плоскость стола прибора является основной плоскостью, резец устанавливается основанием на плиту (рис. 1.19). Однако, как и прибор МИЗ, он может быть использован для контроля геометрических параметров других инструментов, одну из координатных плоскостей которых или плоскость, перпендикулярную им, можно совместить с плоскостью стола прибора.

Настольный угломер ЛМТ служит для измерения всех углов резца (рис. 1.20). Он состоит из плиты *1* и вертикальной стойки *2*. По ней перемещается ползун *3*, на котором укреплены три сектора с измерительными шкалами и поворотными рычагами. Верхнее плечо поворотного рычага, скользящее по делениям шкалы, имеет риску; нижнее плечо — две измерительные грани *4*. Ползун с секторами при необходимости (после ослабления фикса-

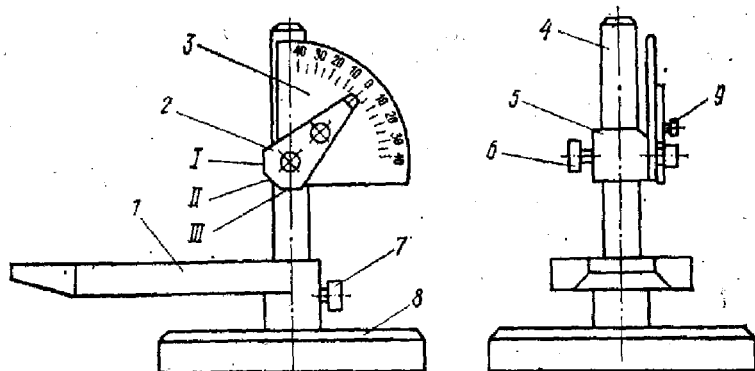


Рис. 1.18. Конструкция угломера КРИН («Красный инструментальщик»)

тора *6*) может поворачиваться вокруг оси стойки. Фиксатор *6* удерживает ползун при различных углах поворота вокруг оси стойки в любом положении по высоте. Поворотные рычаги снабжены винтами *7*, позволяющими фиксировать их в определенном положении при измерении углов резца. На плите *1* имеется передвижная направляющая линейка *5*, служащая для правильной установки резца при измерении углов в плане.

При измерении главных углов резца ползун поворачивается так, чтобы плоскость сектора *1* (со шкалой и поворотным рычагом) была перпендикулярна к главной режущей кромке, т. е. чтобы плоскость сектора была для резца главной секущей плоскостью.

Для измерения главного переднего угла γ поворотный рычаг устанавливают так, чтобы горизонтальная грань соприкасалась с передней поверхностью резца. Указатель (риска) на верхнем плече рычага, отклоняясь от нуля, покажет величину угла.

Задний угол α измеряется аналогично переднему углу.

В этом случае вертикальная измерительная грань доводится до контакта без просвета с главной задней поверхностью (пластинкой резца). Риска на верхнем плече рычага покажет по шкале величину заднего угла.

При измерении углов в плане ползун поворачивается на стойке так, чтобы основание горизонтального секто-

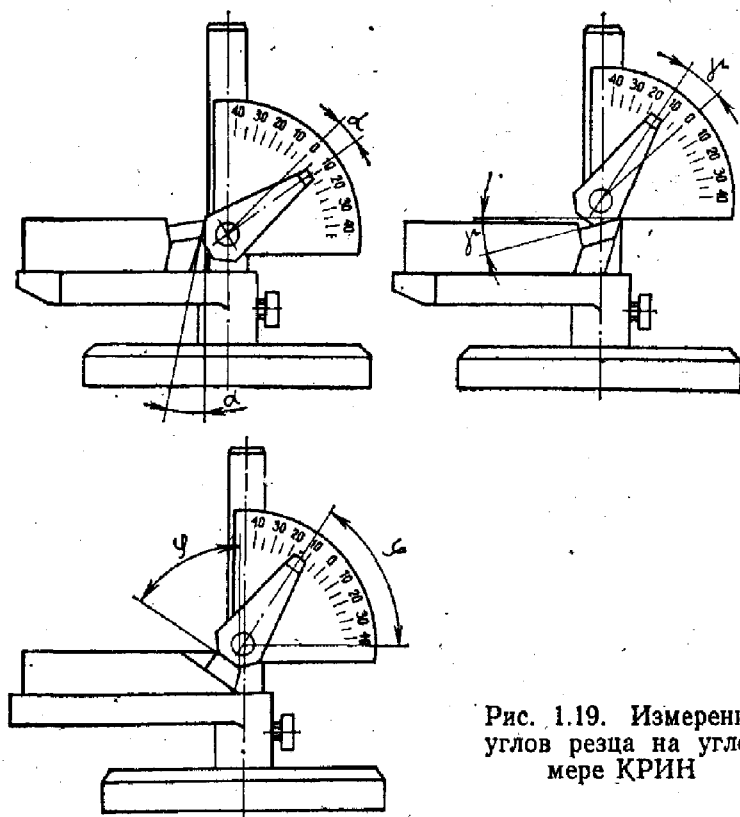


Рис. 1.19. Измерение углов резца на угломере КРИН

ра II соприкасалось без зазора с торцом передвижной направляющей линейки, т. е. было бы перпендикулярно к оси резца. Затем измерительная грань поворачивается до соприкосновения главного угла в плане ϕ с главной (или при измерении вспомогательного угла в плане ϕ_1 — со вспомогательной) режущей кромкой. Отклонение риски верхнего плеча рычага от нуля шкалы покажет величину измеряемого угла.

Для измерения угла наклона главной режущей кромки ползун поворачивается на стойке так, чтобы сектор III и режущее лезвие находились в одной плоскости. Откло-

целые риски верхнего плеча поворотного рычага от нуля шкалы сектора при совмещении горизонтальной измерительной грани с режущей кромкой резца покажет величину угла λ .

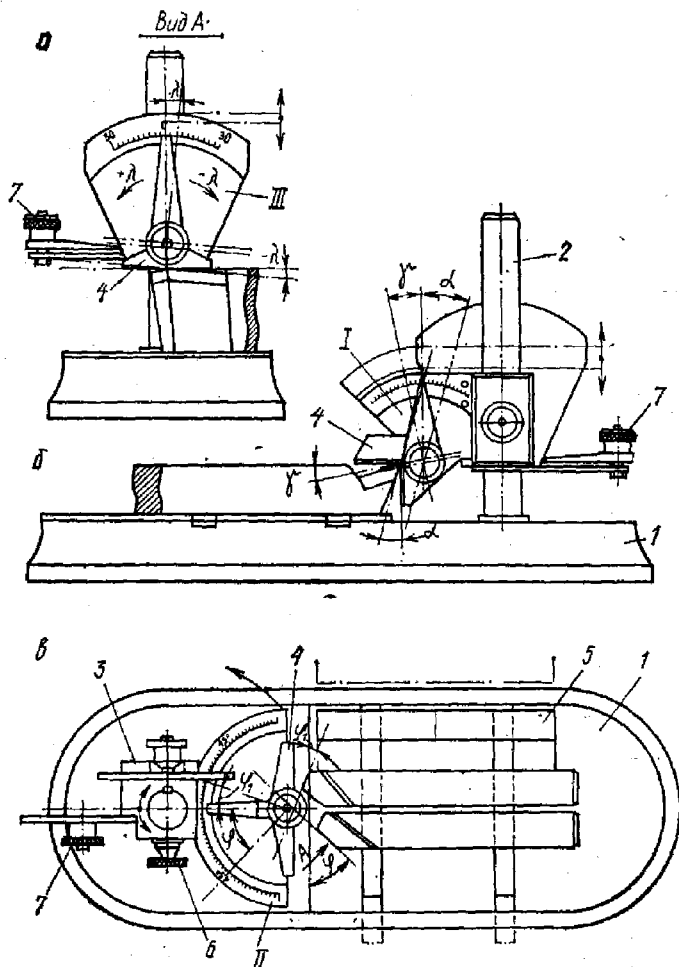


Рис. 1.20. Универсальный угломер ЛМТ:

а — измерение угла λ ; б — измерение углов α и γ ; в — измерение углов ϕ и ψ .

Маятниковый угломер предназначен для измерения углов режущих инструментов различных видов. Его работа основана на принципе действия маятника, на одной оси с которым укреплена стрелка. Стрелку фиксируют с помощью кнопки тормоза, расположенной на корпусе угломера. При нажатии на кнопку стрелка может поворачиваться под действием груза маятника.

Круговая шкала угломера с ценой деления 2° имеет четыре сектора по 90° . Каждый сектор градуирован от 0 до 45° и от 45 до 0° . К корпусу прикреплена измерительная линейка. При установке ребра линейки по горизонтали и при нажатии на кнопку стрелка занимает вертикальное положение против нулевого деления (рис. 1.21,а). При отклонении ребра линейки от горизонтали стрелка показывает угол наклона (рис. 1.21,б).

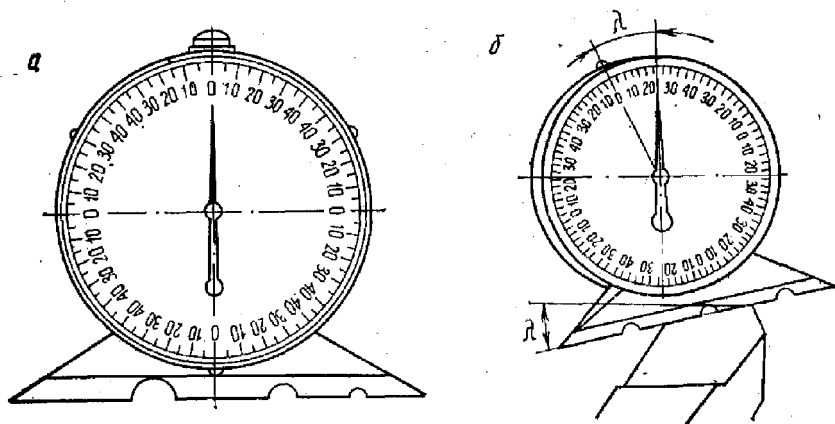


Рис. 1.21. Маятниковый угломер

Для проверки угломер устанавливают ребром линейки на плиту, выверенную по горизонтали с помощью уровня. Стрелка угломера должна показывать нуль. Если стрелка не устанавливается на нуль, то угломер нужно отрегулировать.

Режущий инструмент при измерении устанавливают базовой поверхностью на плиту или зажимают в центрах. Затем ребро измерительной линейки угломера прикладывают к поверхности, определяющей измеряемый угол, и нажимают на кнопку тормоза. После прекращения колебаний стрелки отпускают кнопку и отсчитывают по шкале показания.

На рис. 1.22 показаны примеры применения угломера.

Универсальный угломер УН работает контактным методом с отсчетом результатов измерений по градусной шкале и нониусу (рис. 1.23—1.25).

На дуге 1 нанесена основная градусная шкала 2, которая градуирована от 0 до 130° . По дуге 1 перемещается пластина — сектор 3 с нониусом, на котором с помощью

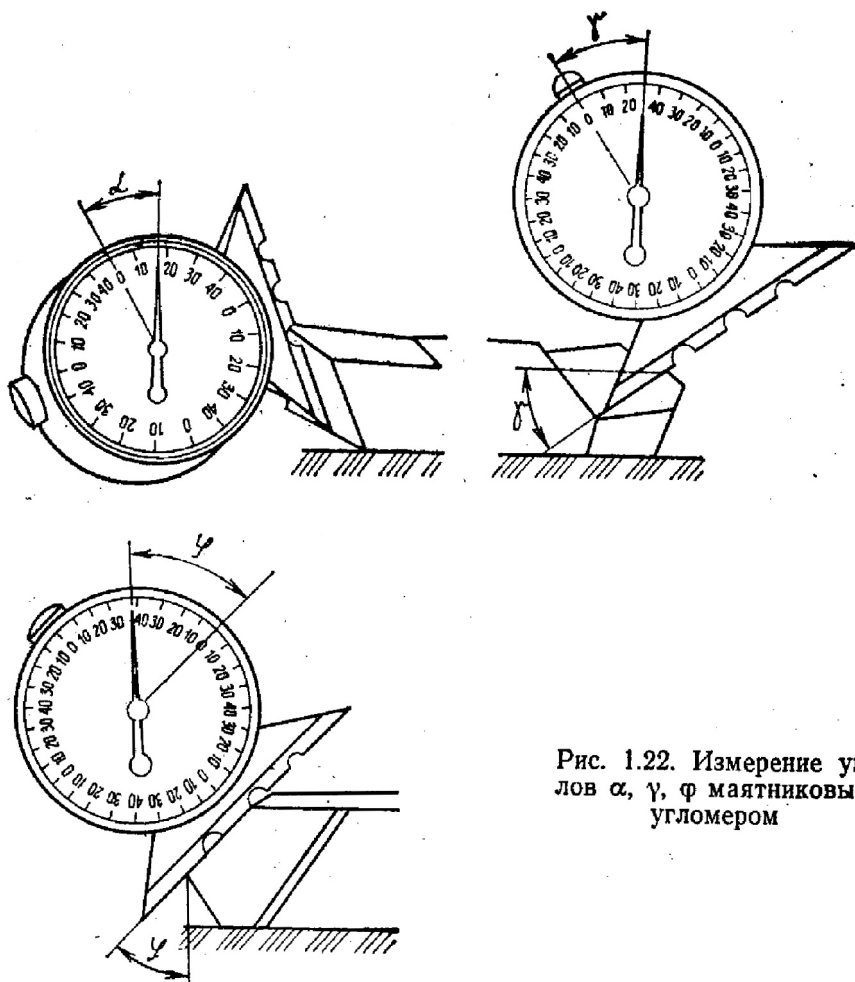


Рис. 1.22. Измерение углов α , γ , ϕ маятниковым угломером

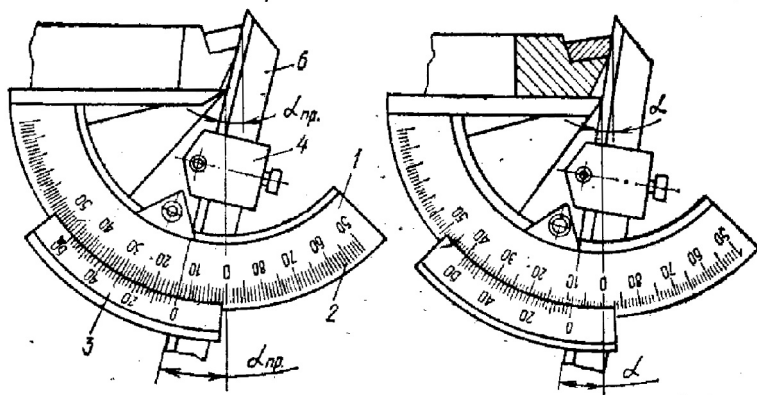


Рис. 1.23. Измерение угла α универсальным угломером УН

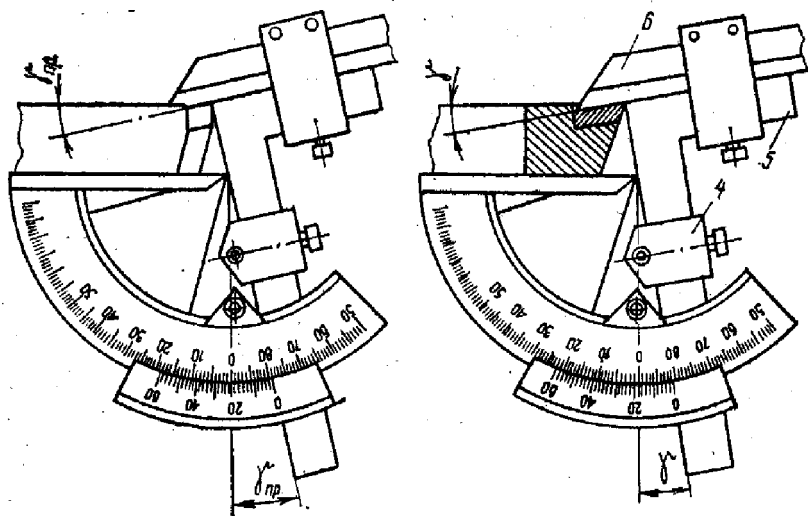


Рис. 1.24. Измерение угла γ универсальным угломером УН

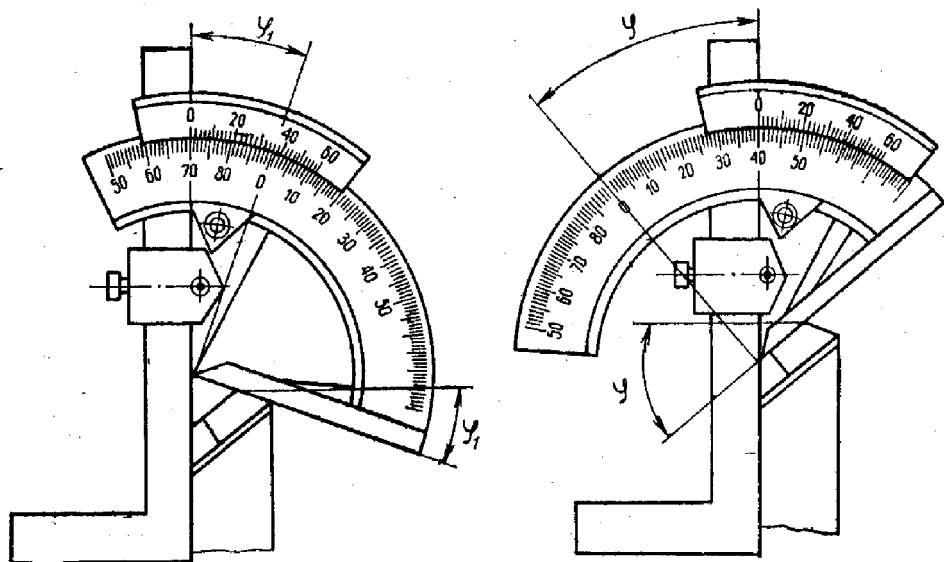


Рис. 1.25. Измерение углов в плане универсальным угломером УН

державки 4 закреплен угольник 5, связанный со съемной лекальной линейкой 6.

Путем различных перестановок измерительных деталей достигается измерение углов в пределах $0-320^\circ$.

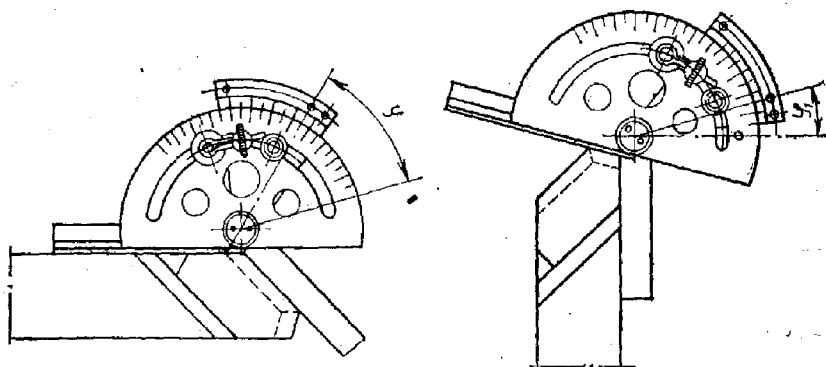


Рис. 1.26. Измерение углов в плане универсальным угломером УМ

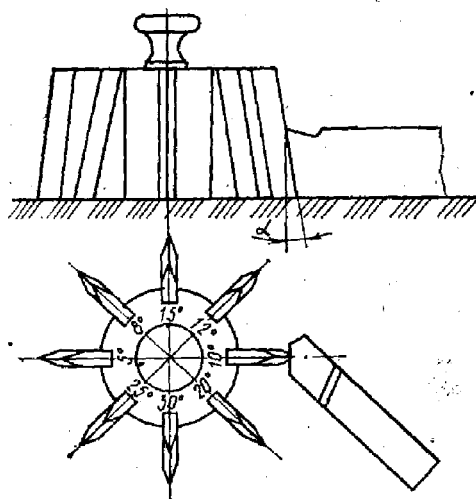


Рис. 1.27. Измерение заднего угла ребристой пирамидой

Измеряемая поверхность устанавливается между подвижной линейкой дуги 1 и подвижной лекальной линейкой 6 таким образом, чтобы образовался необходимый контакт, т. е. невидимый или видимый равномерный просвет (рис. 1.23—1.25 иллюстрируют метод измерения углов резца).

Углы резца в плане можно определить с помощью универсального угломера УМ, одна из линеек которого прикладывается к телу резца, а вторая — к главной или вспомогательной режущей кромке. По шкале угломера отсчитывается величина угла φ или φ_1 (рис. 1.26).

Ребристая пирамида служит для контроля углов резца в массовом и серийном производстве (рис. 1.27). Ее ребра выполнены с углами наклона, равными наиболее распространенным величинам задних углов резцов различного назначения. Прикладывая ребро к задней поверхности резца так, чтобы его плоскость была перпендикулярна главной режущей кромке, т. е. имитировала главную секущую плоскость, можно определить величину заднего угла.

Требования к оформлению работы

В отчете необходимо отразить типы, характеристики и эскизы резцов с необходимыми сечениями и габаритными размерами с обозначением всех углов резца (буквами); на эскизе показать деталь с элементами сечения срезаемого слоя и элементами режима резания; составить таблицу численных значений углов резцов.

Протокол лабораторной работы 1

Геометрия рабочей части резцов

Резец 1

Тип и характеристика резца
Эскиз резца

То же для резца 2 и т. д.

Углы резцов

Наименование резца	Угол резца, град								
	передний	задний	резания	заострения	наклона главной режущей кромки	главный в плане	вспомогательный в плане	при вершине в плане	вспомогательный задний
	γ	α	δ	β	λ	φ	φ_1	ε	α_1

ГЕОМЕТРИЯ СВЕРЛА С ВИНТОВЫМИ КАНАВКАМИ

Цель работы. Закрепление сведений о конструктивных элементах и геометрических параметрах сверл, элементах режима резания и срезаемого слоя при сверлении; ознакомление с методами измерения сверл и приборами, применяемыми для этой цели; приобретение навыков эскизирования сверл.

Вопросы для самоконтроля. 1. Элементы режима резания и срезаемого слоя при сверлении. 2. Части и элементы сверла, их назначение. 3. В каких плоскостях измеряются геометрические параметры сверла? 4. Дать определения углов в плане сверла. 5. Рассказать об особенностях угла наклона винтовой канавки сверла в разных точках режущей кромки сверла. 6. Чему равен передний угол в любой точке режущей кромки сверла? 7. Как найти задний угол сверла? В какой плоскости и почему он измеряется? Как определить необходимую величину заднего угла сверла для любой точки режущей кромки? 8. Дать определение вспомогательного заднего угла сверла α_1 , угла наклона перемычки φ , угла наклона режущей кромки сверла λ . 9. Как образуется угол поперечной кромки (перемычки) сверла? 10. Существующие методы измерения углов сверла.

Краткие теоретические сведения

Сверление — это способ обработки резанием, обеспечивающий получение сквозных и глухих отверстий в сплошном материале, а также применяемый для рас-сверливания уже имеющихся отверстий.

Элементы режима резания и срезаемого слоя. При работе сверло совершает вращательное движение вокруг своей оси (главное движение, обеспечивающее скорость резания) и перемещение вдоль оси (подача). В некоторых случаях вращательное движение может получать деталь, а не сверло. Скорость резания для точек режущей кромки различна. В центре сверла $v=0$. За скорость резания (м/мин) при сверлении принимается окружная скорость точки, лежащей на периферии. Она подсчитывается по формуле

$$v = \pi D n / 1000,$$

где D — диаметр сверла, мм; n — частота вращения сверла, об/мин;

Подача — величина перемещения сверла или детали вдоль оси отверстия за один оборот S_o (мм/об). Так как сверло имеет два зуба (пера) и режет одновременно двумя режущими кромками, то на каждую кромку (один зуб) приходится подача $S_z = S_o/z = S_o/2$ (мм/зуб). Минутная подача равна: $S_m = S_o n = S_z z n$ (мм/мин).

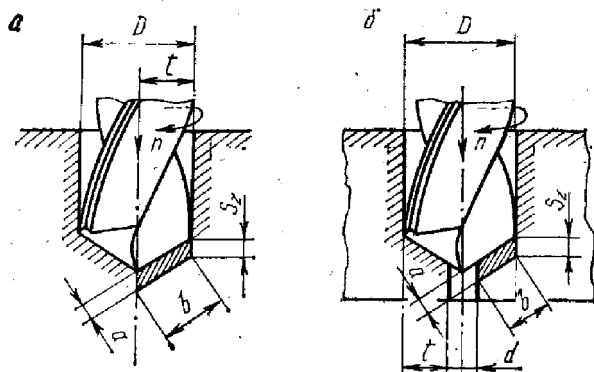


Рис. 2.1. Элементы режима резания и срезаемого слоя при:
а — сверлении; б — рассверливании

Глубине резания t при сверлении в сплошном материале соответствует величина срезаемого слоя, равная половине диаметра сверла. При рассверливании отверстия от диаметра d до диаметра D глубина резания $t = (D - d)/2$.

Ширина срезаемого слоя b без учета перемычки сверла измеряется вдоль кромки от оси сверла до точки, лежащей на наружном диаметре сверла (рис. 2.1).

Толщиной срезаемого слоя a называется длина нормали к поверхности резания, проведенной через рассматриваемую точку режущей кромки, ограниченная сечением срезаемого слоя (см. рис. 2.1).

Между этими величинами существуют следующие соотношения:

$$a = S_z \sin \varphi = S_o/2 \sin \varphi; \quad b = D/2 \sin \varphi.$$

Части и элементы сверла. Сверло состоит из рабочей части, шейки и хвостовика (рис. 2.2). Конический или цилиндрический хвостовик служит для закрепления сверла на станке.

Шейка сверла — промежуточная часть между хвостовиком и рабочей частью сверла. В связи с особенностями технологии изготовления сверла, шейка имеет меньший диаметр, чем рабочая часть. Последняя состоит из режущей и направляющей части и имеет две винтовые ка-

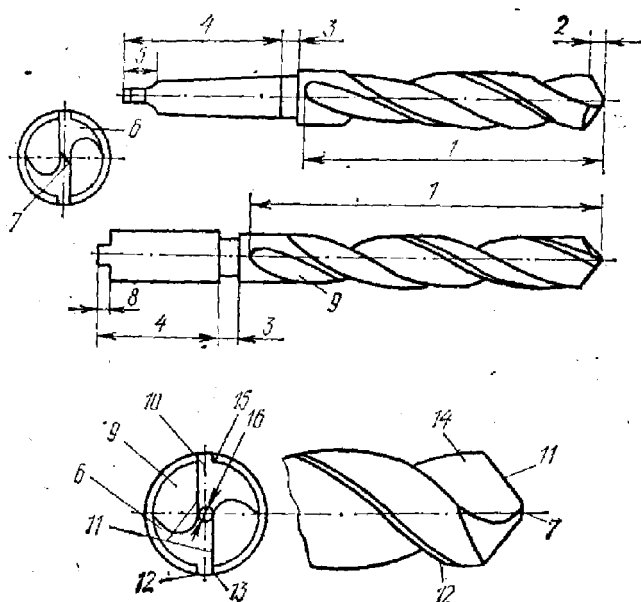


Рис. 2.2. Части и элементы сверла:

1 — рабочая часть; 2 — режущая часть; 3 — шейка; 4 — хвостовик; 5 — лапка; 6 — зуб; 7 — поперечная кромка; 8 — поводок; 9 — стружечная канавка; 10 — задняя поверхность; 11 — режущие кромки; 12 — ленточка; 13 — кромка ленточки; 14 — передняя поверхность; 15 — спинка зуба; 16 — сердцевина

навки, по которым транспортируется стружка из обрабатываемого отверстия.

Винтовые канавки разделяют рабочую часть сверла на два зуба (пера). Так как перья сверла должны быть соединены, то между ними вдоль оси сверла имеется сердцевина. Ее размер соответствует окружности, касательной к поверхности канавок. Направляющая часть обеспечивает движение сверла в обрабатываемом отверстии и служит резервом для образования режущей части при переточках сверла. Направляющая часть сверла для уменьшения трения соприкасается с отверстием только по отшлифованным винтовым ленточкам, которые расположены по краю винтовой канавки. Остальная часть зуба сверла имеет меньший диаметр и с обработанным от-

верстием не соприкасается. Ленточка шлифуется по окружности (см. рис. 2.2).

На поверхности винтовых стружечных канавок образуется и транспортируется стружка, т. е. они являются передними поверхностями сверла.

Торец сверла на режущей части затачивают, образуя главные задние поверхности, обращенные в процессе обработки к поверхности резания. Задние поверхности могут быть оформлены частью конической, линейчатой

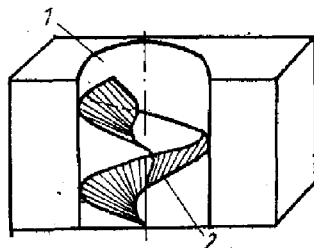


Рис. 2.3. Поверхности при сверлении:
1 — обработанная поверхность; 2 — поверхность резания

эвольвентной, винтовой, плоской и другими поверхностями. Вспомогательными задними поверхностями являются наружные поверхности круглошлифованных ленточек. Это часть конической поверхности с очень малой конусностью, ось которой совпадает с осью сверла. Передние поверхности винтовых канавок, пересекаясь с главными задними поверхностями, образуют главные режущие кромки, расположенные симметрично оси сверла, а пересекаясь со вспомогательными задними поверхностями (ленточками) — вспомогательные режущие кромки. Они являются коническими винтовыми линиями с очень малой конусностью. Так как в сверле имеется сердцевина, то при пересечении двух задних поверхностей образуется поперечная кромка или перемычка (см. рис. 2.2).

Геометрические параметры сверла. При сверлении и рассверливании отверстий обработанной поверхностью является поверхность обработанного отверстия. Поверхность резания — это поверхность, образуемая режущей кромкой при ее движении в процессе резания (рис. 2.3).

Геометрические параметры сверла рассматриваются в разных плоскостях (рис. 2.4).

Главным углом в плане ϕ называется угол в основной плоскости между плоскостью резания и рабочей плоскостью *. От угла ϕ зависит ширина и толщина срезае-

* Определения координатных плоскостей приведены в лабораторной работе 1.

мого слоя, условия теплоотвода, прочность режущей части сверла. Величину угла ϕ назначают в зависимости от свойств обрабатываемого материала. На практике требуется быстро определять, для каких условий работы предназначено заточенное сверло. Для этого измеряют угол между проекциями главных режущих кромок на

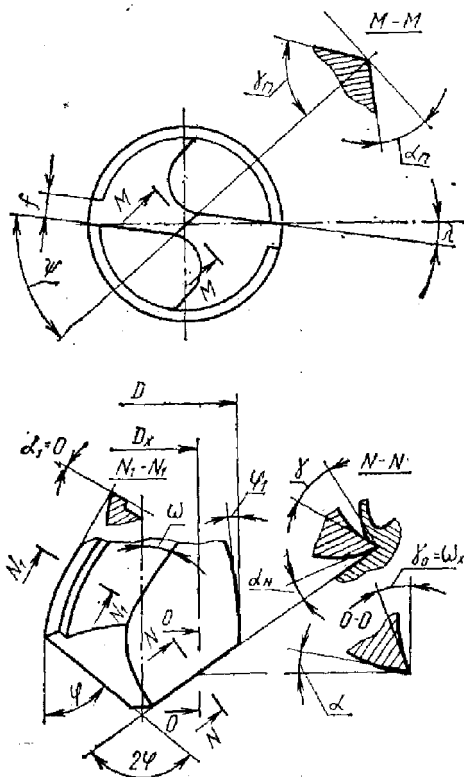


Рис. 2.4. Геометрические параметры сверла

плоскость, проходящую через ось сверла, параллельно режущим кромкам — двойной угол в плане 2ϕ (см. рис. 2.4). Измерить угол 2ϕ можно с помощью простых угломеров. Но на ширину и толщину среза влияет не угол 2ϕ , а угол ϕ на каждом пере сверла. При заточке можно получить точную величину угла 2ϕ , но разные величины углов ϕ на перьях сверла. Условия работы на каждом пере сверла в данном случае разные. При этом ухудшаются условия резания, снижается точность и качество обработанного отверстия. Вот почему при оценке

качества изготовления и заточки сверла необходимо измерять углы φ на каждом из перьев.

В основной плоскости рассматриваются вспомогательные углы в плане φ_1 (см. рис. 2.4). Чтобы избежать защемления сверла в просверленном отверстии, диаметр рабочей части сверла уменьшают по направлению к хвостовику, т. е. делают обратную конусность. Чтобы после переточек диаметр сверла изменялся незначительно, обратная конусность сверла невелика — 0,03 ... 0,15 мм на 100 мм длины сверла.

Вспомогательным углом в плане φ_1 называется угол между проекцией вспомогательной режущей кромки (кромки ленточки) на основную плоскость сверла и рабочей плоскостью. Величина его не превышает 10'. Ее можно определить по формуле

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = (D - D_1) / 2l,$$

где D и D_1 — диаметры сверла в начале и конце направляющей части; l — длина направляющей части.

Передняя поверхность сверла представляет собой винтовую поверхность, состоящую из семейства винтовых линий, у которых одинаковый шаг и различный диаметр. Поэтому угол наклона этих винтовых линий различный.

Углом наклона винтовой канавки ω называется угол между касательной к винтовой линии, образующей эту канавку, и линией, параллельной оси сверла. В разных точках режущей кромки он неодинаков. В периферийной точке главной режущей кромки, т. е. по кромке ленточки, он максимальный.

Угол ω зависит от обрабатываемого материала, глубины просверливаемого отверстия и других факторов. Сверла изготавливаются с углами $\omega = 15 \dots 60^\circ$.

Для других точек режущей кромки угол наклона винтовой канавки тем меньше, чем ближе эта точка к оси сверла. Рассмотрим развертки сечений сверла цилиндрическими поверхностями разного диаметра с осью, совпадающей с осью сверла, на длине шага винтовой канавки. Для сравнения накладываем эти сечения одно на другое (рис. 2.5). Как видно из рис. 2.5,

$$\operatorname{tg} \omega = \pi D / H; \quad \operatorname{tg} \omega_1 = \pi D_1 / H; \quad \operatorname{tg} \omega_2 = \pi D_2 / H, \\ \operatorname{tg} \omega_3 = \pi D_3 / H,$$

т. е. для любой точки

$$\operatorname{tg} \omega_x = \pi D_x / H,$$

где D — диаметр сверла на периферии; D_1, D_2, D_x — диаметры сверла, соответствующие разным точкам режущей кромки, через которые проведены сечения.

Отсюда

$$\operatorname{tg} \omega_x = (D_x/D) \operatorname{tg} \omega.$$

Наклон винтовой стружечной канавки — это наклон передней поверхности сверла в продольном направлении.

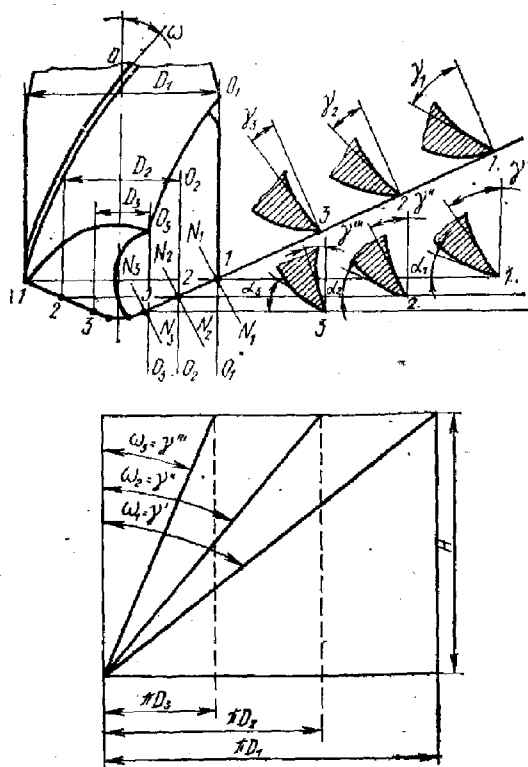


Рис. 2.5. Передние и задние углы сверла в разных точках режущей кромки

Следовательно, это продольный передний угол сверла, т. е. $\gamma_{пр} = \omega$. Этот угол измеряется в плоскости, касательной к цилиндру с радиусом r_x и осью, совпадающей с осью сверла. Но для характеристики процесса сверления нужно знать главный передний угол в главной секущей плоскости, который определяет условия резания. Главная секущая плоскость нормальна к главной режущей кромке (см. рис. 2.5).

Главным передним углом γ называется угол между касательной к передней поверхности в рассматриваемой точке режущей кромки и нормалью в той же точке к поверхности резания. Передний угол на чертежах сверла не проставляют, так как положение и форму передней поверхности сверла определяет угол наклона винтовой канавки. Так как угол наклона винтовой канавки, являющейся передней поверхностью сверла, уменьшается при приближении от периферии к оси сверла, то и передний угол неодинаков для разных точек режущей кромки. Чем ближе рассматриваемая точка к оси сверла, тем меньше этот угол. На наружном диаметре передний угол находится в пределах $\gamma = 25 \dots 30^\circ$. Соотношение передних углов, измеренных в главной секущей плоскости и в продольном сечении, у сверла такое же, как и у резца:

$$\operatorname{tg} \gamma = \operatorname{tg} \gamma_{\text{пр}} / \sin \varphi,$$

где $\gamma_{\text{пр}} = \omega$.

Следовательно, на периферии сверла $\operatorname{tg} \gamma = \operatorname{tg} \omega / \sin \varphi$, а для любой точки режущей кромки:

$$\operatorname{tg} \gamma_x = \operatorname{tg} \omega_x / \sin \varphi = D_x \operatorname{tg} \omega / D \sin \varphi.$$

Если передний угол образуется при изготовлении сверла, то задний получают при его заточке.

Задним углом сверла α называется угол между касательной к задней поверхности в рассматриваемой точке режущей кромки и плоскостью резания.

Траектории точек режущих кромок располагаются на воображаемых цилиндрических поверхностях с осями, совпадающими с осью сверла. На этих поверхностях и рассматривают главные задние углы сверла. Таким образом, главным задним углом является продольный задний угол (рис. 2.6).

Если сверло только вращается, то траектория точки режущей кромки — окружность. Так как сверло имеет подачу вдоль оси, то траектория точки режущей кром-

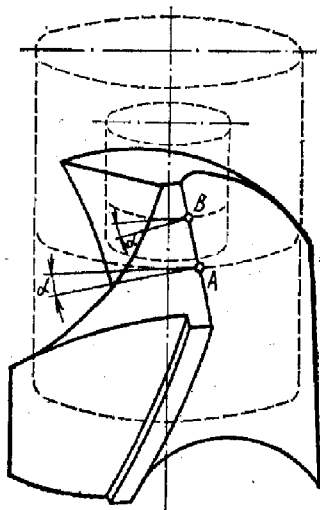


Рис. 2.6. Образование заднего угла на кромке сверла в цилиндрических сечениях

ки — винтовая, и действительный задний угол будет меньше статического. Развернем на плоскость траекторию точки режущей кромки при отсутствии подачи и при работе с подачей (рис. 2.7).

Кинематический задний угол уменьшается на угол η . Величина угла η различная для разных точек режущей кромки (рис. 2.7):

$$\operatorname{tg} \eta = S_0 / \pi D; \alpha_k = \alpha - \eta.$$

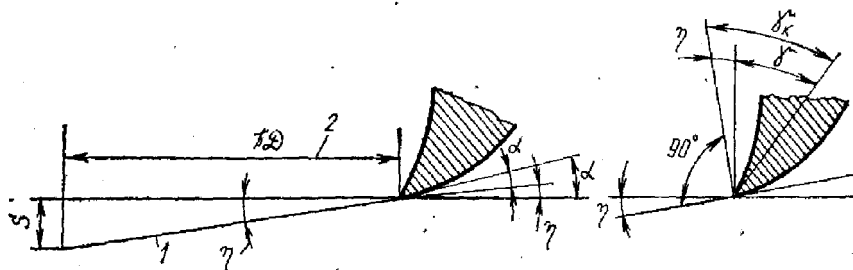


Рис. 2.7. Передний и задний углы сверла в процессе резания:

1 — развернутая винтовая линия; 2 — развернутая окружность

Чем ближе точка режущей кромки лежит к оси сверла, тем меньше диаметр воображаемой цилиндрической поверхности, по которой идет траектория точки режущей кромки, и тем значительно уменьшается задний угол сверла в процессе работы. Уменьшение зазора между задней поверхностью сверла и поверхностью резания (заднего угла) или отсутствие его приводит к повышенному трению и износу или же делает дальнейшую работу сверла невозможной.

Даже при малых подачах уменьшение заднего угла в процессе работы для точек, находящихся вблизи оси сверла, весьма существенно. Это уменьшение компенсируют, соответственно увеличивая задний угол при заточке: $\alpha_{\text{зат}} = \alpha + \eta$. Если заднюю поверхность сверла заточить по плоскости с одинаковым задним углом во всех точках режущей кромки, учитывающим максимальное уменьшение его в процессе работы $\alpha_{\text{зат}} = \alpha + \eta_{\text{max}}$, то процесс заточки упрощается. Но у сверла изменить (уменьшить) передний угол невозможно, а на периферии величина его значительна. Поэтому при больших задних углах угол заострения сверла β на периферии будет малым, а прочность и теплоотвод — низкими.

В связи с этим при заточке приходится обеспечивать

такое увеличение заднего угла, которое необходимо для каждой точки режущей кромки, т. е. затачивать задний угол переменной величины. Наибольшее значение задний угол должен иметь у оси сверла, наименьшее — на периферии. При этом обеспечивается примерное равенство углов заострения вдоль режущей кромки сверла. На чертежах задний угол сверла задают в периферийной точке режущей кромки, так как здесь его легче измерить.

Вспомогательный задний угол сверла α_1 измеряется в плоскости, нормальной к вспомогательной режущей кромке (кромке ленточки). Так как ленточка шлифуется по окружности, то вспомогательные задние углы сверла α_1 равны нулю (см. рис. 2.4).

Углом наклона главной режущей кромки λ называется угол между режущей кромкой и радиусом, проведенным через точку режущей кромки (см. рис. 2.4).

Пересечение главных задних поверхностей образует поперечную кромку или перемычку. *Угол наклона перемычки* ψ — угол между проекциями поперечной и главной режущей кромки на плоскость, перпендикулярную оси сверла (см. рис. 2.4). Величина этого угла при правильной заточке сверла $\psi = 50 \dots 55^\circ$.

Пересекая перемычку перпендикулярными к ней секущими плоскостями, можно видеть, что угол резания перемычки больше 90° , т. е. передний угол перемычки γ_n — отрицательный: перемычка не режет металл, а скоблит его (выдавливает). Из-за этого около 65 % усилия подачи и около 15 % крутящего момента приходится на перемычку. На практике применяют различные методы подточки перемычки. Даже небольшое улучшение формы перемычки значительно уменьшает силу резания и увеличивает стойкость сверла и точность обработки.

Методика выполнения работы

Лабораторное оборудование: сверло с винтовыми канавками, угломер универсальный, микрометр со специальными наконечниками, штангенциркуль, линейка масштабная, установка для измерения заднего угла, инструментальный микроскоп с приспособлениями.

При проведении работы требуется: выполнить эскиз сверла в проекциях с необходимыми сечениями, на которых показать буквами размеры и обозначить все углы сверла; измерить конструктивные параметры сверла и

занести в протокол 1; определить углы ω , ϕ , λ , φ , φ_1 ; произвести расчет передних углов для трех точек режущей кромки (на наружном диаметре, на диаметре, немного превышающем размер сердцевины сверла и на одной промежуточной точке). Результаты занести в протокол 1. Установить закономерность изменения передних углов сверла.

Измерить задние углы в нескольких точках режущей кромки, а результаты занести в протокол 2. Установить закономерность изменения задних углов сверла и причины необходимости такой заточки задней поверхности сверла.

Измерение конструктивных и геометрических параметров сверл с винтовыми канавками

Диаметр сверл измеряется обычным микрометром (рис. 2.8); диаметр сердцевины сверла — микрометром с острыми наконечниками (рис. 2.9); длина поперечной

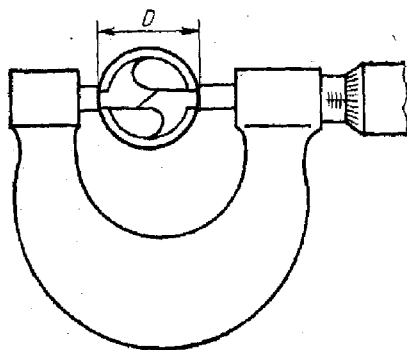


Рис. 2.8. Измерение диаметра сверла микрометром

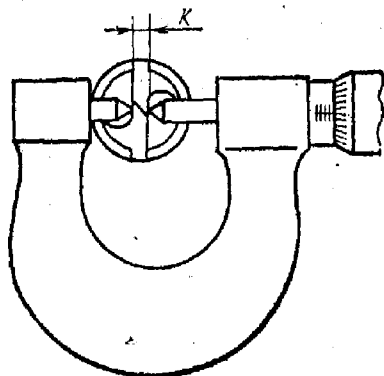


Рис. 2.9. Измерение диаметра сердцевины сверла микрометром с острыми наконечниками

кромки сверла и ширина ленточки — штангенциркулем у вершины сверла (рис. 2.10); угол наклона поперечной кромки ϕ — универсальным угломером УМ (рис. 2.11); угол наклона винтовой канавки сверла ω можно измерить с помощью угломера МИЗ (рис. 2.12), на плиту которого поставлена призма. Режущую кромку в этом случае следует располагать в горизонтальной плоскости. С помощью универсального угломера можно определить угол 2ϕ (рис. 2.13), но контролировать заточку сверла

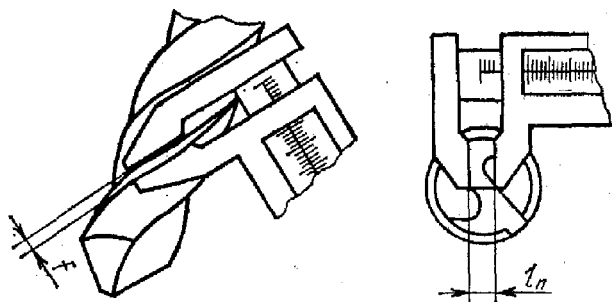


Рис. 2.10. Измерение длины поперечной кромки и ширины ленточки сверла штангенциркулем

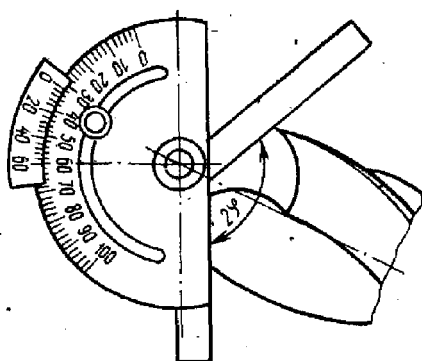


Рис. 2.11. Измерение угла при вершине сверла универсальным угломером УМ

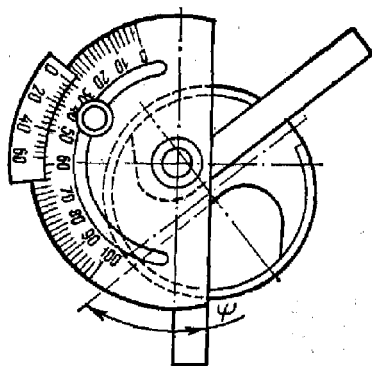


Рис. 2.13. Измерение угла наклона поперечной кромки сверла универсальным угломером УМ

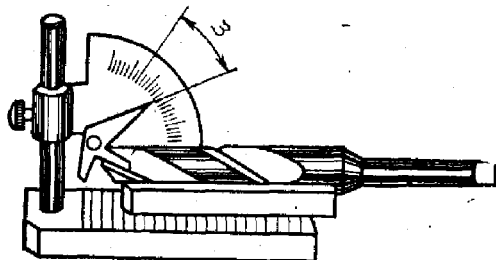


Рис. 2.12. Измерение угла наклона винтовой канавки сверла на угломере МИЗ

таким образом нельзя, так как перья сверла могут быть заточены неодинаково, и углы ϕ на разных перьях могут различаться, что ухудшит условия работы сверла и уменьшит его стойкость. Поэтому контроль углов ϕ осуществляют с помощью специальной луны или микроскопа.

Вспомогательный угол в плане φ_1 , можно определить по формуле

$$\varphi_1 = \operatorname{arctg} \frac{D_1 - D_2}{2l},$$

где D_1 и D_2 — диаметры сверла, измеренные на расстоянии l . Для упрощения значение l принимают равным 100 мм.

Передний угол сверла γ определяется в плоскости, перпендикулярной к режущей кромке сверла. Так как угол ω — это продольный передний угол сверла (в плос-

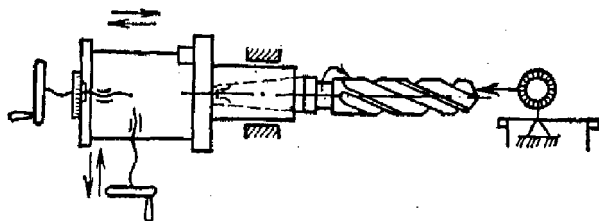


Рис. 2.14. Схема измерения заднего угла сверла координатным методом

кости, параллельной его оси), то угол γ можно подсчитать по формуле

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

где ω — угол наклона винтовой канавки сверла; φ — угол в плане режущей кромки сверла; D — наружный диаметр сверла; D_x — диаметр, соответствующий рассматриваемой точке режущей кромки сверла.

Задний угол сверла α в разных точках режущей кромки можно измерить специальным прибором. При отсутствии такого прибора сверло устанавливается в делительную головку, закрепленную на столе фрезерного или универсального заточного станка. На станине станка укрепляется державка с индикатором, ножка которого должна быть параллельна оси сверла, и перемещают стол станка таким образом, чтобы ось сверла и ось ножки индикатора совпали. После этого сдвигают стол станка со сверлом в горизонтальной плоскости в направлении, перпендикулярном оси сверла на величину радиуса сверла, соответствующего рассматриваемой точке на режущей кромке (рис. 2.14). Затем, перемещая стол в направлении параллельном оси сверла, устанавливают натяг ножки индикатора. Наконечник индикатора при этом должен быть

установлен поворотом сверла в точку, возможно более близкую к режущей кромке. В таком положении стрелка индикатора должна быть поставлена на нуль. После этого поворачивают сверло, вращая шпиндель делительной головки. При этом наконечник индикатора скользит по

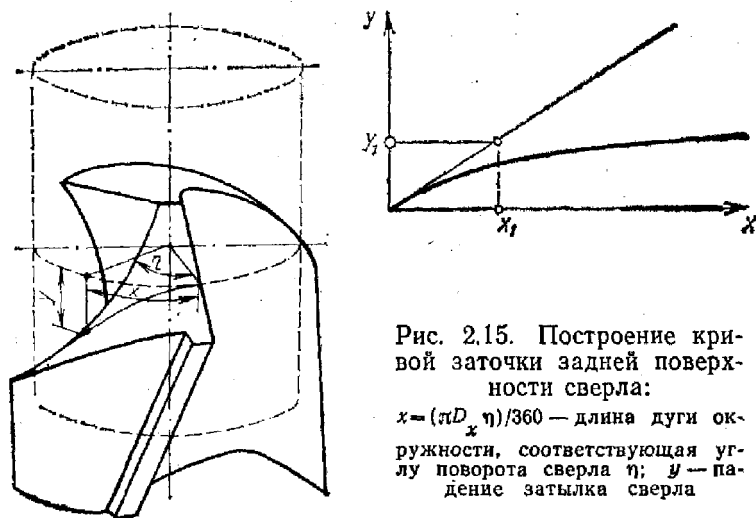


Рис. 2.15. Построение кривой заточки задней поверхности сверла:

$x = (\pi D_x \eta) / 360$ — длина дуги окружности, соответствующая углу поворота сверла η ; y — падение затылка сверла

задней поверхности сверла, показывая величину ее падения. Замечают показания индикатора, соответствующие повороту сверла на каждые 5° . Затем строят кривую заточки задней поверхности сверла, соответствующую рассматриваемой точке режущей кромки (рис. 2.15).

К кривой проводится касательная, по наклону которой можно определить задний угол:

$$\operatorname{tg} \alpha = y/x.$$

Такие кривые строятся для разных точек режущей кромки $D_x = 10$ мм; $D_x = 20$ мм; $D_x = 30$ мм; $D_x = 40$ мм; $D_x = 50$ мм (рис. 2.16).

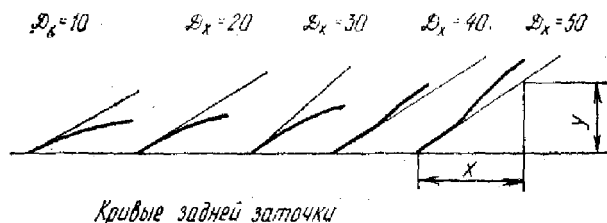


Рис. 2.16. Кривые заточки задней поверхности сверла в разных точках режущей кромки

Задний угол сверла можно также измерить на микроскопе.

Устройство микроскопа БМИ. На основании 15 расположен измерительный стол 2 с предметным стеклянным столиком 3 и колонка 14 с тубусом 6 (рис. 2.17). В нижней части тубуса установлен объектив 5. В комплекте имеются объективы с увеличениями $\times 1$, $\times 1,5$, $\times 3$, $\times 5$. В верхней части тубуса установлена окулярная головка 11

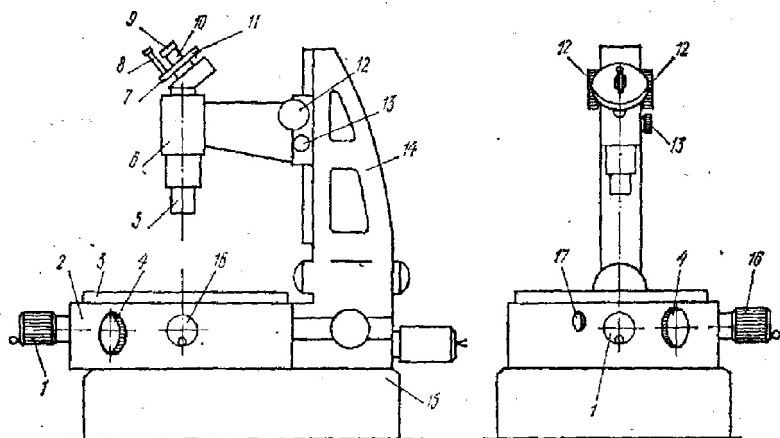


Рис. 2.17. Большой инструментальный микроскоп БМИ

11 с увеличением $\times 10$. Кронштейн, соединяющий тубус с колонной 14, имеет паз в виде ласточкиного хвоста, скользящий по направляющим колонны. Он перемещается с помощью рукояток 12 с последующим зажимом рукояткой 13.

Измерительный стол 2 по осям координат перемещается с помощью барабанов 1 и 16 с ценой деления 0,005 мм. Кроме того, столик 3 вращается вокруг оси с помощью рукоятки 4 с последующим зажимом тормозной рукояткой 17. Окулярная головка 11 имеет два окуляра: 10 — для измерения линейных перемещений и 8 — для угловых перемещений. Окуляр 10 заканчивается глазной лупой 9, имеющей диоптрийную наводку на резкость. В лупе 9 оптическая схема микроскопа обеспечивает наблюдение штриховой сетки с крестом, предназначенной для фиксирования линий или точек на измеряемой детали. В окуляр 8 с помощью зеркальца 7 проектируется градусная шкала. В лупе на стекле нанесена минутная шкала 18 с ценой деления 1'. Перемещается

градусная шкала с помощью маховичка 19 (рис. 2.18).

При работе на микроскопе БМИ деталь устанавливают на предметном столике и освещают достаточно ярким светом. На резкость он наводится рукоятками 12, 13 и глазной лупой 9. При измерении линейных величин перекрестие устанавливают в начальную точку отсчета. На шкале 18 в этом случае должен быть зафиксирован 0. Вращая барабаны 1, 16 перекрестие перемещают в ко-

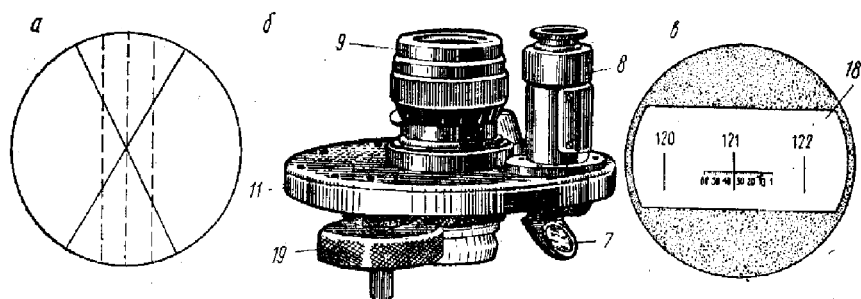


Рис. 2.18. Окулярная головка микроскопа:

а — поле зрения при измерении линейных величин; *б* — внешний вид головки; *в* — поле зрения при измерении угловых величин

нечную точку отсчета. Измеряемый размер определяют как разность начального и конечного значений на соответствующей шкале.

Для определения угловых величин центр перекрестия совмещают с вершиной измеряемого угла. Вертикальную или горизонтальную ось перекрестия устанавливают в начальное положение и фиксируют показание шкалы 18 (на рис. 2.18 показание шкалы 18 равно $121^{\circ} 34'$). После этого вращением маховичка 19 перемещают соответствующую ось в конечное угловое положение и вновь фиксируют показание шкалы 18. Величина угла определяется как разность начального и конечного показаний.

Измерение геометрических параметров сверла на микроскопе БМИ

Измерение диаметра сверла и величины обратной конусности. Перед измерением сверло устанавливают в призме, повернув его так, чтобы главная режущая кромка была расположена горизонтально (рис. 2.19, *а*). При этом на шкале 18 должен быть зафиксирован 0, а перекрестие и сверло устанавливают друг относительно друга

так, чтобы горизонтальная ось $X-X$ касалась бы уголка сверла (рис. 2.19,б). Затем с помощью барабана 1 смещают перекрестие на диаметрально противоположную точку сверла (рис. 2.19,в). Диаметр сверла D определяется как разность отсчетов по шкале барабана 1.

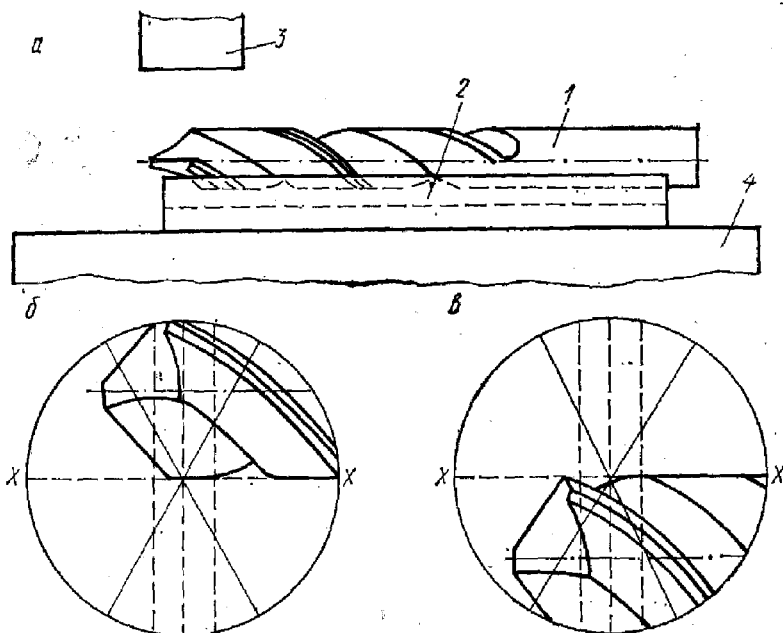


Рис. 2.19. Схема измерения диаметра сверла и величины обратной конусности на микроскопе БМИ:

1 — сверло; 2 — призма; 3 — объектив; 4 — стеклянный столик

Для определения обратной конусности указанные выше диаметры измеряют на уголках сверла и при смещении перекрестия вдоль оси сверла на величину $L=25; 50; 100$ мм.

Смещение осуществляют, подкладывая концевые меры соответствующей длины под микровинт барабана 16. Обратную конусность (мм/100 мм) можно определить по формуле

$$\Delta = (D - D_L) / 200.$$

Измерение угла в плане φ . Для измерения углов в плане φ для каждой из режущих кромок сверло устанавливают в призме так, чтобы главная режущая кромка была расположена горизонтально. На шкале 18 должен

быть зафиксирован 0, а горизонтальная ось перекрестия $X—X$ должна быть параллельна оси сверла. Для этого устанавливают призму на столике 3 таким образом, чтобы ось $X—X$ совпадала с образующей призмы $A—A$ (рис. 2.20,а).

Перед измерением перекрестие устанавливают на уголок сверла (рис. 2.20,б), после чего вращая маховичок

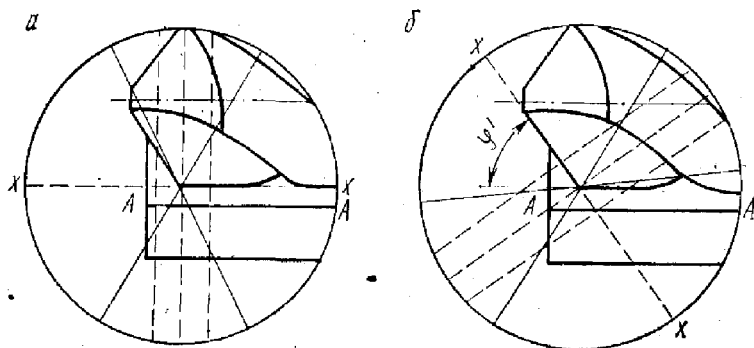


Рис. 2.20. Измерение угла сверла в плане на микроскопе БМИ

19, совмещаем ось $X—X$ с главной режущей кромкой. По шкале 18 находим величину угла режущей части φ' .

Аналогично можно найти и величину угла в плане φ'' второй режущей кромки. Угол при вершине сверла $2\varphi = \varphi' + \varphi''$.

Измерение заднего угла и угла наклона винтовой канавки. Для измерения углов α и ω сверло устанавливают в призму так, чтобы главная режущая кромка была расположена в вертикальной плоскости. На шкале 18 должен быть зафиксирован 0, а горизонтальная ось перекрестия должна быть параллельна оси сверла (рис. 2.21,а). Перед измерением перекрестие устанавливают на уголок сверла (см. рис. 2.21,а), после чего, вращая маховичок 19, перемещают вертикальную ось перекрестия $Y—Y$ в положение, касательное к задней поверхности (рис. 2.21,б). Величину заднего угла определяют по шкале 18. После этого возвращают вертикальную ось перекрестия в исходное положение и перемещают горизонтальную ось $X—X$ в положение, касательное к ленточке сверла (рис. 2.21,в). По шкале 18 определяют величину угла наклона винтовой канавки ω .

Измерение ширины ленточки сверла. Для измерения

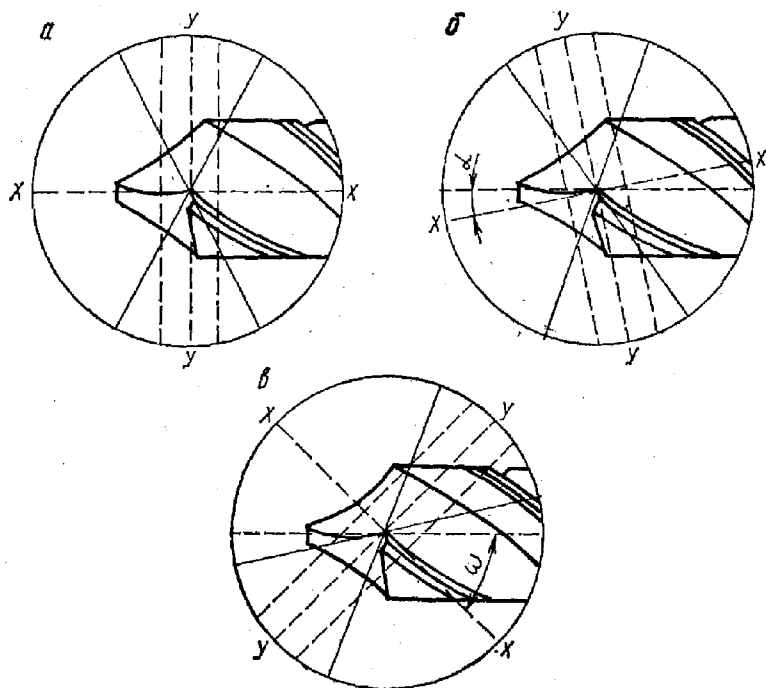


Рис. 2.21. Измерение заднего угла и угла наклона винтовой канавки на микроскопе БМИ

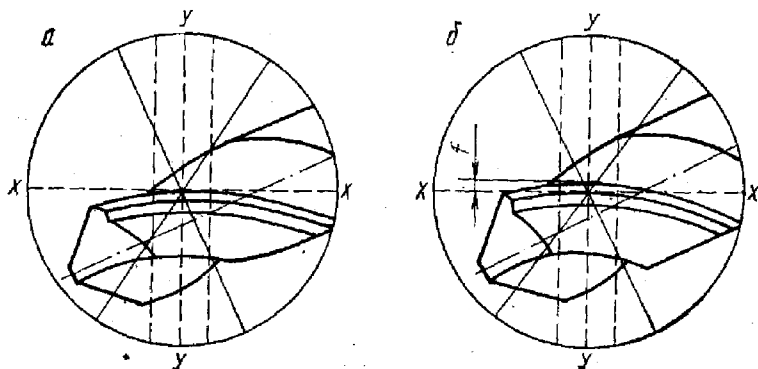


Рис. 2.22. Измерение ширины ленточки сверла на микроскопе БМИ

ширины ленточки сверла f устанавливают 0 на шкале 18 и разворачивают призму со сверлом так, чтобы горизонтальная ось перекрестия $X-X$ была касательной к ленточке в измеряемой точке (рис. 2.22, а). После этого с помощью барабана 1 смещают перекрестие на величину ши-

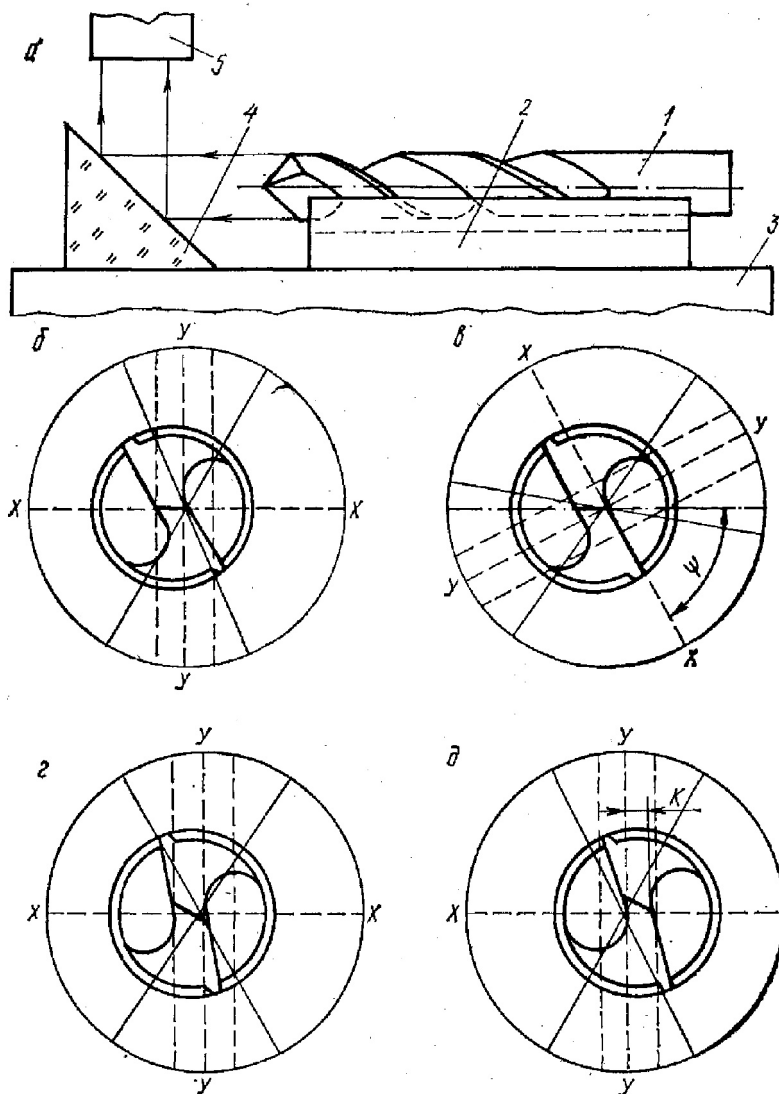


Рис. 2.23. Схема измерения угла наклона поперечной кромки и толщины сердцевинки сверла на микроскопе БМИ:

1 — сверло; 2 — призма; 3 — стеклянный столик; 4 — зеркальная призма; 5 — объектив

рины ленточки (рис. 2.22,б). Значение f определяют как разность отсчетов по шкале барабана 1.

Измерение угла наклона поперечной режущей кромки и толщины сердцевинки. Для измерения угла наклона поперечной режущей кромки ψ сверло устанавливают в

Результаты измерений заднего угла

Номер измерения	Диаметр сверла D , мм	Диаметр сверла D_x на котором производится измерение, мм	Угол поворота сверла при измерении, град.	Показание индикатора, мм	$\operatorname{tg} \alpha$	Измеренный задний угол α , град.

Лабораторная работа 3

ГЕОМЕТРИЯ РАБОЧЕЙ ЧАСТИ ФРЕЗЫ

Цель работы. Закрепление сведений об основных частях и элементах различных видов фрез, их геометрических параметрах, элементах режима резания и срезаемого слоя. Ознакомление с методами измерения геометрических параметров фрез и приборами, применяемыми для этой цели. Приобретение навыков эскизирования цилиндрических и торцевых фрез.

Вопросы для самоконтроля. 1. Типы фрез. 2. Элементы режима резания при фрезеровании. 3. Элементы сечения срезаемого слоя при фрезеровании (ширина, толщина, угол контакта, площадь поперечного сечения). 4. Геометрические параметры цилиндрической фрезы. 5. Геометрические параметры торцевой фрезы. 6. Измерение углов фрез угломером Бабчиничера (2УРИ). 7. Измерение углов ω и λ универсальным и маятниковым угломерами. 8. Измерение углов фрез методом координат.

Краткие теоретические сведения

Основные типы фрез. Фреза — многолезвийный инструмент, применяемый для обработки плоскостей, пазов, шлицев, тел вращения, резьбы, фасонных поверхностей, разрезки. Одновременное участие в работе нескольких зубьев обеспечивает высокую производительность обработки.

Фреза представляет собой тело вращения, на образующей поверхности которого или на торце имеются режущие зубья (рис. 3.1).

Несмотря на многообразие фрез схема их работы со-

ответствует цилиндрическому или торцевому фрезерованию (рис. 3.2). При цилиндрическом фрезеровании ось фрезы параллельна обрабатываемой поверхности, работа производится зубьями, расположенными на цилиндрической поверхности фрезы. При торцевом фрезеровании ось фрезы перпендикулярна обработанной поверхности.

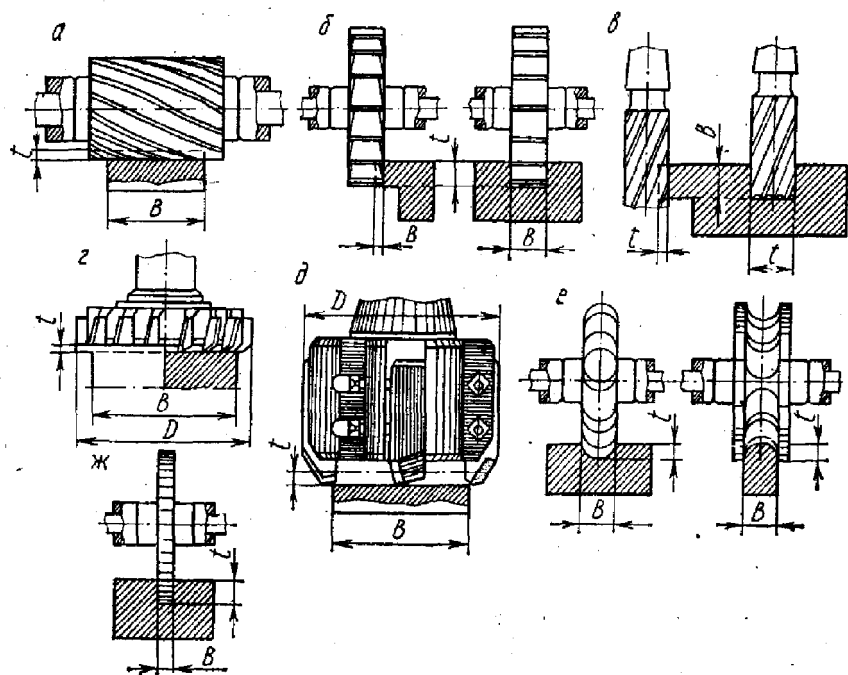


Рис. 3.1: Типы фрез:

а — цилиндрическая; б — дисковая и пазовая; в — концевые; г, д — торцевые; е — фасонная; ж — прорезная

сти, и кроме зубьев, расположенных на цилиндрической поверхности, работают зубья, имеющиеся на торцевой поверхности.

Элементы режима резания и срезаемого слоя. Главное движение при фрезеровании — вращение фрезы. Движение подачи — поступательное или вращательное перемещение заготовки.

Скорость резания v (м/мин) — окружная скорость наиболее удаленной от оси вращения точки режущей кромки фрезы:

$$v = \pi D n / 1000,$$

где D — диаметр фрезы, мм; n — частота вращения фрезы, об/мин.

Подача S — величина перемещения обрабатываемой заготовки относительно фрезы. Подача у обычных фрезерных станков бывает горизонтальная и вертикальная. Различают три вида подачи: подача на один зуб фрезы —

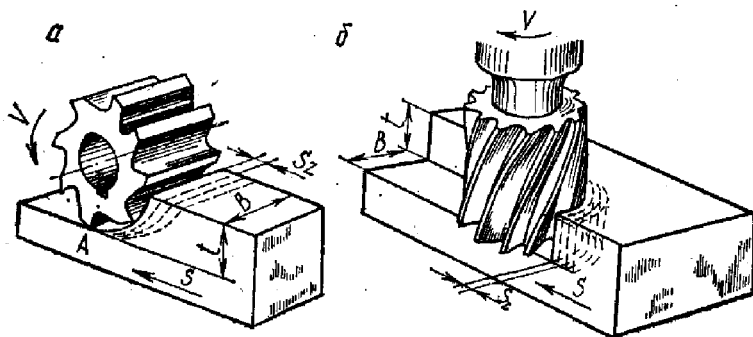


Рис. 3.2. Виды фрезерования:
а — цилиндрическое; б — торцевое

S_z , подача на один оборот фрезы S_o и минутная подача S_m . Между ними существует соотношение

$$S_m = S_o n = S_z z n,$$

где z — число зубьев фрезы.

Глубиной резания t называется расстояние между обрабатываемой и обработанной поверхностями, измеренное перпендикулярно последней (см. рис. 3.1 и 3.2).

Ширина фрезерования B — ширина обрабатываемой поверхности в направлении, параллельном оси фрезы. У цилиндрических фрез ширина фрезерования совпадает с шириной обрабатываемой заготовки, у дисковых фрез — с шириной паза, у торцевых и концевых фрез — с глубиной срезаемого слоя (см. рис. 3.1 и 3.2). *Ширина среза b* — длина стороны сечения срезаемого слоя, образованной поверхностью резания. Для прямозубой фрезы $b=B$, для цилиндрической фрезы с винтовыми зубьями b является переменной величиной. Для торцевых фрез

$$b = B / \sin \varphi \cos \lambda,$$

где φ — угол в плане режущей кромки зуба торцевой фрезы; λ — угол наклона режущей кромки.

Траекторией относительного рабочего движения точки режущей кромки фрезы является удлиненная циклоида. При используемых отношениях скорости движения детали к скорости вращения фрезы, дуга циклоиды мало отличается от дуги окружности. Для упрощения математического описания размеров срезаемого слоя при фрезеровании дугу циклоиды можно заменить дугой окружности с диаметром, равным диаметру фрезы. Ошибка не будет превышать 1 %.

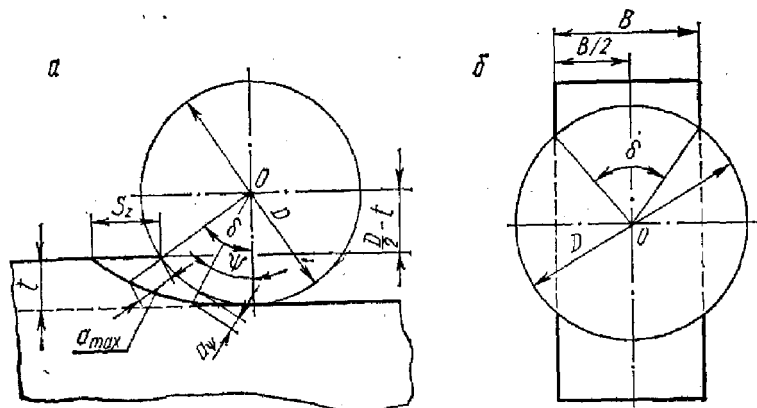


Рис. 3.3. Угол контакта при фрезеровании:
а — цилиндрической фрезой; б — торцевой фрезой

Угол контакта фрезы δ — центральный угол, соответствующий дуге контакта фрезы с заготовкой (рис. 3.3). Различают также мгновенный угол контакта ψ — центральный угол между радиусом, проведенным в начальную точку касания зуба фрезы с заготовкой, и радиусом, проведенным в точку мгновенного положения зуба.

Для цилиндрических, концевых, дисковых и фасонных фрез $\cos \delta = 1 - (2t/D)$. Для торцевых фрез при симметричном резании $\sin \delta = B/D$.

Толщина среза a — длина нормали к поверхности резания, проведенной через рассматриваемую точку режущей кромки, ограниченная сечением срезаемого слоя (рис. 3.4). Величина a переменна. Максимальная толщина слоя, срезаемого зубом фрезы, $a_{\max} = S_z \sin \delta$, минимальная — $a_{\min} = 0$. Толщина срезаемого слоя для мгновенного положения данного зуба фрезы

$$a = S_z \sin \psi.$$

При фрезеровании используют понятия о средней и срединной толщине срезаемого слоя. Средняя толщина среза $a_{ср} = \frac{a_{\max} + a_{\min}}{2} = \frac{a_{\max}}{2}$. Срединная толщина среза, соответствующая углу контакта $\delta/2$, равна: $a_{ср\text{ед}} = S_z \sin \delta/2 = S_z \sqrt{\frac{t}{D}}$. Для торцевых фрез $a_{\max} = S_z \sin \delta$.

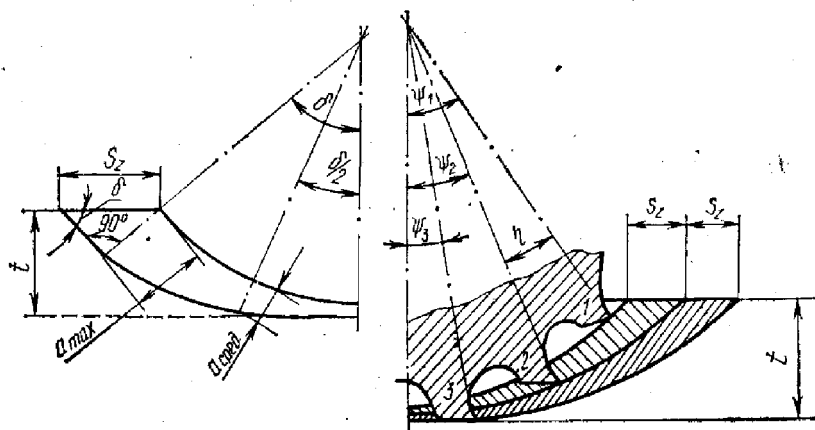


Рис. 3.4. Расчетная схема для определения толщины срезаемого слоя и суммарной площади поперечного сечения среза

Площадь поперечного сечения среза, снимаемая одним зубом цилиндрической фрезы с прямыми зубьями, $f = Ba$. Она меняется, как и толщина среза, от нуля до максимума (рис. 3.5):

$$f_{\max} = Ba_{\max} = BS_z \sin \delta = 2BS_z \sqrt{\frac{t}{D} - \frac{t^2}{D^2}}.$$

При фрезеровании в работе участвуют одновременно несколько зубьев. Поэтому вводится понятие о суммарной площади поперечного сечения среза. Для ее определения необходимо знать, сколько зубьев одновременно находятся в работе и каков мгновенный угол контакта для каждого работающего зуба.

Количество зубьев фрезы, находящихся одновременно в работе:

$$m = \delta / \eta = \delta z / 360^\circ,$$

где δ — полный угол контакта фрезы с заготовкой; η — центральный угол между двумя соседними зубьями фрезы $\eta = 360^\circ / z$; z — число зубьев фрезы.

Значение m округляется до ближайшего большего целого числа. Если $1 < m < 2$, то одновременно в работе находится два зуба, если $2 < m < 3$, то три зуба и т. д. Число одновременно работающих зубьев тем больше, чем больше t и z и меньше D .

Мгновенные углы контакта для работающих зубьев фрезы имеют следующие значения (см. рис. 3.4, 3.5):

$$\psi_1 = \delta; \quad \psi_2 = \delta - \eta; \quad \psi_3 = \delta - 2\eta \text{ и т. д.};$$

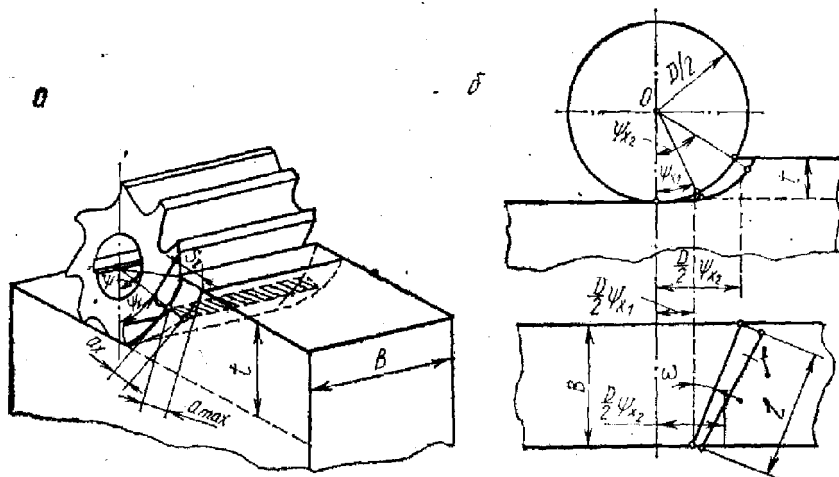


Рис. 3.5. Сечение срезаемого слоя при фрезеровании:
а — фрезой с прямыми зубьями; б — фрезой с винтовыми зубьями

так как для каждого зуба площадь поперечного сечения среза равна: $f = BS_z \sin \psi$, то суммарная площадь поперечного сечения среза, снимаемого прямозубой фрезой будет равна:

$$\begin{aligned} F &= \sum_{i=1}^m f_i = BS_z (\sin \psi_1 + \sin \psi_2 + \sin \psi_3 + \dots + \sin \psi_m) = \\ &= F = BS_z \sum_{i=1}^m \sin \psi_i. \end{aligned}$$

Толщина среза для фрезы с винтовыми зубьями подсчитывается так же, как и для фрезы с прямыми зубьями: $a = S_z \sin \psi$. Но эта толщина переменная не только вдоль дуги контакта (в плоскости, перпендикулярной к оси фрезы), но и вдоль длины режущей кромки зуба, так как

вследствие винтового расположения этой кромки мгновенные углы контакта для разных ее точек различны (см. рис. 3.5).

Поперечное сечение слоя, срезаемого винтовым зубом фрезы, равно:

$$f = \frac{D}{2} \frac{S_z}{\sin \omega} (\cos \psi_1 - \cos \psi_2).$$

Суммарное сечение слоя, срезаемого всеми одновременно работающими винтовыми зубьями фрезы, равно:

$$F = \sum_{i=1}^m f_i = \frac{D}{2} \frac{S_z}{\sin \omega} \sum_{i=1}^m (\cos \psi_{1i} - \cos \psi_{2i}),$$

где ψ_{1i} и ψ_{2i} — углы контакта двух крайних точек i -й винтовой режущей кромки, участвующих в работе; ω — угол наклона винтовой канавки фрезы.

Геометрические параметры цилиндрической фрезы. Цилиндрическая фреза представляет собой цилиндрическое тело, на поверхности которого в продольном направлении прорезаны канавки для размещения стружки. Пересечение канавки с цилиндрической поверхностью образует режущие кромки. Для более плавной работы фрезы и для увеличения числа одновременно работающих зубьев стружечные канавки делают винтовыми.

Цилиндрическая фреза работает в условиях свободного резания, на каждом ее зубе имеется одна режущая кромка.

Часть стружечной канавки у режущей кромки является передней поверхностью, а поверхность цилиндра — задней. Зуб фрезы может быть остроконечным или затылованным (рис. 3.6).

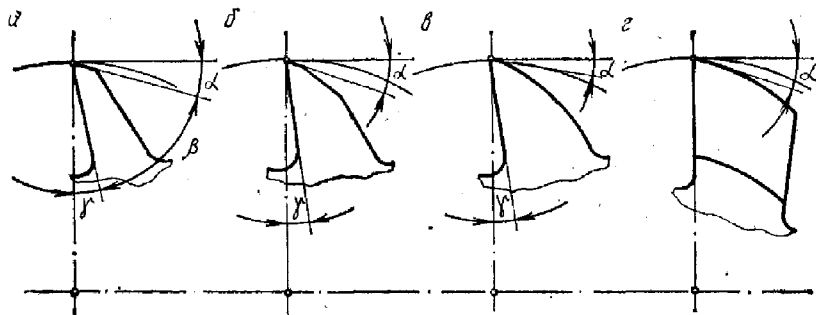


Рис. 3.6. Формы зубьев фрезы:
а, б, в — остроконечная; г — затылованная

Острозаточенные зубья фрез перетачиваются по задней поверхности. Спинка зуба может быть выполнена по прямой, ломаной или по параболе. Каждый режущий зуб имеет такие же элементы и углы, как резец. Нередко это и есть резцы, закрепляемые в корпусе фрезы (см. рис. 3.1, б).

Главный передний угол γ — угол между передней поверхностью и основной плоскостью, проходящей через ось фрезы и рассматриваемую точку режущей кромки.

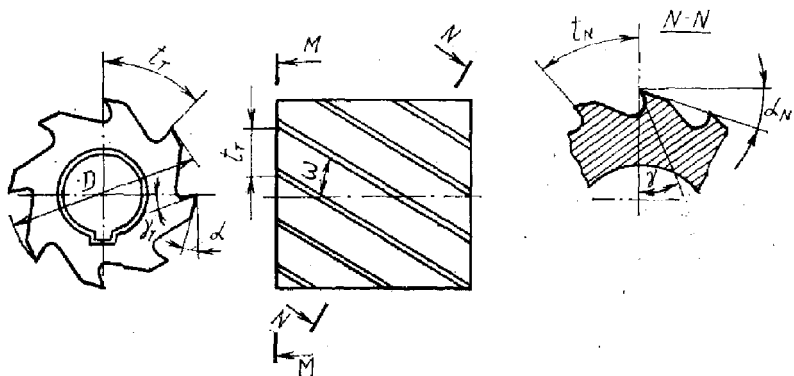


Рис. 3.7. Геометрические параметры режущей части цилиндрической фрезы

Этот угол обеспечивает сход стружки по передней поверхности и измеряется в плоскости, перпендикулярной режущей кромке ($N - N$). В этой же плоскости измеряют задний угол α_N (рис. 3.7).

Главный задний угол α — угол между касательной к задней поверхности фрезы и плоскостью резания. Траектория движения рассматриваемой точки режущей кромки, определяющая положение плоскости резания, приписывается за дугу окружности, поэтому главный угол измеряется в плоскости, перпендикулярной к оси фрезы ($M - M$). В этой плоскости измеряется передний угол γ_T . Если фреза с винтовыми зубьями, то режущие кромки являются винтовыми линиями. Угол их наклона к оси фрезы называют углом наклона винтовой канавки ϕ .

У фрез рассматривают:

окружной шаг фрезы t_T в торцевой плоскости (длина дуги по торцу фрезы между двумя соседними зубьями):

$$t_T = \pi D / z,$$

где D — диаметр фрезы; z — число зубьев фрезы;

шаг зубьев фрезы в нормальном сечении:

$$t_N = t_T \cos \omega;$$

осевой шаг зубьев фрезы:

$$t_o = t_T \operatorname{ctg} \omega = (\pi D / z) \operatorname{ctg} \omega;$$

шаг винтовой канавки зуба фрезы:

$$H = \pi D \operatorname{ctg} \omega.$$

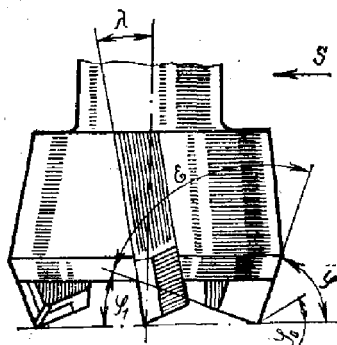


Рис. 3.8. Углы в плане торцевой фрезы

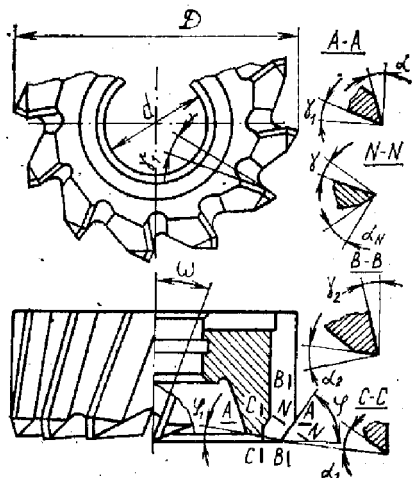


Рис. 3.9. Геометрические параметры режущей части торцевой фрезы

При проектировании инструмента второго порядка и при изготовлении шаблонов для контроля фрез все размеры задаются в плоскости торца фрезы ($M-M$). Чтобы перейти от величин углов, измеренных в торцевой плоскости, к величинам углов в нормальной плоскости, используют соотношения:

$$\operatorname{tg} \alpha_N = \operatorname{tg} \alpha / \cos \omega; \quad \operatorname{tg} \gamma = \operatorname{tg} \gamma_T \cos \omega.$$

Геометрические параметры торцевой фрезы. У торцевых фрез зубья подобны проходным резцам. В резании, кроме главной, участвует вспомогательная режущая кромка. Зуб фрезы имеет углы в плане ϕ , ϕ_1 , γ (рис. 3.8).

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

Вспомогательный угол в плане ϕ_1 — угол между про-

екцией вспомогательной (торцевой) режущей кромки на основную плоскость и рабочей плоскостью.

У вершины каждого зуба для упрочнения и улучшения условий теплоотвода затачивают переходную режущую кромку под углом $\varphi_0 = \varphi/2$. Главный передний угол γ измеряется в плоскости схода стружки, условно принятой в направлении, перпендикулярном к режущей кромке ($N - N$). Это угол между касательной к передней поверхности зуба фрезы и основной плоскостью (рис. 3.9).

Главный задний угол α измеряется в плоскости, в которой лежит траектория движения точки режущей кромки, т. е. в плоскости, перпендикулярной к оси фрезы ($A - A$) и совпадающей с направлением подачи.

Задний угол α — угол между касательной к задней поверхности зуба фрезы и плоскостью резания.

В главной секущей плоскости $N - N$ измеряют нормальный задний угол α_N :

$$\operatorname{tg} \alpha_N = \operatorname{tg} \alpha \sin \varphi.$$

У торцевых фрез рассматривают также поперечный передний угол γ_1 в плоскости $A - A$ и продольные передний и задний углы фрезы в секущей плоскости $B - B$, параллельной оси фрезы (γ_2, α_2).

Между углами, измеряемыми в различных плоскостях, существует следующая зависимость:

$$\operatorname{tg} \gamma = \operatorname{tg} \gamma_1 \sin \varphi + \operatorname{tg} \gamma_2 \cos \varphi.$$

В сечении $C - C$ измеряется вспомогательный задний угол α_1 .

Методика выполнения работы.

Лабораторное оборудование: цилиндрическая фреза; торцевая фреза; угломеры — 2 шт.; установка для измерения углов фрез методом координат; штангенциркуль.

Выполнить эскиз фрезы в проекциях с необходимыми сечениями. На эскизе показать габаритные размеры и обозначить условно буквами углы фрезы. Измерить углы, и их численную величину записать в таблицу протокола.

Методы измерения фрез

Диаметр и длина фрезы измеряются штангенциркулем и, в редких случаях, микрометром.

Передний и задний углы измеряются *угломером Бабчициера (2УРИ)*.

На дуге 1 угломера закреплена линейка 3, которая опирается на режущую кромку одного из зубьев фрезы (рис. 3.10). По дуге скользит сектор 2, на котором имеется угольник 4 с движущейся продольно линейкой. На

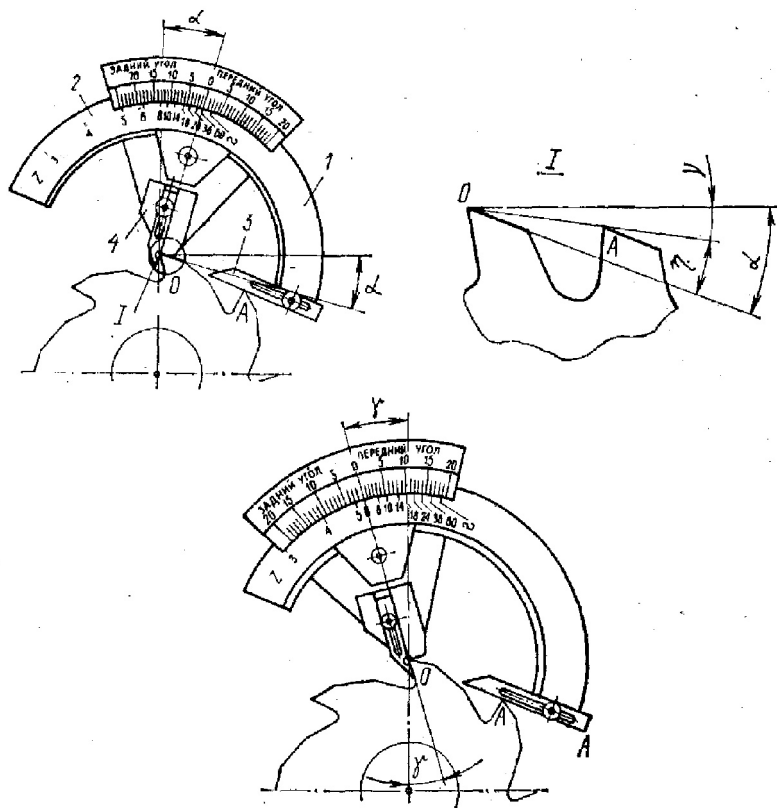


Рис. 3.10. Измерение углов фрезы угломером Бабчициера (2УРИ)

линейку 3 должен опираться зуб фрезы, следующий за измеряемым (точка А). Точка О угольника является центром вращения сектора, скользящего по дуге и лежит на линии линейки А—А. Измеряемый зуб режущей кромкой должен упираться в точку О. Таким образом ОА — хорда. На секторе нанесена шкала в градусах. При совмещении линейки угольника с задней поверхностью измеряемого зуба фрезы угольник вместе с сектором поворачивается на угол η между хордой ОА и зад-

ней поверхностью зуба фрезы, который меньше заднего угла на угол ν , т. е. $\alpha = \eta + \nu$. Для каждого числа зубьев фрезы величина угла ν определенная. Эти углы нанесены на дугу угломера. Поэтому величина заднего угла отсчитывается от риски, которая соответствует числу зубьев фрезы и учитывает поправку на угол ν . При измерении углов торцевых зубьев отсчет производится против риски со знаком ∞ , так как здесь хорда совпадает с касательной и поправка на угол ν не нужна.

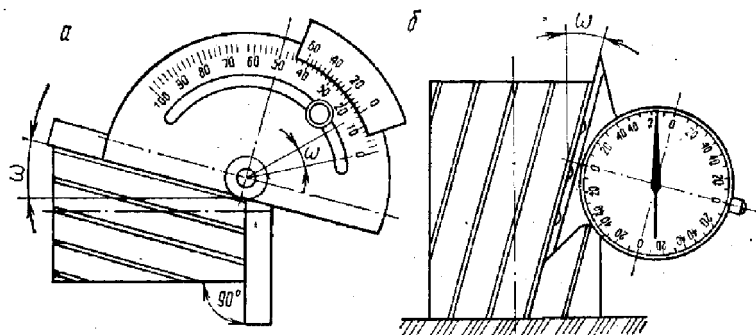


Рис. 3.11. Измерение угла наклона винтовой канавки фрезы универсальным (а) и маятниковым (б) угломерами

Аналогично измеряется передний угол фрезы при совмещении вертикальной грани угольника с передней поверхностью зуба фрезы.

Угол ω измеряется универсальным или маятниковым угломером, как это показано на рис. 3.11.

Измерение геометрических параметров методом координат

Если поверхности инструмента криволинейные или его углы имеют малую величину, то угломеры не обеспечивают необходимую точность измерения. В таком случае пользуются методом координат.

Для этого фрезу закрепляют в центрах станка или приспособления. Точка 1, лежащая на режущей кромке, должна быть на оси центров O (рис. 3.12). В эту точку кромки устанавливают ножки двух индикаторов под углом 90° вертикально и горизонтально. Индикаторы должны иметь натяг 2—3 мм, а стрелки их — стоять на отметке «нуль».

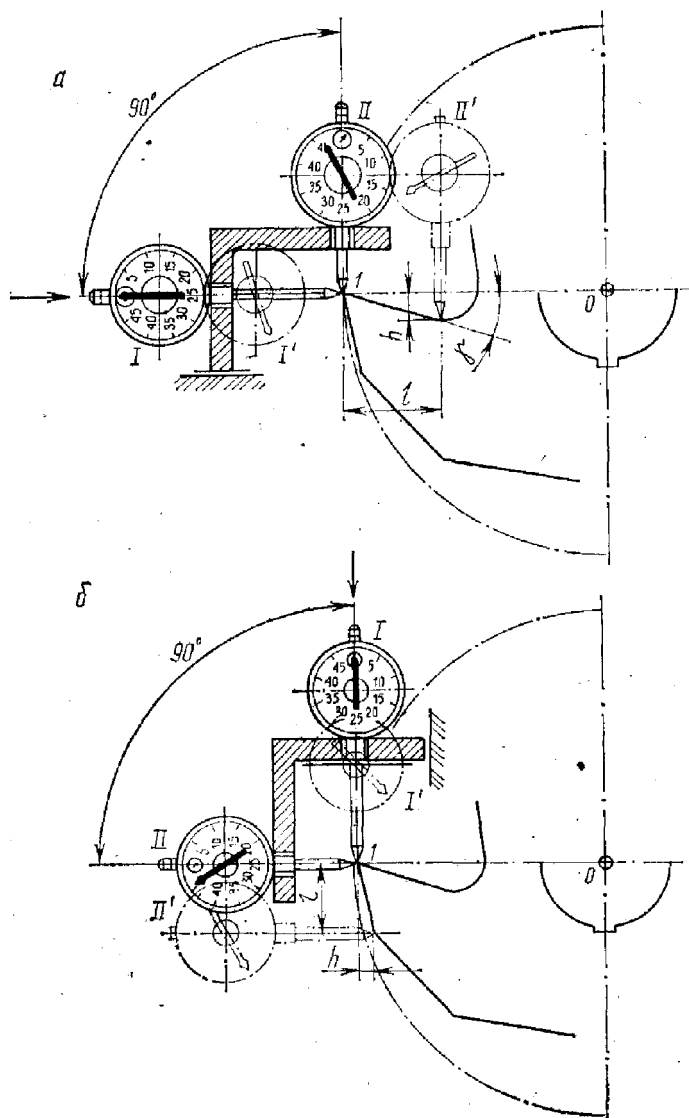


Рис. 3.12. Схема измерения углов фрезы методом координат:
а — переднего угла; б — заднего угла

При перемещении державки с индикаторами в радиальном направлении, как показано стрелкой на рис. 3.12, индикатор I займет положение I' и покажет численное значение пройденного пути l , а индикатор II, переместившись, займет положение II''. Он покажет вертикальное перемещение ножки на величину h .

Зная эти величины можно определить угол γ :
 $\text{tg } \gamma = h/l$.

Величина перемещения индикаторов в радиальном направлении должна составлять примерно 2...3 мм.

Схема измерения заднего угла показана на рис. 3.12. Оправка с индикаторами перемещается вниз вертикально на 2...3 мм. Индикатор *I* покажет величину этого перемещения, а индикатор *II* — падение затылка зуба фрезы. Угол α можно определить по формуле: $\text{tg } \alpha = h/l$.

При измерении угла наклона винтовой режущей кромки ω и угла наклона режущей кромки λ индикаторы перемещаются по длине измеряемой режущей кромки.

Требования к оформлению работы

В отчете необходимо привести эскизы фрез в проекциях с необходимыми сечениями, на которых обозначить буквами размеры и углы; составить таблицу численных значений размеров и углов.

Протокол лабораторной работы 3

Геометрия рабочей части фрезы

Эскиз фрезы

Результаты измерений фрез

Наименование фрезы	Материал режущей части фрезы	Размеры фрезы, мм			Число зубьев фрезы z	Угол наклона винтовой канавки ω , угол наклона режущей кромки λ , град	Шаг винтовой канавки H , мм	Углы фрезы в торцевой плоскости, град			
		D	L или B	t_T				γ_T	α	β_T	δ_T
Вспомогательный задний угол α_1		Углы фрезы в плане			Углы фрезы в главной секущей плоскости						
		φ	φ_1	ϵ	γ	α_N	β_N	δ_N			

ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА УСАДКУ СТРУЖКИ

Цель работы. Ознакомление студентов с методами определения усадки стружки, выявление зависимости усадки стружки от скорости резания и переднего угла инструмента; знакомство с типами стружек, полученных при резании стали.

Вопросы для самоконтроля. 1. Элементы режима резания, их определение. 2. Что называется шириной и толщиной поперечного сечения среза? 3. В чем различие свободного и несвободного, прямоугольного и косоугольного резания? 4. Типы стружек и условия их образования. 5. Процесс образования стружки скалывания, сливной стружки, стружки надлома. 6. Что представляет собой явление усадки и каковы его причины? 7. Что такое коэффициент усадки и что он характеризует? 8. Сущность методов определения коэффициента усадки. 9. Как влияет на коэффициент усадки изменение скорости резания, толщины среза, переднего угла инструмента, применение смазывающе-охлаждающей жидкости, физико-механические свойства обрабатываемого материала? 10. Влияние нароста на процесс резания. 11. Влияние условий резания на наростообразование.

Краткие теоретические сведения

Какой бы вид деформации ни производился, деформируемое тело получает сложное напряженное состояние. Оно имеет место и в процессе резания металла. Внешняя картина процесса резания заключается в следующем: резец, действуя передней плоскостью на срезаемый слой, деформирует его, вследствие этого возникают упругие, затем — пластические деформации, после чего при определенных условиях деформированный элемент слоя отделяется от остальной массы металла. При дальнейшем движении резца описанный процесс будет последовательно повторяться.

В зависимости от свойств обрабатываемого металла, параметров резания, геометрии инструмента и свойств

смазывающе-охлаждающих жидкостей вид получающихся стружек будет различным.

Классификация стружек, получаемых при резании, была дана еще в 1870 г. И. А. Тиме.

Если срезаемые элементы слоя остаются не связанными между собой, то стружку, в случае обработки пластичных металлов, можно назвать элементной (рис. 4.1).

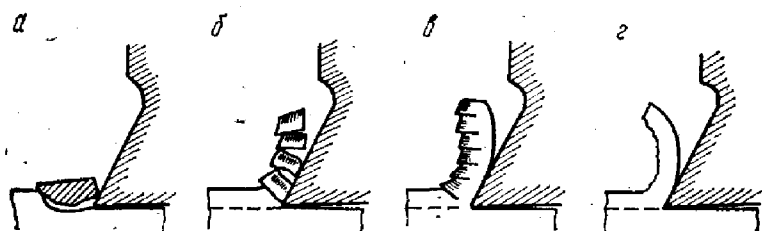


Рис. 4.1. Виды стружек:

а — надлома; б — элементная; в — ступенчатая; г — сливная

Если элементы срезаемого слоя остаются соединенными между собой, образуя сплошную ленту с гладкой наружной стороной, примыкающей к передней поверхности резца, и с внутренней стороной, имеющей ярко выраженные зазубрины или «суставы», то такая стружка называется стружкой скалывания, или суставчатой.

Если же стружка не имеет заметных зазубрин («суставов»), то ее называют сливной.

При обработке хрупких металлов (чугун, бронза) получаются отдельные элементы, не связанные между собой и имеющие в отличие от ранее перечисленных видов стружки шероховатую поверхность, примыкающую к передней поверхности резца. Этот тип стружки И. А. Тиме назвал стружкой надлома, или стружкой отрыва.

При обработке одного и того же металла можно получить все перечисленные виды стружек, так как пластичность и хрупкость являются не свойствами вещества, а лишь его состоянием. Это подтверждается экспериментальными исследованиями, которые показывают, что в процессе стружкообразования все металлы претерпевают пластическую деформацию и что даже при резании чугуна можно получить стружку, в которой элементы не разделены и которая имеет гладкую сторону, прилегающую к резцу.

Вид образовавшейся стружки (ее форма и цвет) дает представление о тех деформациях, которые имели место

при резании металлов, и позволяет судить о качественной стороне протекания процесса резания.

В процессе резания металл сильно деформирован и разогрет, причем температура и степень деформации металла стружки в разных точках зоны резания и подрезцового слоя различны. Поэтому в процессе резания мы имеем дело с металлом, который отличается от того, характеристики которого мы получаем в условиях статических испытаний при малой скорости деформации и комнатной температуре ($HВ$, σ_b , ψ и т. д.). Для характеристики свойств металла в процессе резания, например, при выводе теоретических формул для подсчета сил резания, необходимы коэффициенты, характеризующие свойства металла, которые мы обычно не знаем, и их надо получить при проведении специальных опытов. Одной из таких характеристик является коэффициент усадки стружки. Этот коэффициент фиксирует изменения размеров срезаемого слоя при переходе его в стружку и зависит от деформации срезаемого слоя и трения.

При срезании металла в результате пластического сжатия и сдвигов, происходящих в зернах металла срезаемого слоя, увеличивается толщина стружки по сравнению с толщиной срезаемого слоя. Так как объем металла после деформации практически равен объему до деформации, а ширина стружки изменяется незначительно, то длина стружки становится короче длины срезаемого слоя (пути резца). Это явление называется усадкой стружки, а отношение длины срезаемого слоя к длине стружки — коэффициентом усадки (укорочения) стружки:

$$K_l = l_{\text{ср.сл}} / l_{\text{стр}},$$

где K_l — коэффициент укорочения; $l_{\text{ср.сл}}$ — длина срезаемого слоя; $l_{\text{стр}}$ — длина стружки.

Так как объем стружки и срезаемого слоя одинаков, то коэффициент укорочения равен коэффициенту утолщения стружки, т. е. отношение длин равно отношению площади поперечного сечения стружки к площади поперечного сечения срезаемого слоя:

$$W_{\text{ср.сл}} = W_{\text{стр}};$$

$$l_{\text{ср.сл}} f_{\text{ср.сл}} = l_{\text{стр}} f_{\text{стр}};$$

$$l_{\text{ср.сл}} ab = l_{\text{стр}} a_{\text{стр}} b_{\text{стр}};$$

$$K_l = l_{\text{ср.сл}} / l_{\text{стр}} = f_{\text{стр}} / f_{\text{ср.сл}} = a_{\text{стр}} b_{\text{стр}} / ab,$$

где $W_{\text{ср.сл}}$ — объем срезаемого слоя; $W_{\text{стр}}$ — объем стружки; $f_{\text{ср.сл}}$ — поперечное сечение срезаемого слоя; $f_{\text{стр}}$ — поперечное сечение стружки; $a_{\text{стр}}$, $b_{\text{стр}}$ — толщина и ширина стружки; a , b — толщина и ширина срезаемого слоя.

Так как ширина срезаемого слоя изменяется незначительно, то ее изменением можно пренебречь. С небольшой погрешностью коэффициент усадки (утолщения) определяют как отношение

$$K_a = a_{\text{стр}}/a.$$

Усадка, являясь результатом работы, которая произведена в срезаемом слое при переходе его в стружку, отражает происходящие в связи с этим изменения и те усилия, в результате приложения которых возникли изменения. Значит, коэффициент усадки стружки характеризует пластическую деформацию при резании металлов. По усадке стружки можно судить о характере и интенсивности протекания процесса резания. Коэффициент усадки зависит от физико-механических свойств обрабатываемого материала, скорости резания, толщины и ширины срезаемого слоя, геометрии инструмента и свойств смазывающе-охлаждающей жидкости.

Коэффициент усадки стружки можно определить несколькими методами, из которых наиболее распространены следующие.

1. По длине стружки.

Для нахождения коэффициента усадки измеряют длину стружки по гладкому контуру гибкой нитью (тонкой проволокой) посередине ее ширины. Потом нить прикладывают к масштабной линейке и измеряют ее длину.

В. Д. Кузнецов предложил определять длину нейтральной линии (рис. 4.2,а) полученной стружки по формуле

$$l_{\text{стр}} = (EF + CD)/2 = AB.$$

Удобно измерять длину стружки измерительной линейкой по проекции стружки, увеличенной проектором или эпидиаскопом (рис. 4.2,б):

$$l_{\text{стр}} = l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5 + l_6 + l_7.$$

Длину пути резца измеряют:

- при строгании — линейкой или штангенциркулем;
- при точении прорезают вдоль заготовки неглубокие

пазы, в них (для уменьшения удара) зачеканивают медную или алюминиевую проволоку. Тогда длина пути резца будет равна длине дуги между пазами (рис. 4.3):

$$l_{\text{ср.сл}} = \pi D x / 360,$$

где x — угол между пазами, град.

2. По толщине стружки.

При достаточно гладкой стружке можно, зная толщину срезаемого слоя, измерить толщину стружки при помощи микрометра со специальными насадками.

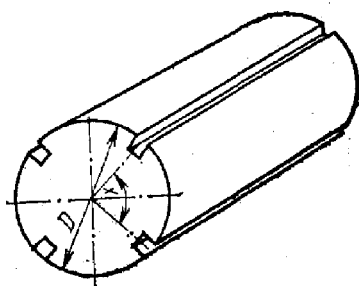
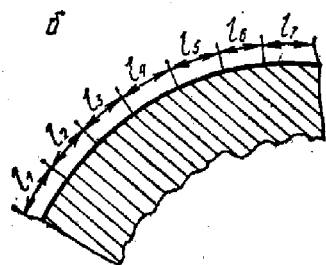
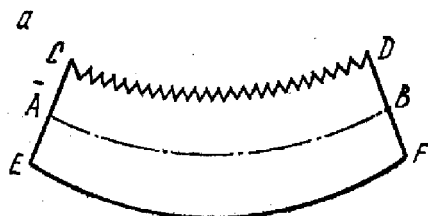


Рис. 4.2. Схемы для определения коэффициента усадки стружки:

а — по методу В. Д. Кузнецова; б — по проекции стружки

Рис. 4.3. Заготовка с пазами

Измерения производятся в 4...5 точках по ширине и длине стружки, и подсчитывается среднее арифметическое значение. Кроме того, толщину стружки можно измерить с помощью микроскопа.

3. Весовой метод.

Коэффициент усадки определяется по формуле

$$K = f_{\text{стр}} / f_{\text{ср.сл}},$$

где $f_{\text{стр}}$ — площадь поперечного сечения стружки, мм²;
 $f_{\text{ср.сл}}$ — площадь поперечного сечения срезаемого слоя, мм².

Площадь поперечного сечения стружки определяется следующим образом. Определяется масса небольшого куска стружки. Разделив ее на плотность обрабатываемого металла, получим объем стружки. Измеряем гибкой нитью по середине гладкой стороны длину стружки с точностью до ± 1 мм. Разделив объем куса стружки на его длину, получим площадь поперечного сечения

$$f_{\text{стр}} = m / \rho l_{\text{стр}},$$

где $l_{\text{стр}}$ — длина стружки, мм;

m — масса стружки (определяется с точностью до 1 мг);

ρ — плотность материала заготовки (для стали она равна $7,8 \text{ мг/мм}^3$).

Каждый из перечисленных способов имеет свою область применения.

Методика выполнения работы

Лабораторное оборудование: токарно-винторезный станок; заготовка; резцы — 3; угломер; тахометр; штангенциркуль; линейка металлическая; весы с разновесами; гибкие нити; плоскогубцы.

До начала работы следует измерить углы резца при помощи угломера.

Изменение усадки стружки изучается при свободном резании в зависимости от изменения скорости резания и переднего угла резца. Для этого производится точение стальной заготовки, имеющей на торце кольцевой поясок (рис. 4.4).

Рис. 4.4. Схема резания

Перед началом проведения опытов тщательно закрепляют заготовку и инструмент на станке.

Экспериментальная часть разбивается на три серии опытов.

Выбираются разные передние углы применяемых резцов, которые составляют: для первой серии опытов $\gamma = 0^\circ$; для второй — $\gamma = 10^\circ$; для третьей — $\gamma = 20^\circ$.

Для опытов одной и той же серии передний угол резца должен иметь одну и ту же величину; задний угол —

постоянный. В разных опытах одной серии точение производится с различными скоростями резания. Остальные условия резания остаются постоянными.

Скорость резания изменяется в пределах 3... 150 м/мин.

Рекомендуется производить опыты при $v \approx 3; 10; 20; 40; 60; 100; 150$ м/мин. Толщина среза (продольная подача) $a = S = 0,25$ мм.

Ширина среза равна ширине пояска (ориентировочно 3... 4 мм).

Режимы резания для каждой серии опытов одинаковы.

Частота вращения шпинделя (об/мин), необходимая для обеспечения заданной скорости резания, находится по формуле

$$n = \frac{1000 v}{\pi D},$$

где v — заданная скорость резания; D — средний диаметр пояска (см. рис. 4.4).

Затем подбирается ближайшая имеющаяся на станке частота вращения, которая проверяется тахометром, и вычисляется скорость резания, осуществляемая в опытах. Эта скорость резания записывается в отчет.

Получив образцы стружек от каждого опыта, определяют коэффициент усадки (укорочения) весовым методом по формуле

$$K_l = \frac{\bar{m}}{\rho l_{\text{стр}} ab}.$$

Требования к оформлению работы

В отчете необходимо отразить условия, в которых выполнялись опыты (станок, обрабатываемый материал, инструмент); результаты опытов; составить графики зависимости $K_l = f(v)$ и $K_i = f(\gamma)$ (точки графика соединяют тонкой ломаной линией, а затем проводится плавная аппроксимирующая кривая); сделать выводы по всей лабораторной работе.

Протокол лабораторной работы 4

Влияние различных факторов на усадку стружки

Условия проведения опытов

Модель станка

Измерение параметров процесса резания
 Задан угол резания
 Обрабатываемый материал
 Период срезаемого слоя
 Толщина срезаемого слоя

Результаты измерений

Номер опыта	Диаметр образца D , мм	Частота вращения шпинделя n , об/мин	Скорость резания v , м/мин	Длина стружки l , мм	Масса стружки m , г	Коэффициент укорочения стружки K_l

1-я серия опытов: $\gamma = 0^\circ$; 2-я серия опытов: $\gamma = 10^\circ$; 3-я серия опытов: $\gamma = 20^\circ$. Для каждой серии опытов составляется отдельная таблица.

Графики зависимостей $K_l = f(v)$ и $K_l = f(\gamma)$

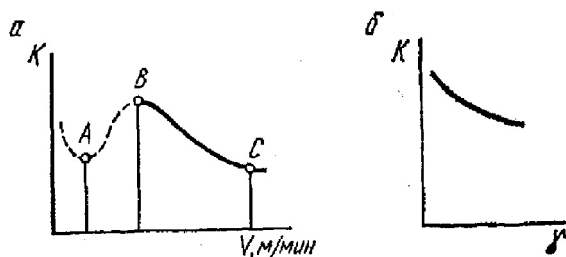


Рис. 4.5.

Лабораторная работа 5

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ ПО КОРНЮ СТРУЖКИ

Цель работы. Ознакомление с методикой исследования корня стружки, определение по корню стружки физических параметров процесса резания.

Вопросы для самоконтроля. 1. Что такое корень стружки и как он получается? 2. Как образуется сливная стружка? Что из себя представляет зона стружкообразования? 3. Как можно определить коэффициент усадки стружки и относительный сдвиг? 4. Что такое нарост? 5. Каковы особенности трения при резании метал-

лов? 6. От каких параметров зависит средний коэффициент трения? 7. Как изменяются нормальные и касательные напряжения в зоне контакта стружки и резца? 8. Какие факторы, как и почему влияют на процесс наростообразования и высоту нароста?

Краткие теоретические сведения

На стружкообразование при резании металлов затрачивается более 90 % силы и работы резания. От него зависят тепловой режим и контактные нагрузки на рабочих поверхностях инструмента, а значит, характер и интенсивность их износа. Стружкообразование непосредственно влияет также на качество поверхностного слоя и точность обработки детали.

Наиболее полно особенности стружкообразования можно определить по корню стружки. Если в процессе резания инструмент отвести от детали с очень большой скоростью, значительно превышающей скорость резания, то на детали остается элемент стружки, называемый ее корнем. Для получения корня стружки в настоящее время разработаны различные приспособления механического, электромагнитного, взрывного принципа действия, позволяющие получить высококачественные корни стружки при скоростях резания в несколько сот метров в минуту.

В результате анализа корней стружек, проведенного рядом ученых, установлено, что зона стружкообразования имеет форму криволинейного клина *ЛОМ* (рис. 5.1).

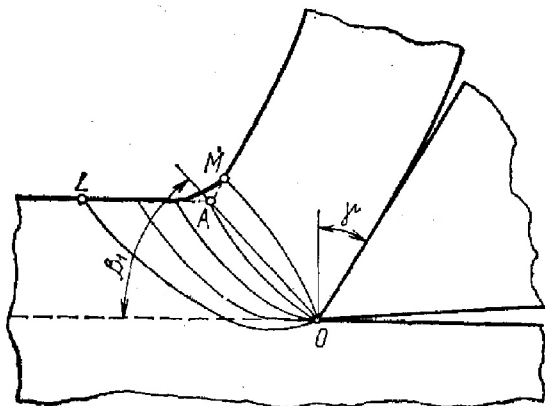


Рис. 5.1. Схематическое изображение зоны стружкообразования

Пластическое деформирование срезаемого слоя начинается на линии OL , которая является начальной границей зоны стружкообразования. Вдоль этой линии происходят первые сдвиги обрабатываемого материала. Проходя через зону стружкообразования, обрабатываемый материал последовательно подвергается дополнительным пластическим деформациям при пересечении каждой последующей линии сдвига. Достигнув конечной границы зоны стружкообразования OM , обрабатываемый материал получит наибольшую степень деформации. В основном пластическая деформация концентрируется в сравнительно узкой части зоны стружкообразования, прилегающей к ее конечной границе. Это позволяет в некоторых случаях упрощенно считать, что весь процесс деформации происходит вдоль некоторой условной плоскости сдвига OA , наклоненной к вектору скорости под углом сдвига β_1 .

Наиболее простой и распространенной оценкой деформации стружки является коэффициент усадки стружки. В работе 4 указывалось, что коэффициент усадки стружки можно определить по формуле

$$K = l/l_c = a_c/a,$$

где l , a — длина и толщина срезаемого слоя; l_c , a_c — длина и толщина стружки.

Однако коэффициент усадки может быть определен и по величине угла сдвига:

$$K = \cos(\beta_1 - \gamma) / \sin \beta_1.$$

Коэффициент усадки стружки лишь приближенно характеризует степень деформации обрабатываемого материала. Более точной ее характеристикой является относительный сдвиг ε , который определяется по формуле

$$\varepsilon = \operatorname{ctg} \beta_1 + \operatorname{tg}(\beta_1 - \gamma).$$

В результате пластических сдвигов при образовании стружки исходная равноосная структура срезаемого слоя металла превращается в неравноосную. В стружке появляется текстура. При анализе корней стружек было установлено, что угол направления текстуры β_2 превышает угол сдвига β_1 на величину, лежащую в диапазоне

$$x = \beta_2 - \beta_1 = \arctg \left(\frac{\varepsilon}{2} \pm \sqrt{1 + \frac{\varepsilon^2}{4}} \right).$$

Процесс стружкообразования связан с изменением контактных процессов на передней поверхности инструмента. Контакт стружки с передней поверхностью инструмента характеризуется рядом особенностей, например, различной химической чистотой поверхностей контакта, неравномерным распределением контактных напряжений на передней поверхности, весьма широким пределом изменения температуры на площадках контакта. Указанные особенности способствуют тому, что условия контакта на поверхности инструмент — стружка изменяются от полного схватывания материалов вблизи режущей кромки до граничного трения в зоне контакта, прилегающей к месту отрыва стружки. На участке, прилегающем к режущей кромке, в ряде случаев возникает застойная зона, которая характеризуется высокими коэффициентами трения стружки о переднюю поверхность. Это приводит к тому, что поперечная текстура стружки у передней поверхности искривляется и превращается в продольную (рис. 5.2). Толщина слоя, подвергнутая вторичной деформации, может достигать до 10 % от толщины стружки.

Зона пластического контакта составляет примерно половину от всей длины контакта. В этой зоне касательные напряжения практически постоянны, тогда как в зоне упругого контакта они постепенно уменьшаются, достигая нуля в месте отрыва стружки. Такое распределение касательных напряжений объясняется тем, что их рост ограничивается величиной сопротивления пластическому сдвигу обрабатываемого материала.

В том случае, если напряжение внешнего трения станет больше сопротивления пластическому сдвигу стружки, то внешнее скольжение стружки по передней поверхности резца сразу же заменяется энергетически более выгодными внутренними сдвигами материала стружки. Самый нижний слой стружки затормозится и как бы прилипнет к передней поверхности. Иногда на тонкий заторможенный слой налипают все новые и новые слои материала стружки, и на передней поверхности инструмента образуется клиновидная область обрабатываемого материала, называемый наростом. Нарост — образование нестабильное. Время от времени происходит его разрушение, часть его уносится со стружкой, часть остается на поверхности резания и резце. После разрушения нарост вновь возрастает до предельной высоты, опять разрушается и т. д. Частота этого процесса может достигать 50 . . .

70 Гц. На интенсивность наростообразования влияют свойства обрабатываемого материала, скорость резания, передний угол инструмента и ряд других параметров.

Наростообразование существенно влияет на процесс резания. Возникая на передней поверхности, нарост из-

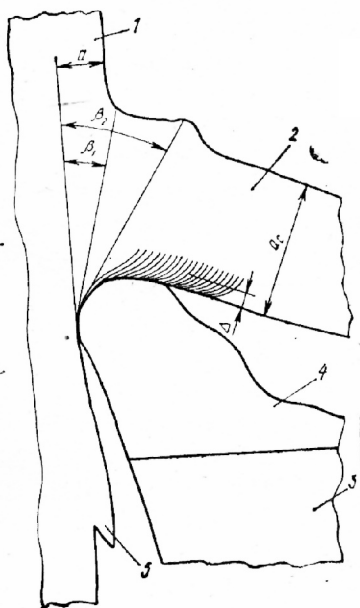


Рис. 5.2. Корень стружки стали 45:

1 — деталь; 2 — стружка; 3 — резец; 4 — нарост; 5 — частица разрушенного нароста на обработанной поверхности; β_1 — угол сдвига; β_2 — угол течения кристаллов; a — толщина срезаемого слоя; a_c — толщина стружки; Δ — толщина слоя вторичной деформации

меняет передний угол резца, средний коэффициент трения на передней поверхности, степень деформации стружки.

Средний коэффициент трения на передней поверхности инструмента может быть определен по одной из приведенных формул:

$$\mu = \operatorname{ctg} (2\beta_1 - \gamma);$$

$$\mu = \operatorname{ctg} (\beta_1 + \beta_2 - \gamma);$$

$$\mu = \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} - \beta_1 + \gamma \right);$$

$$\mu = 1 - \operatorname{tg} (\beta_1 - \gamma);$$

$$\mu = \operatorname{tg} (50^\circ - \beta_1 + \gamma).$$

Методика выполнения работы

Лабораторное оборудование: токарно-винторезный станок; заготовки для получения корней стружки (из материала, склонного к наростообразованию) — 5; приспособление для получения корней стружек; резец; прибор для измерения углов резца; тахометр; штангенциркуль; шлифы корней стружек — 5; микроскоп БМИ.

Перед установкой резца в приспособление необходимо измерить его передний и задний углы; убедиться в тщательности закрепления заготовки и приспособления на станке. После этого получить корни стружек в диапазоне скоростей 5...150 м/мин и по шлифам аналогичных корней определить физические параметры процесса резания на микроскопе БМИ (краткие сведения о конструкции микроскопа приведены в работе № 2).

Для измерения угла сдвига β_1 шлиф размещается на предметном столике микроскопа БМИ (см. рис. 2.17, 2.18) таким образом, чтобы центр перекрестия совпал с вершиной резца A , а горизонтальная ось $X-X$ была бы касательной к обработанной поверхности (рис. 5.3, а). После этого вращением маховичка 19 (см. рис. 2.18) переводим горизонтальную ось в положение, совпадающее с пред-

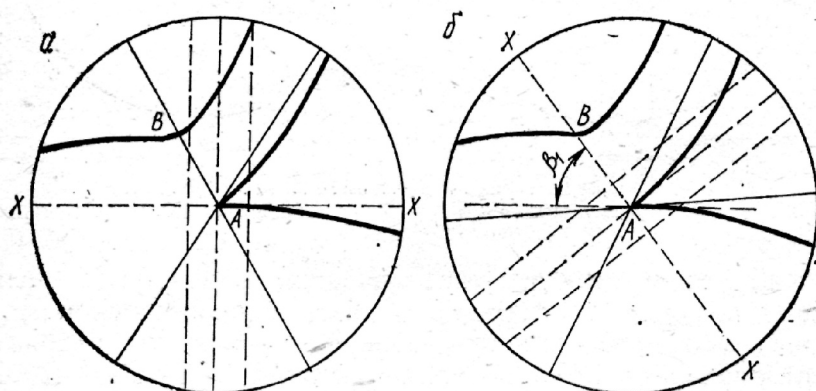


Рис. 5.3. Схема измерения угла сдвига

полагаемой плоскостью сдвига (рис. 5.3, б), и по разности отсчетов на шкале 18 микроскопа определяем величину β_1 .

Угол течения кристаллов измеряется аналогично углу β_1 (рис. 5.4).

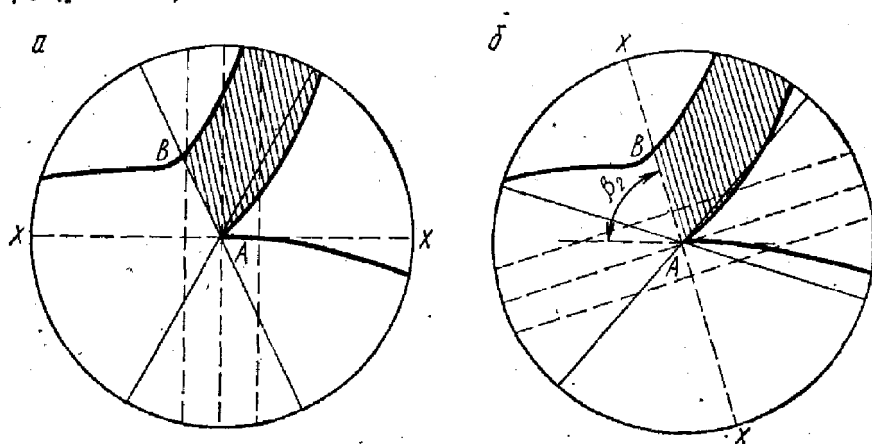


Рис. 5.4. Схема измерения угла течения кристаллов

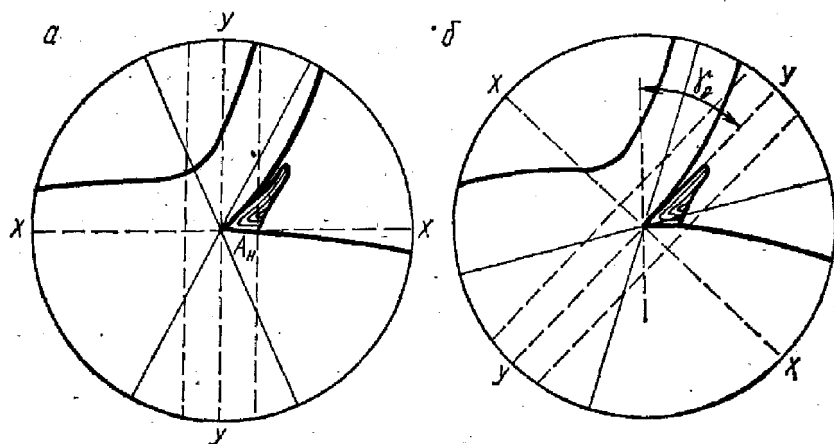


Рис. 5.5. Схема измерения действительного переднего угла

Для измерения действительного переднего угла (угла нароста γ_d) шлиф размещают на столике микроскопа таким образом, чтобы центр перекрестия совпадал с вершиной нароста A_n , а горизонтальная ось $X - X$ была бы касательной к обработанной поверхности (рис. 5.5, а). После этого вращением маховичка 19 (см. рис. 2.18) перево-

дим вертикальную ось $Y - Y$ в положение, касательное к поверхности нароста (рис. 5.5, б) и по разности отсчетов на шкале 18 (см. рис. 2.17) микроскопа находим величину γ_d . Одновременно можно определить и величину $\Delta\gamma = \gamma_d - \gamma$.

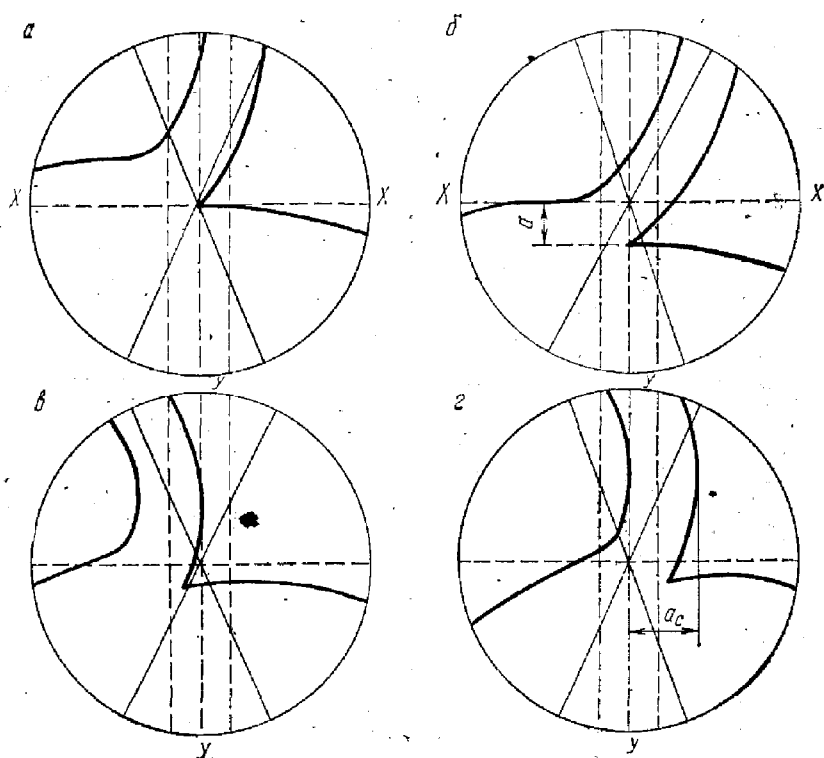


Рис. 5.6. Схема измерения толщины стружки и срезаемого слоя

Для измерения коэффициента поперечной усадки (утолщения) стружки K_a прежде всего устанавливают толщину срезаемого слоя. Для этого шлиф корня разворачивают таким образом, чтобы горизонтальная ось $X - X$ перекрестия была бы касательной к обрабатываемой поверхности (рис. 5.6, а). При этом на шкале 18 должен быть зафиксирован 0. Затем с помощью барабана 1 перемещения стола шлиф смещают так, чтобы ось $X - X$ оказалась касательной к обрабатываемой поверхности (рис. 5.6, б). Толщина срезаемого слоя a равна разности между показаниями шкалы на барабане 1.

После определения толщины срезаемого слоя находим

толщину стружки a_c . Для этого корни стружки размещают на столике микроскопа таким образом, чтобы вертикальная ось $Y - Y$ была бы касательной к прирезцовой стороне стружки в произвольной точке (рис. 5.6, *в*). При этом на шкале 18 должен быть зафиксирован 0. С помощью барабана 16 перемещения стола шлиф смещают так, чтобы ось $Y - Y$ оказалась касательной к надрезцовой стороне стружки (рис. 5.6, *г*). Толщина стружки a_c равна разности между показаниями шкалы на барабане 16 в начальном и конечном положениях.

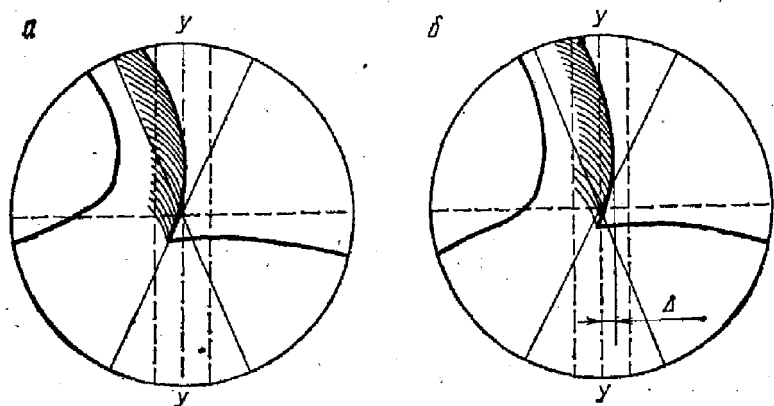


Рис. 5.7. Схема измерения толщины слоя вторичной деформации

Коэффициент утолщения стружки определяется по формуле

$$K_a = a_c / a.$$

При измерении слоя вторичной деформации стружки Δ шлиф корня устанавливают на столике микроскопа таким образом, чтобы вертикальная ось $Y - Y$ перекрестия была касательной к прирезцовой стороне стружки в произвольной точке (рис. 5.7, *а*). При этом на шкале 18 должен быть зафиксирован 0. С помощью барабана 16 перемещения стола шлиф смещают на величину Δ (рис. 5.7, *б*), которую определяют как разность между показаниями шкалы на барабане 16 в начальном и конечном положениях.

Средний коэффициент трения на передней поверхности инструмента определяется по одной из приведенных ранее формул.

Требования к оформлению работы

В отчете необходимо отразить условия, в которых выполнялись опыты (станок, инструмент, обрабатываемый материал); составить протокол опытов; начертить графики зависимостей β_1 , K_a , γ_d , $\mu = f(v)$; сделать выводы по всей лабораторной работе.

Протокол лабораторной работы 5

Исследование физических параметров процесса резания по корню стружки

Условия проведения опытов

Модель станка
Материал режущей части резца
Геометрические параметры резца
Обрабатываемый материал
Ширина срезаемого слоя
Толщина срезаемого слоя

Результаты измерений

Номер п.п	Скорость резания v , м/мин.	Угол сдвига β_1	Угол течения кристаллов β_2	Действительный передний угол γ_d	Коэффициент утолщения K_a	Толщина слоя вторичной деформации Δ	Средний коэффициент трения μ

Лабораторная работа 6

ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА СИЛУ РЕЗАНИЯ ПРИ ТОЧЕНИИ

Цель работы. Ознакомление с конструкцией приборов для измерения сил резания; приобретение навыков определения сил резания, обработки экспериментальных данных и получения эмпирических зависимостей, характеризующих влияние на силы резания скорости, подачи и глубины резания.

Вопросы для самоконтроля. 1. Силы, действующие на резец при точении обрабатываемой заготовки. 2. На какие составляющие и по каким направлениям разлагают равнодействующую силу резания? 3. На

чем основаны методы определения силы резания? 4. Основные части динамометра. 5. Устройство механического динамометра. 6. Принцип работы электрических динамометров с различными датчиками. 7. Что такое тарировка динамометра, как она проводится? 8. Характер и причины влияния ширины и толщины среза (глубины резания и подачи) на величину силы резания. 9. Характер и причины влияния скорости резания на величину силы резания. 10. Характер и причины влияния на силу резания свойств обрабатываемого материала, свойств материала инструмента, геометрических параметров инструмента, смазывающе-охлаждающих жидкостей.

Краткие теоретические сведения

Процесс резания обрабатываемого материала сопровождается возникновением в срезаемом слое сначала упругих, затем пластических деформаций, а также трением стружки о переднюю грань инструмента и трением задней грани об обрабатываемую поверхность, что и является источниками сопротивления металла резанию.

Таким образом, работа резания затрачивается на преодоление упругих и пластических деформаций и трения. Очень малой по величине работой диспергирования (образования новых поверхностей) можно пренебречь.

Суммарное усилие, затрачиваемое на процесс резания, складывается из следующих величин: усилия, необходимого для упругой деформации; усилия, необходимого для пластической деформации; усилия, необходимого для преодоления сил трения при резании.

На контактные площадки передней и задней поверхностей инструмента и режущие лезвия действует распределенная нагрузка. Ее мы можем представить в виде равнодействующей силы, положение которой в пространстве зависит от условий резания. Измерить ее непосредственно трудно.

Поэтому, а также с точки зрения проектирования и эксплуатации станка и режущего инструмента наибольший интерес представляет не сама равнодействующая сила резания, а ее составляющие, направления которых совпадают с направлениями скорости резания, продольной и поперечной подачи.

При продольном точении равнодействующая сила резания раскладывается на три взаимно перпендикулярные

составляющие (рис. 6.1): P_z — главную силу, совпадающую по направлению со скоростью главного движения резания, создающую крутящий момент на изделии, изгибающую изделие и резец; P_y — радиальную силу, направленную в вершине лезвия по радиусу главного вращательного движения резания, изгибающую вместе с силой P_z изделие и резец, отжимающую резец от изделия; P_x — осевую силу, направленную параллельно оси главного вращательного движения резания, т. е. силу подачи.

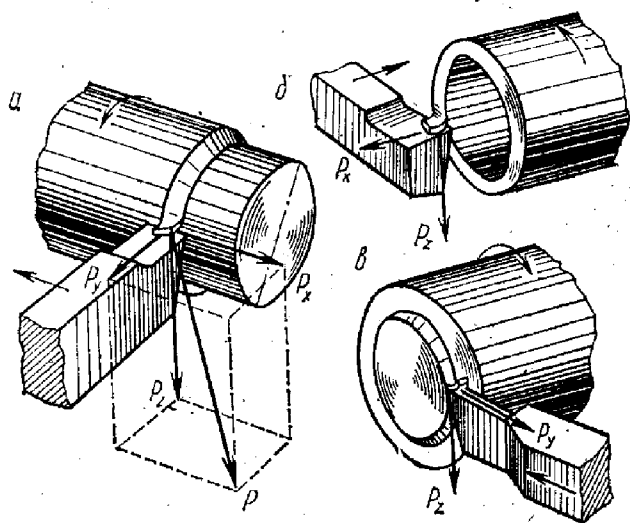


Рис. 6.1. Силы, действующие на резец:
а — при точении; б — при подрезании торца втулки; в — при отрезании

Знание сил, действующих в процессе резания, необходимо для расчета и конструирования режущего инструмента, станков и приспособлений, для расчета жесткости системы станок — инструмент — заготовка — приспособление, а также для расчета мощности, затрачиваемой на резание.

Для определения величины сил резания есть два пути: теоретический вывод уравнений, исходя из рассмотрения процесса резания как одного из частных случаев процесса пластической деформации металла;

вывод эмпирических формул на основании экспериментальных данных, полученных с помощью динамометров при непосредственном измерении сил резания в различных условиях.

Динамометры должны удовлетворять следующим тре-

бованиям: при измерениях не сообщать резцу или шпинделю дополнительные перемещения; иметь малую инерционность, для чего собственная частота колебаний динамометров должна быть в несколько раз больше частоты колебаний измеряемой силы; не изменять жесткость системы, быть виброустойчивым; точность измерения сил резания при исследовании физических процессов должна составлять 1...2 %; при измерениях сил для определения мощности, расчетов жесткости и прочности — 2...3 %; в динамометрах должно отсутствовать взаимное влияние составляющих силы резания. Датчик, воспринимающий действие одной из составляющих силы резания, не должен реагировать на действие других составляющих.

Независимо от конструкции динамометры состоят из трех основных частей: 1) датчика, воспринимающего нагрузку; перемещения, связанные с упругой деформацией датчика, или изменения параметров электрической цепи, связанные с упругой деформацией, вызванной силой резания, являются основой для определения величины силы резания; 2) приемника, регистрирующего нагрузку; 3) вспомогательных звеньев, связывающих датчик и приемник.

Динамометры бывают гидравлические, механические, электрические.

Гидравлические динамометры мало чувствительны, инерционны. Их показания отстают от быстропротекающих изменений и искажают картину. В настоящее время они практически не используются.

Конструкция *механического динамометра* основана на том, что тонкая стенка, несущая на себе резцедержатель с резцом, под действием сил резания упруго деформируется. Перемещения, появляющиеся в результате этой деформации, регистрируются индикаторами. По этим перемещениям можно судить о величине действующих сил. Такие динамометры обладают значительной инерционностью. Они просты по конструкции, но весьма чувствительны к вибрациям и сами могут вызвать ее. Стрелка индикатора, регистрирующего перемещения, сильно колеблется, что затрудняет замеры и отсчеты, а также записи изменения величин.

Широко распространенным вариантом механического динамометра является однокомпонентный токарный динамометр ДК-1 (рис. 6.2).

Динамометр устанавливается на верхних салазках суппорта токарного станка вместо предварительно снятого резцедержателя и закрепляется болтом, проходящим сквозь отверстие А. Резец закрепляется в державке (люльке) 2, которая соединена с корпусом динамометра 1 посредством двух упругих торсионных брусков 3 квадратного сечения. Под действием составляющей силы ре-

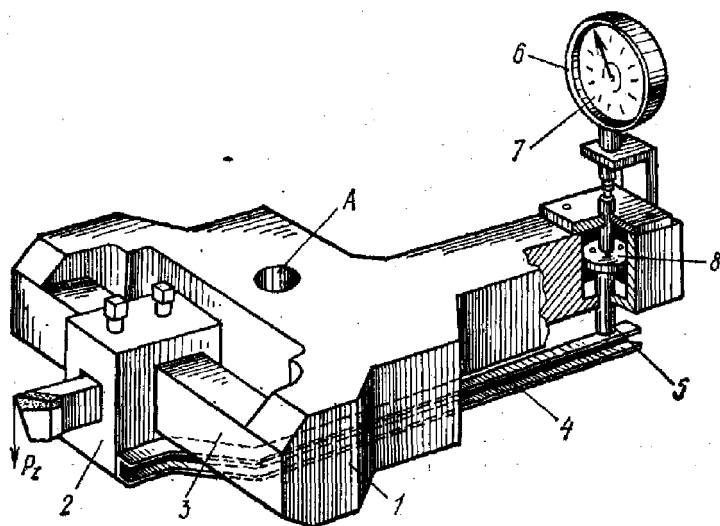


Рис. 6.2. Схема однокомпонентного токарного динамометра ДК-1

зания P_z резец отжимается вниз, упруго скручивая торсионные бруски. При этом находящийся в нижней части прибора свободный конец планки 4, приваренный другим концом к державке 2, поднимается, нажимая посредством стержня 5 на ножку индикатора 6. Ножка индикатора перемещается пропорционально упругой деформации торсионных брусков и, следовательно, тангенциальной составляющей силы резания.

Для устранения влияния неизбежных колебаний планки 4 и ножки индикатора предусмотрено простое демпфирующее устройство, включающее насаженный на стержень 5 поршень 8 с двумя малыми отверстиями, помещенный в закрытый, наполненный вязким маслом цилиндр в корпусе динамометра.

Динамометр рассчитан на максимальную силу $P_z =$

=6000 Н. Большая нагрузка может вызвать пластическую деформацию торсионных брусков.

Электрические динамометры имеют высокую чувствительность, обладают очень высокой жесткостью, практически безынерционны, позволяют производить исследование и запись процессов длительностью в десятитысячные и даже стотысячные доли секунды. Конструкция электрического динамометра основана на том, что перемещения упругого звена, несущего резцедержатель с резцом, вызванные действием сил резания, с помощью датчика вызывают изменения параметров электрической цепи (сопротивления, силы тока, емкости, индуктивности и т. д.), которые фиксируются приемником. Упругие перемещения в этих динамометрах весьма малы. Это наиболее современные и совершенные динамометры, но в ряде случаев они требуют довольно сложной электронной аппаратуры.

В динамометрах применяются следующие электрические датчики:

датчики сопротивления, из проволоки или фольги, меняющие свое сопротивление при малом изменении поперечного сечения или изменении механического внутреннего напряжения (тензодатчики);

индуктивные датчики, в которых сила тока меняется при изменении индуктивного сопротивления, т. е. положения сердечника, или при изменении зазора между катушками, которое происходит под влиянием упругих перемещений;

емкостные или конденсаторные датчики, в которых емкость меняется в результате изменения зазора между пластинами конденсатора из-за перемещения одной из пластин, связанной с упругим элементом динамометра;

пьезоэлектрические датчики, основанные на том, что на поверхностях кристаллов кварца, турмалина, сегнетовой соли при воздействии на них силы появляются электрические заряды, зависящие от величины этой силы.

Наиболее широкое распространение среди электрических динамометров получил универсальный динамометр УДМ конструкции Всесоюзного научно-исследовательского инструментального института (ВНИИ). Он позволяет измерять составляющие силы резания при точении, фрезеровании, шлифовании, осевую силу и крутящий момент при сверлении, зенкеровании, разворачивании, нарезании резьбы метчиком. Принципиальная схема

динамометра изображена на рис. 6.3. Основой динамометра является квадратная пластина, установленная в корпусе динамометра на упругих опорах 1...16, на которых наклеены тензодатчики. Опоры имеют трубчатую форму и обладают высокой жесткостью вдоль оси и малой жесткостью в направлении, перпендикулярном оси. На вертикальные опоры, воспринимающие силы, направленные по оси z , наклеено по одному датчику; на горизонтальные опоры, воспринимающие силы, действующие

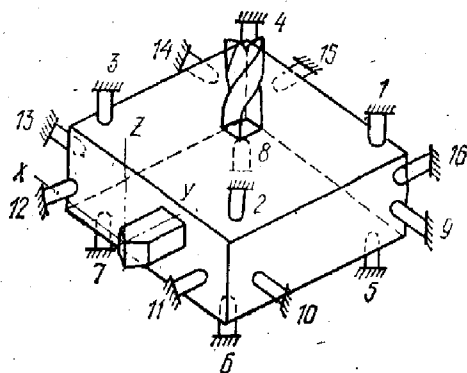


Рис. 6.3. Схема универсального токарного динамометра УДМ

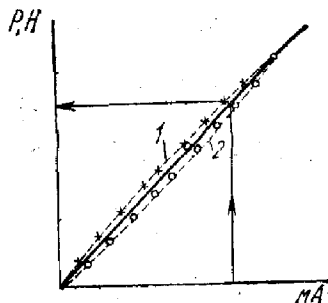


Рис. 6.4. Тарировочный график силы резания P_z :
1 — нагрузка; 2 — разгрузка

вдоль осей x и y , и крутящий момент наклеено по два датчика. Первые датчики служат для измерения горизонтальных сил, а вторые — крутящего момента. Датчики соединены между собой таким образом, что сигнал на выходе измерительной схемы является алгебраической суммой реакции опор. Это обеспечивает независимость показаний динамометра от вылета резца. Динамометр укомплектован тензометрическим усилителем и записывающим устройством.

Динамометры не позволяют определить непосредственно величины сил резания; их показания дают величины, пропорциональные действующей силе. Поэтому перед работой необходимо протарировать динамометр. Тарирование заключается в том, что динамометр нагружают в направлении сил резания сначала возрастающими, а затем убывающими силами, величина которых известна. Показания динамометра, соответствующие определенным величинам сил, регистрируются. На основании этих данных по средней линии нагрузки и разгрузки строится та-

рировочный график (рис. 6.4), которым в дальнейшем пользуются для расшифровки показаний динамометра.

Чтобы найти эмпирическую зависимость для подсчета сил резания, проводят исследования, измеряя силу при изменении влияющих на нее условий. Обработывая экспериментальные данные, получают формулы, раскрывающие зависимость:

$$P = f(b, a, v, k_m, k_{ин}, \gamma, \alpha, \phi, k_{охл}, h),$$

где b — ширина срезаемого слоя; a — толщина срезаемого слоя; v — скорость резания; k_m — коэффициент, учитывающий свойства обрабатываемого материала; $k_{ин}$ — коэффициент, учитывающий свойства инструментального материала; γ, α, ϕ — геометрические параметры инструмента; h — износ инструмента; $k_{охл}$ — коэффициент, учитывающий условия охлаждения.

Пользуясь эмпирическими степенными зависимостями, следует помнить, что они лишь приближенно отражают действительную связь явлений и притом только в том диапазоне условий, в котором проводились опыты.

Наиболее существенно на силы резания влияют толщина и ширина срезаемого слоя. С увеличением ширины среза сила резания растет прямопропорционально, а с увеличением толщины рост силы отстает. Причины такой зависимости заключаются в следующем. Работа резания расходуется на преодоление сопротивления срезаемого металла деформированию и сил трения по передней и задней поверхностям инструмента. С увеличением ширины среза в одинаковой мере изменяется объем деформируемых слоев металла, следовательно нормальная сила на передней поверхности инструмента растет прямопропорционально ширине среза. Коэффициент трения остается практически неизменным, так как температура резания слабо зависит от ширины срезаемого слоя. Значит, рост силы трения по передней поверхности инструмента прямопропорционален увеличению ширины среза. Нормальная сила и сила трения на задней поверхности инструмента в этом случае также растут в связи с увеличением площади контакта задней поверхности инструмента с деталью.

С увеличением толщины срезаемого слоя объем наиболее деформированных слоев стружки, прилегающих к передней поверхности инструмента, возрастает в меньшей степени, чем растет толщина среза. В срезаемом ме-

талле начинают преобладать менее деформированные слои, наиболее удаленные от передней поверхности инструмента. Следовательно, увеличение нормальной силы, действующей на переднюю поверхность инструмента, отстает от увеличения толщины срезаемого слоя. Температура резания при увеличении толщины среза возрастает быстрее, чем при увеличении ширины, так как при этом значительно возрастает нагрузка на единицу площади контакта между стружкой и инструментом. Изменение уровня температур может уменьшить коэффициент трения. Поэтому сила трения на передней поверхности растет в меньшей мере, чем толщина срезаемого слоя. Сила, действующая на заднюю поверхность инструмента, остается постоянной или изменяется незначительно. В связи с перечисленными причинами с увеличением толщины срезаемого слоя сила резания увеличивается в меньшей степени. Многочисленными исследованиями установлено, что при отношении $b/a > 1$ влияние толщины и ширины срезаемого слоя на составляющие силы резания при точении выражается следующими зависимостями:

$$P = C_P b^{x_P} a^{y_P},$$

где $x_P = 0,9 \dots 1,2$; $y_P = 0,5 \dots 0,75$.

Таким образом при неизменной площади поперечного сечения срезаемого слоя (одинаковой производительности резания) разным соотношениям b/a будут соответствовать разные величины силы резания. Чтобы сила резания была меньше, нужно уменьшить ширину срезаемого слоя за счет увеличения толщины. Такая зависимость справедлива не только при точении, но и при других видах работ.

С увеличением скорости резания сила резания значительно уменьшается — при малых скоростях и менее значительно — при больших. Если обрабатывают материалы, образующие наросты, то зависимость изменения силы резания от изменения скорости резания немонотонная (рис. 6.5). Это объясняется тем, что в зоне наростообразования увеличение ско-

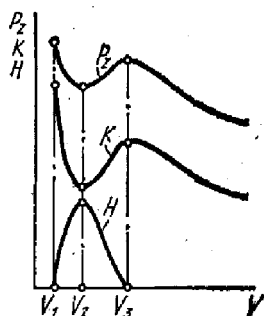


Рис. 6.5. Схема влияния скорости резания на высоту нароста H , коэффициент усадки стружки K и силу P_z

рости резания первоначально приводит к увеличению размеров нароста, что вызывает возрастание действительного переднего угла и, как следствие, уменьшение силы резания.

При максимальной величине нароста сила резания минимальна. При дальнейшем увеличении скорости резания нарост и действительный передний угол уменьшаются, сила резания возрастает. В зоне скоростей, в которой нарост уже не образуется, сила резания с увеличением скорости резания уменьшается, так как при этом растет температура резания, коэффициент трения стружки на передней поверхности инструмента уменьшается. Минимумы и максимумы на кривой $P=f(v)$ выражены тем более отчетливо, чем меньше передний угол инструмента и больше толщина срезаемого слоя.

Методика выполнения работы

Лабораторное оборудование: токарно-винторезный станок, заготовка, токарный динамометр, резцы токарные проходные, оснащенные твердым сплавом — 2...3; прибор для измерения углов резца, тахометр, штангенциркуль.

Перед началом работы следует ознакомиться с оборудованием и приборами, убедиться в тщательности закрепления динамометра, обрабатываемой заготовки и инструмента на станке, так как в противном случае возникнут вибрации, искажающие результаты опытов. Вылет резца в державке динамометра должен соответствовать условиям тарировки.

Динамометр устанавливается на суппорте токарного станка таким образом, чтобы вершина резца находилась на линии центров станка.

Эксперименты могут выполняться с помощью различных методов их планирования — многофакторного и однофакторного. В случае использования многофакторного эксперимента опыты проводятся в соответствии с матрицей планирования. Во втором случае проводится три серии опытов.

В первой серии опытов определяется зависимость силы резания от глубины резания при неизменных остальных условиях. Работа проводится при следующих режимах: $v \approx 80$ м/мин; $S = 0,17$ мм/об; $t = 3,0; 2,3; 1,7; 1,3; 1$ мм.

Вторая серия опытов устанавливает зависимость силы резания от подачи при неизменных остальных условиях резания. Работа производится при следующих режимах: $v \approx 80$ м/мин; $t = 1,7$ мм; $S = 0,084; 0,12; 0,17; 0,23; 0,34$ мм/об.

В третьей серии опытов определяется зависимость силы резания от скорости при неизменных остальных условиях резания.

Работа производится при следующих режимах:

$S = 0,17$ мм/об; $t = 1,7$ мм; $v \approx 5; 10; 20; 40; 60; 80; 150$ м/мин.

Необходимые частоты вращения заготовки (об/мин) подсчитываются до проведения опытов по формуле

$$n = \frac{1000 \cdot v}{\pi D},$$

где D — диаметр обрабатываемой поверхности заготовки.

Затем подбирается ближайшая, имеющаяся на станке частота вращения шпинделя, которая проверяется тахометром, и подсчитывается скорость резания, осуществляемая в опытах. Она записывается в протокол отчета.

Для каждого, принятого в опытах, значения скорости, подачи и глубины резания регистрируются показания динамометра и заносятся в протокол отчета.

Сила резания определяется по тарировочному графику соответственно показаниям динамометра.

Полученные экспериментальные данные обрабатываются одним из математических методов, приведенных ниже.

В результате обработки выводятся следующие уравнения

$$P_z = C_{P_z} t^{x_{P_z}} S^{y_{P_z}} v^{z_{P_z}}; \quad P_y = C_{P_y} t^{x_{P_y}} S^{y_{P_y}} v^{z_{P_y}};$$

$$P_x = C_{P_x} t^{x_{P_x}} S^{y_{P_x}} v^{z_{P_x}}$$

и находятся численные значения коэффициентов C_P и показателей степени.

Полученные данные сравнивают с приведенными в справочниках, учебниках, конспектах и делают выводы о влиянии скорости резания, глубины и подачи на величину силы резания.

Требования к оформлению работы

В отчете необходимо отразить: условия выполнения опытов (станок, инструмент, обрабатываемый материал); результаты опытов; построить графики зависимостей; обработать опытные данные, получить зависимости вида $P = C_P t^{x_P} S^{y_P} v^{z_P}$ и сделать выводы.

Протокол лабораторной работы 6

Влияние различных факторов на силу резания

Эскиз динамометра для измерения сил резания

Результаты тарировки прибора

Сила, Н	Показания динамометра k	
	нагрузка	разгрузка

Тарировочный график

Определение зависимостей составляющих сил резания от элементов режима резания

Условия проведения опытов

Модель станка

Материал режущей части резца

Геометрические параметры резца

Обрабатываемый материал

Результаты измерений (записываются по форме, приведенной ниже по каждому пункту в отдельности):

- влияние изменения скорости резания на силу P_z, P_y, P_x ;
- влияние изменения подачи на силу резания P_z, P_y, P_x ;
- влияние изменения глубины резания на силу резания P_z, P_y, P_x .

Номер п.п.	Частота вращения шпинделя n , об/мин	Диаметр обрабатываемого изделия D , мм	Скорость резания v , м/мин	Подача S , мм	Глубина резания t , мм	Показания динамометра k			Составляющие силы резания		
						z	y	x	P_z , Н	P_y , Н	P_x , Н

Графики зависимостей $P_z=f(v, S, t)$, $P_v=f(v, S, t)$,
 $P_x=f(v, S, t)$

Обработка данных и получение
эмпирических зависимостей

Лабораторная работа 7

ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА ТЕМПЕРАТУРУ РЕЗАНИЯ ПРИ ТОЧЕНИИ

Цель работы. Ознакомление с методами измерения температуры в зоне резания; приобретение навыков определения температуры в зоне резания, обработки экспериментальных данных и получения эмпирических зависимостей; установление влияния на среднюю контактную температуру зоны резания скорости, подачи и глубины резания.

Вопросы для самоконтроля. 1. Основные источники возникновения теплоты при резании металлов. 2. Каков тепловой баланс при резании металлов? 3. Что подразумевается под термином «температура резания»; от чего она зависит? 4. Методы определения температуры при резании металлов. 5. Сущность фотоэлектрического и калориметрического методов, термокрасок и микротвердости. 6. Характеристика методов искусственной и полусинтетической термопары, их достоинства и недостатки. 7. Особенности методов прижимной и бегущей термопар. 8. Метод естественной термопары, его достоинства и недостатки. 9. Как проводится тарировка термопары? 10. Факторы, влияющие на величину температуры резания при точении. 11. Как влияет на температуру резания скорость резания; чем можно объяснить такой характер влияния? 12. Как влияют на температуру резания подача и глубина резания; чем можно объяснить такой характер их влияния? 13. Как влияют на температуру резания геометрические параметры резца, свойства обрабатываемого материала, смазывающе-охлаждающие жидкости?

Краткие теоретические сведения

Одним из главных факторов, определяющих характер и результаты процесса резания, является теплота, образующаяся в зоне резания. Законы теплообразования объясняют целый ряд явлений, связанных со стойкостью ин-

струмента и качеством обработанной поверхности. Чтобы правильно использовать режущий инструмент, необходимо знать эти законы.

Основными источниками возникновения теплоты при резании металлов являются:

работа, затрачиваемая на деформации в срезанном слое и в поверхностных слоях детали, $A_{\text{деф}}$;

работа, затрачиваемая на преодоление трения по передней и задней поверхностям инструмента, $A_{\text{тр.п.п.}}$, $A_{\text{тр.з.п.}}$.

Суммарная работа, затраченная на процесс резания, будет равна $A = A_{\text{деф}} + A_{\text{тр.п.п.}} + A_{\text{тр.з.п.}}$.

Работа резания, произведенная за одну секунду, равна:

$$W = P_z v,$$

где P_z — сила резания, Н; v — скорость резания, м/с.

Установлено, что практически вся механическая работа резания (99,5 %) переходит в теплоту, следовательно, количество тепла, выделяющееся при обработке резанием за 1 с, равно

$$q = P_z v.$$

Небольшая часть работы переходит в потенциальную энергию искаженной кристаллической решетки деформированных зерен металла (поглощенная энергия деформации). Это связано с тем, что стружка, обработанная поверхность и трущиеся поверхности инструмента претерпевают наклеп. Поэтому более точно формулу можно выразить так:

$$W = P_z v \alpha,$$

где α — коэффициент, учитывающий указанные потери, незначительные по величине. Обычно этими потерями пренебрегают.

Следовательно, общее количество тепла, выделившееся при резании, зависит от деформации срезанного слоя и трения на контактных площадках передней и задней поверхностей инструмента.

Образовавшаяся в процессе резания теплота уносится стружкой, распространяется в деталь, резец и окружающую среду. Уравнение теплового баланса при резании будет иметь следующий вид:

$$Q = Q_{\text{деф}} + Q_{\text{тр.п.п.}} + Q_{\text{тр.з.п.}} = Q_c + Q_d + Q_{\text{ин}} + Q_{\text{о.ср.}}$$

где $Q_{\text{деф}}$, $Q_{\text{тр.п.п.}}$, $Q_{\text{тр.з.п.}}$ — соответственно теплота, выделившаяся в результате работы деформации, трения по

передней поверхности инструмента, трения по задней поверхности инструмента; Q_c , Q_d , $Q_{ин}$, $Q_{о.ср}$ — соответственно теплота, распространяющаяся в стружку, деталь, инструмент, окружающую среду.

Опытным путем установлено, что $Q_{деф}$ составляет примерно 55 %, $Q_{тр.п.п}$ — 35, $Q_{тр.з.п}$ — 10 %. При невысоких скоростях резания (30...40 м/мин) Q_c составляет примерно 60...70 %, Q_d — 30...40, $Q_{ин}$ — 3 %.

Если скорость резания значительно повышается, то тепло, образовавшееся в зоне резания, не успевает распространиться в деталь и инструмент, а уносится стружкой. Например, при $v=400 \dots 500$ м/мин, Q_c составляет 97...98 %, $Q_{ин}$ — 1 %.

На распределение тепла значительно влияет теплопроводность обрабатываемого металла. Например, при обработке титановых сплавов $Q_{ин}=10 \dots 20$ %.

Степень концентрации теплоты в различных участках изделия, стружки и инструмента различна. Большое количество тепла концентрируется в определенных зонах, сильно повышает их температуру. Поэтому различные точки рабочих поверхностей инструмента, стружки и детали имеют различную температуру, достигающую до нескольких сотен градусов. Образуются температурные поля. Высокая температура изменяет свойства металла и определяет фактическую износостойкость инструментального материала. Температурные деформации детали снижают точность обработки. Поэтому важно знать, какие возникают температуры в разных условиях резания и каков характер их распределения при изменении условий работы.

Зависимости для расчета температуры резания выводятся двумя путями: а) определяются теоретически на основе теории теплопередачи; б) находятся эмпирические формулы путем непосредственного измерения температуры при изменении условий резания.

Таким образом, на основе теоретических и экспериментальных исследований можно показать зависимость температуры резания, а также температуры режущего инструмента и обрабатываемой детали от различных факторов.

Для определения температуры резания и температуры нагрева резца, стружки и заготовки применяют следующие методы: термопар (искусственной, полусинтетической, естественной); фотоэлектрический; термочувстви-

тельных красок; метод измерения микротвердости; калориметрический; цветов побежалости.

Наиболее широко применяются методы измерения температуры при помощи термопар. Известно, что если нагреть место спая различных металлов, оставляя при этом свободные концы при более низкой температуре, на концах проводников возникает термоэдс, величина которой зависит от разности температур спая и более холодных концов. Замыкая цепь через милливольтметр, можно измерить величину термоэдс. Такая цепь называется термоэлектрической.

Метод искусственной термопары заключается в том, что в резце просверливается отверстие малого диаметра, не достигающее до какой-либо точки передней или задней поверхности резца примерно на $0,2 \dots 0,5$ мм, в которое вставляется изолированная термопара (часто медь — константан).

Температура в точке соприкосновения термопары и резца регистрируется включенным в цепь термопары гальванометром. Этот метод дает возможность определить температуру различных точек на передней и задней поверхностях резца, на поверхности стружки (рис. 7.1), т. е. найти температурное поле.

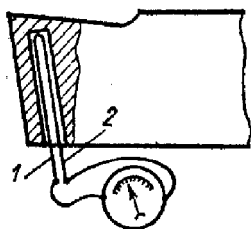


Рис. 7.1. Измерение температуры резания методом искусственной термопары:

1 — медь; 2 — константан

Недостатком его является сложность устройства и невозможность определить наивысшую температуру, так как измерение температуры фактически производится не на поверхностях контакта резца и стружки, а на некотором удалении от них.

В методе полусинтетической термопары одним из элементов служит сам резец, а другим — является константановая проволока, протянутая через сквозное отверстие в резце и изолированная от стенок отверстия. Такая проволока выводится через отверстие на переднюю или заднюю грань инструмента, где и расклепывается (рис. 7.2).

Метод полуюискусственной термопары дает более точные результаты, но, обеспечивая измерение температур в данных точках поверхности, не дает возможности изучить закономерности влияния элементов режима резания на наивысшую температуру процесса резания. Резец допускает малое количество переточек. При использовании метода полуюискусственной термопары элементом термопары может служить также деталь. При обработке де-

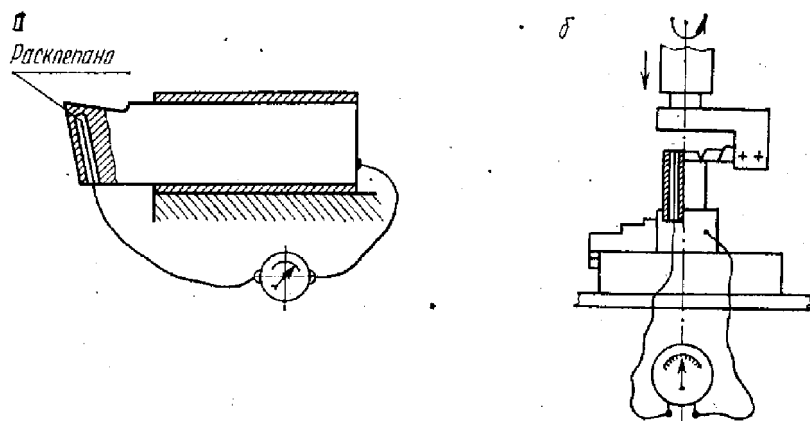


Рис. 7.2. Измерение температуры резания методом полуюискусственной термопары:

а — резец-константан; *б* — деталь-константан

тали проволочка перерезается и получается нагретый контакт ее с деталью. Можно также использовать термопару; состоящую из изолированной от детали, заложеной в разъем детали проволочки и инструмента.

Искусственные и полуюискусственные термопары могут быть прижимными, защемленными, перерезаемыми и бегущими.

Примером прижимной термопары является скользящая термопара хромель — алюмель или платина — платинородий, закрепленная на подставке из твердого сплава, подведенная до касания со стружкой (рис. 7.3).

Защемленные термопары закладываются в канавки, изготовленные в разьеме инструмента или детали, после чего половинки инструмента или детали скрепляют до полного соприкосновения. Проводники термопары дополнительно изолируют.

Перерезаемые и бегущие термопары используются для изучения заонов распределения температур на кром-

ках и контактных поверхностях инструмента. Примером использования перерезаемых термопар являются устройства, показанные на рис. 7.4, 7.5.

Две половины изделия тщательно обрабатываются по плоскости разреза I—I. В канавки одной из половин за-

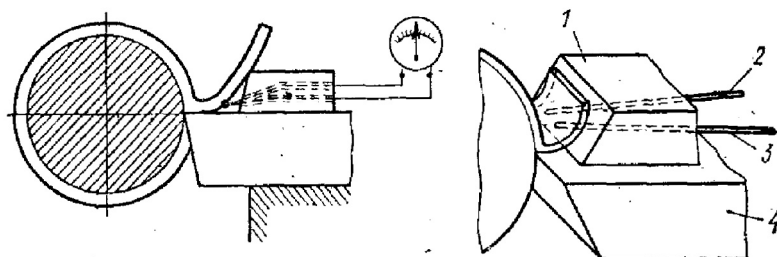


Рис. 7.3. Измерение температуры стружки с помощью скользящей термопары:

1 — твердосплавная подставка; 2 — платина; 3 — платинородий; 4 — резец

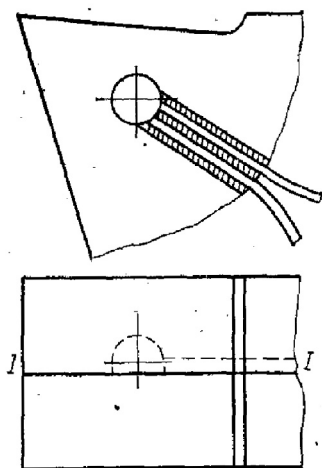


Рис. 7.4. Схема установки заземленной термопары в резце

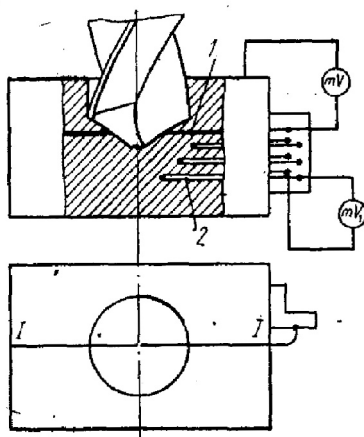


Рис. 7.5. Схема устройства с перерезаемой (1) и искусственными (2) термопарами при исследовании температуры в процессе сверления

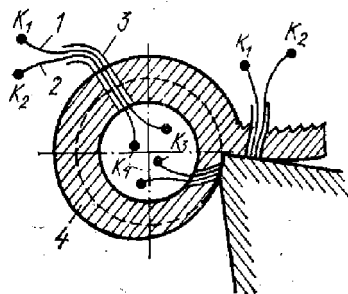
кладываются изолированные проводники 1 и искусственные термопары 2. Тщательная подготовка плоскостей разреза обеспечивает заземление проводников, безударную работу инструмента и плавное перерезание проводника. При перерезании проводников они контактируют с изделием и инструментом, образуя полуискусственные термопары, регистрирующие температуры разных точек

режущей кромки инструмента. Искусственные термопары регистрируют температуру разных точек изделия.

Принципиальная схема бегущей термопары представлена на рис. 7.6. Деталь имеет гребни в форме спирали. В них сверлят отверстия диаметром 0,5...0,7 мм, в которые вставляют защитные трубки с двумя изолированными

Рис. 7.6. Схема измерения температуры бегущей термопарой:

1, 2 — электроды термопары; 3 — защитная трубка; 4 — деталь; k_1, k_2, k_3, k_4 — контакты термопар



ми проводниками термопары. Трубка из обрабатываемого или близкого к нему по свойствам материала защищает проводники от преждевременного замыкания. При перерезании резцом трубки проводники замыкаются и на поверхности резания образуется точечная термопара, которая движется вместе с прирезцовым слоем стружки по передней поверхности, что позволяет записать распределение температуры по длине контакта. Участки проводников, оставшиеся в заготовке, позволяют определить распределение температуры вначале по задней грани, а затем температуру поверхности резания.

В методе естественной термопары элементами термопары служат деталь и резец, которые, будучи разнородными металлами, в процессе резания имеют сильно нагретый контакт, являющийся спаём этой термопары. Концы резца и детали имеют значительно более низкую температуру. Одна из распространенных схем естественной термопары приведена на рис. 7.7. Заготовка 1 изолируется от станка при помощи диэлектрических прокладок и текстолитовой вставки 2 в деталь, на которую опирается задний центр станка. Резец 3 изолируется от резцедержателя станка при помощи прессшпановых и текстолитовых прокладок 4. Для замыкания контакта с деталью в заготовку ввертывается стержень 6, диаметр которого меньше, чем отверстие в шпинделе. Этот стержень при выходе из шпинделя проходит через текстолитовую втулку 8, чтобы избежать соприкосновения со шпинде-

лем. На конце стержня установлен токоъемник 7, который обеспечивает надежное замыкание вращающегося и неподвижного участков цепи. Возникающая в процессе резания термоэдс регистрируется гальванометром 5.

Для устранения дополнительных паразитных термопар, возникающих в местах стыка деталей станка с заготовкой резец и заготовку изолируют от станка. При ис-

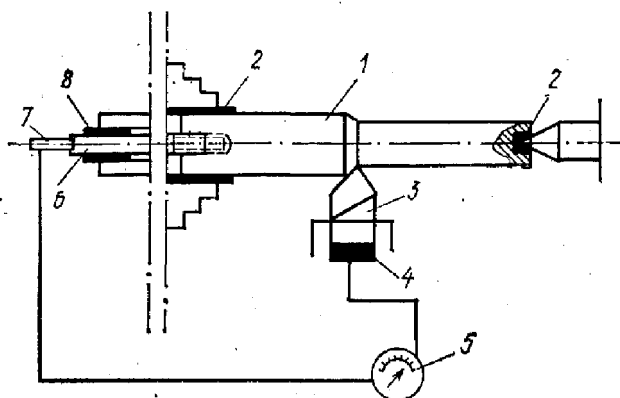


Рис. 7.7. Схема измерения температуры резания методом естественной термопары

следованиях, не требующих высокой точности, установка может быть значительно упрощена. Деталь не изолируют от станка, считая, что роль возникающей дополнительно термопары ничтожна из-за слабого разогревания заднего центра по сравнению с резцом. В связи с этим провод, ранее присоединяемый к детали, можно присоединить к любой точке станка.

Метод естественной термопары простой. Его недостатком является сложность и необходимость тарирования при каждом изменении материала детали или инструмента.

Естественная термопара измеряет некоторую среднюю температуру, тогда как на площадке контакта стружки и передней грани инструмента в процессе резания развивается различная температура в разных точках контакта. Отношение этой средней температуры к наивысшей непостоянно.

Естественные термопары могут также применяться и для измерения средних температур на каждой из контактных площадок в отдельности и для изучения закона

распределения температур на поверхности соприкосновения стружки с резцом. Примером такого устройства является разрезной резец (рис. 7.8). Он состоит из пластин 1 и 2, закрепленных в державке. Одна из пластин — из диэлектрика (минералокерамика), вторая — из токопроводящего материала. Меняя пластины местами при $f \approx 0$, в процессе резания можно измерить средние температуры на каждой из контактных поверхностей в отдельности. Применяя резцы с разными размерами

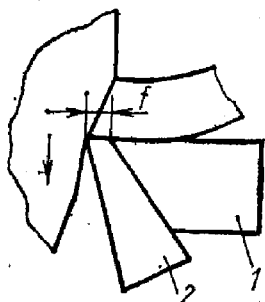


Рис. 7.8. Разрезной резец

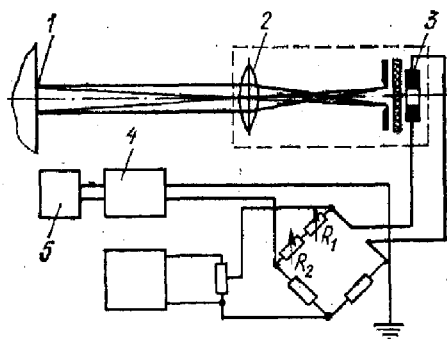


Рис. 7.9. Схема фотоэлектрического пирометра для измерения температуры инструмента, детали и стружки

фаски f на пластине из диэлектрика, можно измерить средние температуры на отдельных участках передней поверхности инструмента со стружкой и составить представление о законе распределения температур на этой контактной площадке. Но при этом допускается ряд погрешностей по сравнению с реальным процессом резания, в частности, изменяются условия трения на передней поверхности, интенсивность и направление тепловых потоков из-за различий в свойствах используемых инструментальных материалов.

Фотоэлектрический метод измерения температур в зоне резания (рис. 7.9) основан на принципе собирания лучеиспускаемого тепла с участка нагретой поверхности 1 с помощью линз 2 и направления его на фотосопротивление 3. Под действием теплового излучения в фотоэлементе возникает ток, который усиливается усилителем 4 и регистрируется измерительным устройством 5. Фотоэлектрический метод позволяет измерять температуру

различных участков зоны резания и определять температурные поля на передней и задней поверхности резца.

Недостатками метода являются сложность конструкции устройства и влияние окисных пленок, появляющихся в процессе резания на исследуемых поверхностях, на точность показаний.

Методом измерения микротвердости можно получить приближенное температурное поле поверхностей инструмента. Этот метод основан на том, что нагрев инструмен-

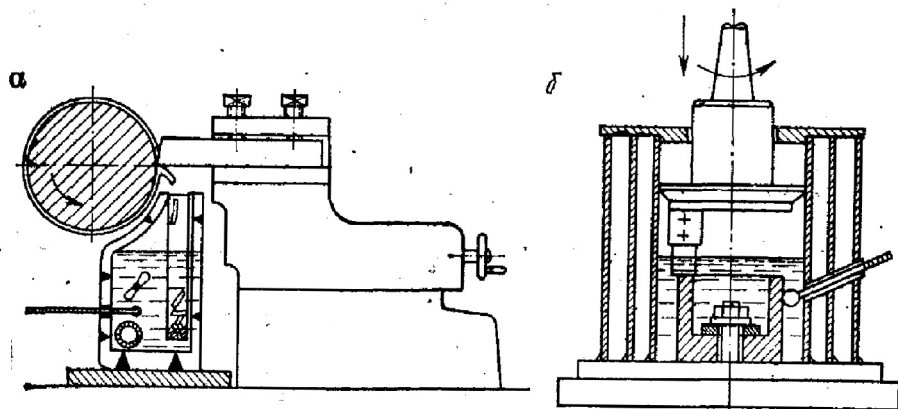


Рис. 7.10. Схемы калориметров:

а — для определения средней температуры стружки; б — для определения общего количества выделившегося при резании тепла

тальных материалов (быстрорежущей стали выше 550°C , твердого сплава выше 900°C) ведет к снижению их микротвердости, а величина снижения при одинаковом времени пропорциональна температуре. Метод дает значительные погрешности.

Калориметрический метод используют для определения всего количества тепла, выделяющегося в процессе обработки резанием, а также для определения тепла, переходящего в стружку или инструмент.

Улавливая в калориметр горячую стружку, зная массу стружки и воды в калориметре и изменение температуры воды, можно определить среднюю температуру стружки (рис. 7.10). Есть также калориметры, в которые погружают деталь и инструмент.

Методом термочувствительных красок можно определять максимальные значения температур сходящей стружки на ее поверхностях, не соприкасающихся с рез-

цом. Метод прост, но не позволяет определять температуру сильно нагретых поверхностей.

Можно приближенно регистрировать уровень температуры на резце, фиксируя момент плавления проволок диаметром 0,5...1 мм из олова (231 °C), свинца (327 °C), цинка (419 °C), алюминия (660 °C), меди (1083 °C), плотно вставленных в радиально просверленные отверстия обрабатываемой заготовки.

Тарирование термопар. Большинство методов, используемых в настоящее время для измерения температуры резания, фиксируют не непосредственные значения температур, а параметры электрической цепи, например, напряжение (мВ).

Для того, чтобы перейти от показаний в милливольт-тах к градусам, каждое устройство должно быть протарировано с тем прибором, который будет включен в его цепь при замерах температуры.

Тарирование термопары заключается в том, что определяется соответствие значений температуры показаниям милливольтметра, включенного в цепь термопары. Для этого помещают спай термопары в среду, температура которой известна, и фиксируют показания милливольтметра, соответствующие разным температурам. Затем строится тарировочный график, по которому расшифровываются показания милливольтметра термопары после проведения опытов. Температура холодных концов при тарировке должна быть такой же, как в процессе работы.

Правильная методика тарирования обеспечивает достоверность результатов экспериментов. В настоящее время наиболее распространены два метода тарировки термопары.

При тарировании естественной термопары первым методом в металлическую ванну (из свинца, олова, сурьмы), подогреваемую каким-либо источником тепла, вставляются применяемый при опытах резец и стружка от обрабатываемой заготовки (или стержень из материала заготовки). Они не спаиваются, но являются как бы термопарой. В эту же ванну в непосредственной близости от указанной термопары вводится так называемая «контрольная» термопара с проградуированным ранее гальванометром (рис. 7.11).

При подогреве и охлаждении ванны через определенные промежутки времени регистрируются ее температу-

ра, указываемая «контрольной» термопарой, и показания гальванометра тарируемой термопары. По полученным результатам строится график, показывающий значения температуры, соответствующие различным показаниям гальванометра тарируемой термопары (рис. 7.12).

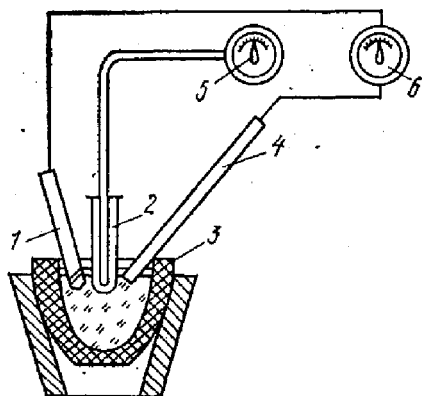


Рис. 7.11. Схема тарировки естественной термопары в расплавленном металле:

1 — резец; 2 — контрольная термопара; 3 — тигель; 4 — пруток; 5, 6 — регистрирующие приборы

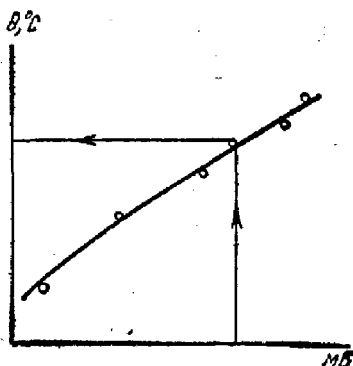


Рис. 7.12. Тарировочный график

Этот метод тарирования не воспроизводит действительных условий работы резца, так как не обеспечивает одинаковые площади контакта обрабатываемого металла с резцом. При тарировании температура контактной поверхности постоянна, между тем как на площади контакта стружки и передней поверхности инструмента в процессе резания развивается различная температура. Таким образом, измеряемая при тарировании термопар температура является усредненной.

При втором методе (рис. 7.13) пластинка 1 из материала инструмента приводится в плотный контакт с нагревателем 3 в виде нихромовой пластинки. С другой стороны к нагревателю прижимается стержень из обрабатываемого металла 2. К нагревателю приварены две тонкие пластинки, представляющие собой расплющенные концы проводов из меди и константана. Они образуют контрольную термопару 8. Нагрев нихромовой пластинки 3 осуществляется переменным током через трансформа-

тор 4. Для регулирования температуры нагрева служит реостат 5. Температуру пластины нагревателя регистрируют контрольным гальванометром 7. Соответствующие определенным температурам нагревателя и торцов тарированной термопары термоэдс регистрируются милливольтметром 6. По полученным данным строится тарировочный график.

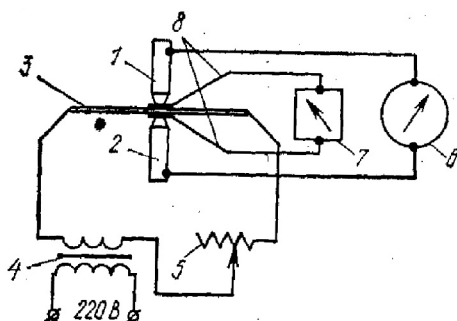


Рис. 7.13. Схема контактного способа тарировки термопар

В процессе экспериментального исследования температур можно найти эмпирические расчетные зависимости вида

$$\Theta = f(v, a, b, k_m, k_{ин}, \gamma, \alpha, \varphi, h, k_{охл}),$$

где b — ширина, a — толщина срезаемого слоя; v — скорость резания; k_m — коэффициент, учитывающий свойства обрабатываемого материала; $k_{ин}$ — коэффициент, учитывающий свойства инструментального материала; γ, α, φ — геометрические параметры инструмента; h — износ инструмента; $k_{охл}$ — коэффициент, учитывающий условия охлаждения.

Оценивая влияние разных факторов на температуру резания, нужно исходить из того, как этот фактор с одной стороны влияет на количество выделяющегося тепла, а с другой — на отвод тепла из зоны резания.

Количество тепла (Вт), выделяющегося при резании за единицу времени зависит от работы резания: $Q = P_z v$.

Изменение скорости резания влияет на температуру резания более всех других факторов. Если бы с изменением скорости сила резания не изменялась, то работа резания и количество выделяющегося тепла возрастали бы прямопропорционально. Но с увеличением скорости сила резания немного уменьшается. Поэтому с увеличением

скорости резания работа резания и зависящее от нее количество выделяющегося тепла увеличиваются, но их рост отстает от роста скорости резания.

С другой стороны, чем выше скорость резания, тем большая доля тепла уносится стружкой, не успевая распространяться в инструмент и деталь. В результате, чем выше скорость резания, тем в меньшей степени возрастает температура резания. Кривая зависимости $\Theta = f(v)$ асимптотически приближается к линии температуры плавления. При точении сталей

$$\Theta = C_v v^{z_\Theta}, \quad z_\Theta \approx 0,3 \dots 0,5.$$

С увеличением ширины срезаемого слоя прямопропорционально растет сила резания, а также работа резания и количество выделяющегося тепла. Но в такой же мере растет ширина контакта инструмента со стружкой и деталью, т. е. нагрузка на единицу длины режущей кромки не увеличивается. Условия теплоотвода улучшаются. В связи с этим температура резания с увеличением ширины срезаемого слоя растет незначительно. Для сталей

$$\Theta = C_b b^{x_\Theta}, \quad x_\Theta \approx 0,1.$$

С увеличением толщины срезаемого слоя сила резания (при условии $b/a > 1$) растет в степени меньше 1. Следовательно, увеличение работы резания и количества выделяющегося тепла отстает от увеличения толщины среза.

С другой стороны с увеличением толщины срезаемого слоя сдвигается центр давления стружки на резец, несколько увеличивается площадь контакта стружки с передней поверхностью резца, что способствует некоторому улучшению теплоотвода. В связи с этим при увеличении толщины срезаемого слоя рост температуры резания значительно отстает от роста толщины среза. Но нагрузка на единицу длины режущей кромки увеличивается. Теплоотвод улучшается в меньшей мере, чем при увеличении ширины среза. Поэтому, несмотря на то что количество тепла при увеличении толщины среза растет меньше, чем при увеличении ширины среза, из-за условий теплоотвода толщина среза влияет на температуру резания в значительно большей степени, чем ширина среза (рис. 7.14). Для сталей

$$\Theta = C_a a^{y_\Theta}, \quad y_\Theta \approx 0,2 \dots 0,3.$$

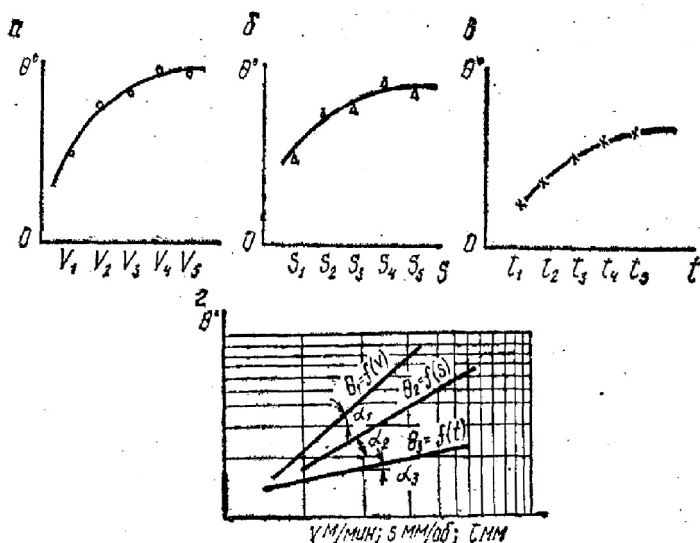


Рис. 7.14. Типовые графики зависимости температуры резания от скорости, глубины и подачи:
 $a - \theta = f(v)$; $b - \theta = f(S)$; $c - \theta = f(f)$; d — логарифмический график зависимости θ от v , S и f .

Методика выполнения работы

Лабораторное оборудование: токарно-винторезный станок; заготовка с изоляцией; резцы токарные проходные; приборы для измерения углов резца; приспособление для измерения температуры резания методом естественной термопары; милливольтметр; тахометр; штангенциркуль.

До начала работы следует измерить углы резцов.

Температура в зоне резания определяется методом естественной термопары.

Перед началом проведения опытов следует убедиться в тщательности закрепления заготовки и инструмента, проверить изоляцию резца и детали, правильность подключения милливольтметра.

Для нахождения экспериментальных зависимостей в резании металлов необходимо провести эксперименты при определенных сочетаниях исследуемых параметров. Выбор значения этих параметров зависит от способа математической обработки, используемого в работе.

В случае использования метода многофакторного эксперимента опыты проводятся в соответствии с матрицей планирования эксперимента (см. приложение).

Для определения влияния элементов режима резания на температуру резания методом однофакторного эксперимента (см. приложение) необходимо провести три серии опытов. В первой серии устанавливается зависимость температуры от глубины резания.

▲ Работа проводится при следующих режимах: $v \approx 50$ м/мин; $S = 0,17$ мм/об; $t = 3,0; 2,3; 1,7; 1,3; 1$ мм.

Во второй серии опытов определяется зависимость температуры резания Θ от подачи при неизменных остальных условиях резания. Работа производится при следующих режимах: $v \approx 50$ м/мин; $t = 1,7$ мм; $S = 0,084; 0,12; 0,17; 0,23; 0,34$ мм/об.

В третьей серии опытов исследуется зависимость температуры резания от скорости резания при неизменных остальных условиях резания. Работа производится при следующих режимах: $S = 0,17$ мм/об; $t = 1,7$ мм; $v \approx 5; 10; 20; 40; 60; 80; 150$ м/мин.

Необходимые частоты вращения заготовки (об/мин) подсчитываются до проведения опытов по формуле

$$n = \frac{1000 v}{\pi D},$$

где D — диаметр обрабатываемой поверхности заготовки.

Затем подбирается ближайшая, имеющаяся на станке частота вращения шпинделя, которая проверяется тахометром, и подсчитывается скорость резания, осуществляемая в опытах; значения записываются в протокол отчета.

Для каждого принятого в опытах значения скорости, подачи и глубины резания регистрируются показания милливольтметра и заносятся в протокол отчета.

Температура резания в градусах (соответственно показаниям милливольтметра) определяется по тарифовочному графику.

Экспериментальные данные обрабатываются одним из математических методов, приведенных ниже.

В результате обработки необходимо вывести уравнение

$$\Theta = C_{\Theta} t^{x_{\Theta}} S^{y_{\Theta}} v^{z_{\Theta}}$$

и найти численные значения коэффициента C_{Θ} и показателей степени.

Полученные данные сравнивают с данными, приведенными в учебниках и конспектах, и делают выводы о

влиянии скорости резания, глубины и подачи на величину температуры резания.

Требования к оформлению работы

В отчете необходимо отразить условия и результаты экспериментов; результаты тарировки и тарировочный график; составить графики зависимостей; обработать результаты эксперимента для получения зависимостей вида

$$\Theta = C \theta t^x \theta S^y \theta v^z \theta; \text{ сделать общие выводы.}$$

Протокол лабораторной работы 7

Влияние различных факторов на температуру в зоне резания

Схема установки для измерения
температуры в зоне резания

Результаты тарировки прибора

Номер п.п.	Показания милливольтметра, мВ	Температура, °С

Определение зависимости температуры
в зоне резания от элементов режима резания
Условия проведения опытов

Модель станка

Материал режущей части резца

Геометрические параметры резца

Обрабатываемый материал

Результаты измерений (записываются по форме, приведенной ниже по каждому пункту в отдельности):

а) влияние изменения скорости резания на температуру в зоне резания;

б) влияние изменения подачи на температуру в зоне резания;

в) влияние изменения глубины резания на температуру в зоне резания:

Номер п.п.	Частота вращения шпинделя n , об/мин	Диаметр обрабатываемого изделия D , мм	Скорость резания v , м/мин	Подача S , мм/об	Глубина резания t , мм	Показания милливольтметра мВ	Температура в зоне резания θ , °С

Графики зависимостей $\Theta = f(v, S, t)$

Обработка данных и получение эмпирических зависимостей

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСА РЕЗЦОВ И ЗАВИСИМОСТИ СТОЙКОСТИ ОТ СКОРОСТИ РЕЗАНИЯ

Цель работы. Ознакомление с характером износа резцов; приобретение навыков измерения износа; определение допустимой величины износа с помощью критерия оптимального износа; получение зависимости стойкости от скорости резания.

Вопросы для самоконтроля. 1. Внешние признаки изнашивания режущих инструментов, обозначение износа. 2. При каких условиях наблюдается преимущественное изнашивание передней поверхности, задней поверхности, передней и задней поверхностей инструмента одновременно? 3. Методы измерения величины износа. 4. Характерные кривые износа. 5. Какие есть критерии затупления, в чем их сущность? Что называется размерной стойкостью, от чего она зависит? 6. Методика определения оптимального износа. 7. Стойкость инструмента и ее связь с принятым критерием затупления. 8. Зависимость между скоростью резания и стойкостью; причины такой зависимости. 9. Влияние разных факторов на величину показателя относительной стойкости. 10. Влияние толщины и ширины срезаемого слоя на скорость резания, обеспечивающую заданную стойкость.

Краткие теоретические сведения.

В процессе резания в результате трения стружки о переднюю грань инструмента, а задней грани инструмента — о поверхность резания детали происходит изнашивание, истирание контактных площадок инструмента. На задней грани вследствие износа появляется площадка с задним углом, равным нулю; на передней поверхности появляется лунка (рис. 8.1).

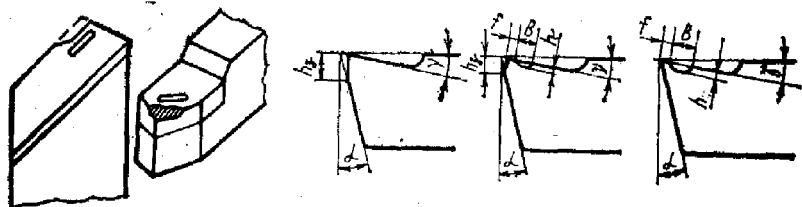


Рис. 8.1. Виды износа резца

Появление площадки износа на задней поверхности инструмента искажает его форму; при этом увеличивается трение, ухудшаются условия работы. При значительной величине площадки износа на задней поверхности инструмента (h_a) резко возрастает сила резания и температура. Увеличение лунки на передней поверхности опасно только тогда, когда лунка и площадка износа на задней поверхности соединяются. В этом случае режущая кромка разрушается, наступает так называемый катастрофический износ, до которого доводить инструмент нельзя. Поэтому основной мерой величины износа является высота площадки износа на задней поверхности инструмента. Она измеряется с точностью до 0,1 мм, а при исследованиях, требующих большой точности, — до 0,02 ... 0,05 мм. Дополнительной мерой величины износа является глубина h и ширина B лунки на передней поверхности инструмента. Измеряется также расстояние от лунки до режущего лезвия (f).

Износ измеряется с помощью лупы с делениями или инструментального микроскопа, а глубина лунки — индикатором с игольчатым наконечником. Суммарный износ можно определить, взвешивая инструмент по мере его изнашивания.

Применяя метод радиоактивных изотопов, можно сократить продолжительность опытов при исследовании влияния различных факторов на интенсивность износа режущего инструмента. Метод основан на облучении пластинки твердого сплава нейтронами. Это приводит к появлению изотопов вольфрама W^{187} . Интенсивность изнашивания инструмента характеризуется радиоактивностью стружки, с которой уносится 90 ... 98 % продуктов износа. Недостатком метода является отсутствие наглядной картины характера износа, а также необходимость проведения больших работ по защите от радиоактивного облучения.

В любых условиях работы износ происходит по передней и задней поверхностям инструмента одновременно. Но изменение условий работы может привести к тому, что износ по одной из поверхностей будет проявляться в значительной мере, тогда как на другой поверхности износ будет едва заметен. Так, при низких скоростях резания и малых толщинах среза, а также при обработке чугуна износ будет наблюдаться только на задней поверхности инструмента. При увеличении скорости реза-

ния и толщины среза наблюдается одновременный износ передней и задней поверхностей. При высоких скоростях и больших толщинах среза, при обработке вязких металлов без охлаждения, т. е. когда имеются большое удельное давление на переднюю грань и высокая температура резания, наблюдается износ только передней поверхности. Если в этих условиях применить охлаждение, то одновременно с износом передней поверхности будет замечен износ задней поверхности инструмента.

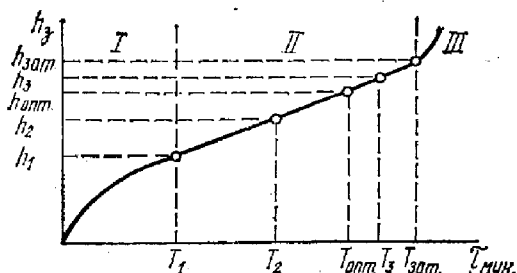


Рис. 8.2. Зависимость износа задней поверхности резца от времени его работы

Закономерность нарастания величины износа в зависимости от времени работы инструмента выражается графиком, называемым кривой износа (рис. 8.2).

На кривой износа различают три периода:

I — период приработки (начальный износ). Высота площадки износа по задней поверхности интенсивно нарастает до небольшой величины (из-за истирания неровностей, оставшихся после заточки).

II — период нормального износа. Износ постепенно увеличивается пропорционально времени работы.

III — период повышенного износа, переходящего в катастрофический. Он наступает из-за того, что при достаточно большой величине износа условия работы инструмента ухудшаются, заметно растут сила и температура резания, что вызывает, в свою очередь, возрастание интенсивности износа и еще большее ухудшение условий резания.

При росте износа в некоторый момент он очень быстро увеличивается в размерах; лунка на передней поверхности и площадка износа на задней поверхности соединяются и режущая кромка разрушается. С этого момен-

та начинается катастрофический износ, который допустить нельзя, так как может почти мгновенно наступить полное истирание всей рабочей части резца. На месте режущей кромки остается обожженная поверхность неправильной формы. Кривая износа резцов, оснащенных твердым сплавом, вследствие его высокой твердости и незначительного ее уменьшения с повышением температуры отличается плавным нарастанием износа во времени. На ней почти не наблюдается период повышенного износа. Интенсивный износ инструмента с пластинками твердого сплава может проявляться в виде больших сколов (разрушений) режущей кромки.

Для рациональной эксплуатации режущего инструмента и получения деталей заданного качества нужно установить допустимую величину износа, при достижении которой дальнейшая работа инструмента должна быть прекращена и инструмент переточен.

Признаки, по которым можно судить, что инструмент достиг предельно допустимой величины износа, называются критериями износа, или критериями затупления. Существует несколько критериев износа инструментов.

Критерий блестящей полосы. При большой величине износа металл на обработанной поверхности детали сминается, образуется блестящая полоска (при обработке стали).

Силовой критерий. Можно судить о затуплении резца по резкому увеличению сил резания. Для этого необходимо работать, применяя динамометры.

Технологический критерий. Этот критерий применяется при чистовой обработке деталей. Значительное увеличение износа сопровождается ухудшением шероховатости обработанной поверхности, недопустимым изменением размеров детали. Инструмент считается затупленным, когда обработанная поверхность перестает отвечать технологическим требованиям к ней.

Каждой величине износа по задней грани соответствует определенная величина радиального износа. Из-за этого деталь получается конусной и ее размеры могут выходить из поля допуска (рис. 8.3).

Критерий оптимального износа. При черновой обработке для обеспечения наиболее полного и экономичного использования инструмента пользуются критерием оптимального износа. За оптимальную величину износа принимают такую его величину, при которой обеспечивает

ся наибольший полный период стойкости режущего инструмента.

Время резания новым или переточенным режущим инструментом до его отказа, т. е. до достижения предельно допустимой величины износа, называется периодом стойкости или стойкостью. Период стойкости обозначается буквой T и измеряется в минутах.

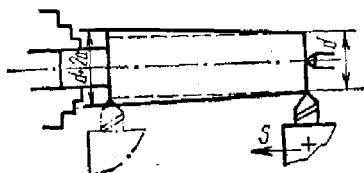
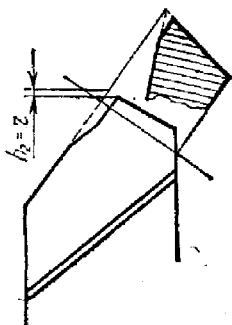


Рис. 8.3. Схема влияния износа резца на размер обработанной поверхности (размерный износ)

Иногда для выражения технологических возможностей стойкость измеряют в метрах пути резания (линейная стойкость) или в количестве одинаковых деталей, обработанных между двумя переточками.

Стойкость резца, соответствующая определенному радиальному износу, называется размерной стойкостью. Высокая размерная стойкость особенно важна для чистового инструмента, работающего на станках автоматических линий.

Полный период стойкости инструмента определяется как произведение количества переточек, допустимых для инструмента при данной величине износа, плюс 1, на время работы (стойкость), за которое этот износ образовался:

$$\Sigma T = T(k + 1),$$

где T — стойкость инструмента, соответствующая данной величине износа; k — количество переточек, допустимых резцом при данной величине износа.

Стойкость инструмента и интенсивность его изнашивания тесно связаны между собой. В данных условиях работы инструмента его стойкость может служить количественным выражением интенсивности изнашивания, которая в значительной мере зависит от температуры резания.

Из всех условий резания на температуру резания наибольшее влияние оказывает скорость резания, поэтому стойкость в очень большой степени зависит от изменения скорости резания. Чем выше скорость резания, тем меньше стойкость инструмента.

При обработке незакаленной стали резцами, оснащенными твердым сплавом, получают более сложную зависимость (рис. 8.4), обусловленную различной приро-

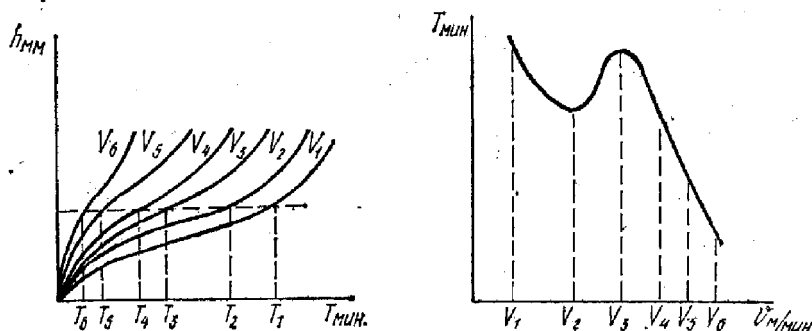


Рис. 8.4. Зависимость между скоростью резания и стойкостью резца

дой изнашивания резцов в разных диапазонах скоростей. Если инструмент имеет при различных скоростях резания одинаковую стойкость, то, естественно, выгодно работать с более высокими скоростями (с большей производительностью). Поэтому обычно работают со скоростями, соответствующими крайней правой ветви кривой $T=f(v)$. Эта зависимость выражается формулой

$$T = C_T / v^m \text{ или } v = C_v / T^m; m = 1/\mu,$$

где m — показатель относительной стойкости, характеризующий влияние заданной стойкости на допустимую скорость резания; C_T и C_v — коэффициенты, характеризующие условия работы.

Если увеличить толщину срезаемого слоя при работе твердосплавными резцами или работать резцами из быстрорежущей стали, мы будем наблюдать зависимость стойкости от скорости резания только в виде крайней правой ветви кривой $T=f(v)$, так как уже при невысоких скоростях резания повышение температуры приведет к резкому снижению режущих свойств инструментального материала и падению стойкости.

Перед началом работы необходимо ознакомиться с оборудованием и приборами, установить физико-механические свойства обрабатываемого материала, измерить размеры заготовки, а также с помощью имеющихся угломеров геометрические параметры резцов, их габаритные размеры и размеры пластинки.

Лабораторное оборудование: токарно-винторезный станок; заготовка; резцы токарные проходные правые — 4; штангенциркуль; угломер; секундомер; тахометр; измерительные средства (лупа, микроскоп).

Для определения стойкости необходимо сначала установить предельно допустимую величину износа резца, соответствующую выбранному для данных условий работы критерию затупления (или критерию износа). В этой работе принимаем за критерий затупления величину оптимального износа.

Обрабатывают заготовку на токарном станке при заданном режиме (глубине, подаче и скорости) резания. Резание продолжают до полного затупления резца. Периодически через небольшие промежутки времени прекращают резание и, не снимая резец, замеряют величину износа, соответствующую времени резания от начала работы до момента остановки, т. е. времени, за которое образовалась эта площадка износа. Затем резание продолжают дальше; полученные данные заносят в протокол отчета. Величину износа измеряют лупой с делениями или с помощью микроскопа. На основании полученных данных строят кривую износа (см. рис. 8.2).

Рассматривая полученные результаты замера износа, принимают поочередно каждое измеренное значение износа как предельно допустимое. Для каждой измеренной величины износа определяют, какое количество переточек было бы возможно для данного резца при его перетачивании через такие периоды времени, за которые резец достигает этой величины износа.

Определить количество переточек, допустимых резцом при определенной величине износа по задней поверхности, можно следующим образом. Для восстановления геометрии резца при его переточке по задней грани удаляют слой металла, толщина которого, измеренная в направлении передней поверхности, будет равна H (мм) (рис. 8.5):

$$H = h + a = \frac{h_3}{\frac{\cos \gamma}{\operatorname{tg} \alpha} - \sin \varphi} + a,$$

где α — задний угол резца, град; γ — передний угол резца, град; a — допуск на переточку, мм (в среднем берется равным 0,15 мм); b — ширина пластинки резца.

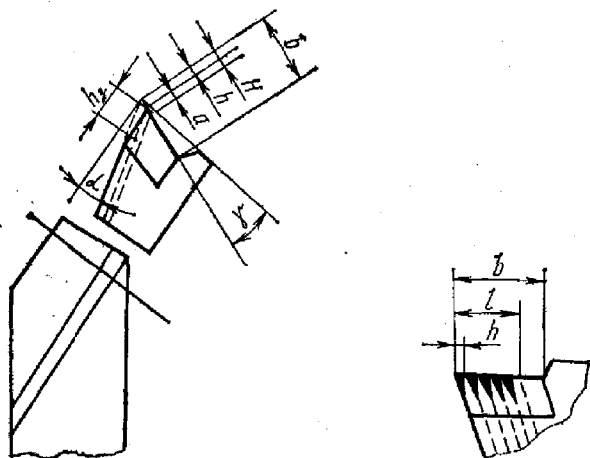


Рис. 8.5. Определение количества переточек

После всех переточек на резце должна остаться часть пластинки, которая еще прочно удерживается на державке, т. е. пластинку по ширине можно использовать примерно на $\frac{2}{3}$. Полезная ширина пластинки (мм) определяется по формуле

$$l = \frac{2}{3}(b-2).$$

Поэтому допустимое количество переточек будет равно

$$k = l/H.$$

Если измеренные величины износа поочередно считать предельно допустимыми, то продолжительность работы до такой величины износа будет равна стойкости резца T , мин. Определив для каждого имеющегося в протоколе значения износа h_3 (мм) число переточек k и умножив его на соответствующее данному износу время работы резца, находят для каждого значения h_3 полный период стойкости:

$$\Sigma T = T(k+1).$$

По полученным данным строим график зависимости $\Sigma T = f(h_3)$. Чем больше допустимая величина износа, тем больше время работы до его достижения, но тем больший слой металла необходимо срезать с резца при его переточке. Следовательно, тем меньше возможное для этого резца количество переточек. Поэтому полный период стойкости с увеличением допустимого износа сначала увеличивается, а затем, когда количество допустимых переточек становится слишком малым, уменьшается (рис. 8.6).

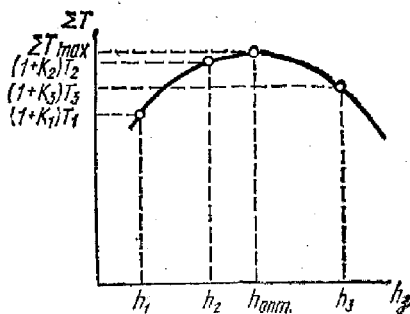


Рис. 8.6.

Зависимость полного периода стойкости резца от величины износа по заданной поверхности

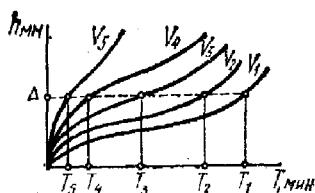


Рис. 8.7.

Зависимость износа задней поверхности резца от времени его работы при различных скоростях резания (Δ — величина допустимого износа, соответствующая выбранному критерию затупления)

Износ, соответствующий максимальному полному периоду стойкости резца, является оптимальным, т. е. наиболее выгодным. Откладывая его величину на кривой износа, можно найти оптимальную стойкость резца при данной скорости резания (см. рис. 8.6).

Для определения зависимости стойкости от скорости резания работу проводят при различных скоростях, т. е. работают до затупления с неизменными условиями резания, изменяя для каждого случая только скорость резания. На основании полученных данных строят кривые износа. Зная предельно допустимую при выбранном критерии затупления величину износа, можно найти по графику стойкость, соответствующую каждой скорости резания (рис. 8.7).

Величины стойкости, соответствующие различным скоростям, записывают в соответствующую таблицу протокола отчета. По этим данным строят график зависимости стойкости от скорости резания $T = f(v)$ (рис. 8.8).

Обработывая полученные результаты одним из мате-

матических методов, получим коэффициенты и показатели степени в формулах:

$$T = C_T / v^\mu \text{ или } v = C_v / T^m.$$

При обработке графоаналитическим методом: строим график зависимости $T=f(v)$ в логарифмических координатах (рис. 8.9);

записываем уравнение полученной прямой: $\lg T = \lg C_T + \mu \lg v$;

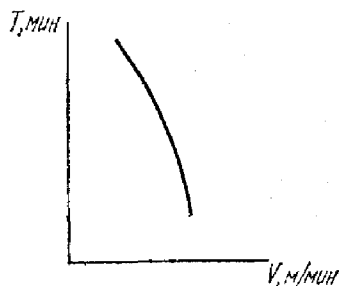


Рис. 8.8. Зависимость $T=f(v)$

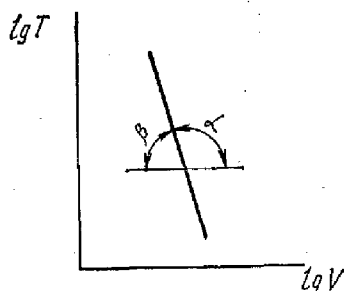


Рис. 8.9. Зависимость $T=f(v)$ в логарифмических координатах

находим коэффициент μ , который равен $\mu = \operatorname{tg} \alpha = -\operatorname{tg} \beta$;

переводим уравнение из логарифмической формы в степенную зависимость (потенцируем):

$$T = C_T / v^\mu;$$

определяем коэффициент C_T . Он равен ординате при значении скорости резания $v=1$, но найти его по графику затруднительно, так как угол подъема прямой велик. Поэтому определяем C_T расчетом:

$$C'_T = T_1 v_1^\mu; \quad C''_T = T_2 v_2^\mu; \quad C'''_T = T_3 v_3^\mu.$$

Коэффициент C_T находят как среднее арифметическое нескольких значений:

$$C_T = \frac{C'_T + C''_T + C'''_T}{3}.$$

Выполнение работы заканчивается вписыванием в отчет формулы

$$T = C_T / v^n \text{ или } v = C_v / T^m$$

с численными значениями коэффициента и показателя степени.

Требования к оформлению работы

В отчете необходимо отразить: условия проведения экспериментов и их результаты; составить графики полученных зависимостей; обработать результаты эксперимента для получения зависимостей; $T = C_T / v^n$, $v = C_v / T^m$; сделать выводы.

Протокол лабораторной работы 8

Исследование износа резцов и зависимости стойкости от скорости резания

Схема затупления рабочих поверхностей

Определение зависимости износа резца от времени его работы (при заданном режиме резания)

Условия проведения опытов

Модель станка
Материал режущей части резца
Геометрические параметры резца
Обрабатываемый материал
Ширина пластинки резца

Результаты измерений

Номер п.п	Диаметр обрабатываемого изделия D		Режим резания				Длина одного прохода L , мм
	начальный, мм	конечный, мм	глубина резания, t , мм	подача S , мм/об	частота вращения шпинделя n , об/мин	скорость резания v , м/мин	

Номер п.п	Время резания до замедления износа t , мин	Износ по задней поверхности h_3 , мм	Величина k на передней поверхности резца, мм	Величина H на передней поверхности резца, мм	Количество переточек k	Полный период стойкости резца ΣT , мин

Графики зависимостей $h_3=f(\tau)$, $\Sigma T=f(h_3)$

Определение влияния скорости резания
на стойкость резца

Условия проведения опытов

Модель станка
Материал режущей части резца
Геометрические параметры резца
Обрабатываемый материал

Результаты измерений

Частота вращения шпинделя n , об/мин	Диаметр обрабатывае- мого изделия D , мм	Скорость резания v , м/мин	Подача S , мм/об	Глубина резания t , мм	Стойкость T , мин

Получение уравнения и графика $T=f(v)$

Лабораторная работа 9

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАБАТЫВАЕМОСТИ СТАЛИ

Цель работы. Ознакомление с методами определения обрабатываемости и определение зависимости $T-v$ методом торцевой обточки.

Вопросы для самоконтроля. 1. Что такое обрабатываемость? 2. Перечислите основные показатели обрабатываемости. 3. Какими методами определяется обрабатываемость? 4. В чем заключаются ускоренные методы определения обрабатываемости? 5. В чем сущность метода торцевой обточки? 6. Как влияют на показатели обрабатываемости физико-механические свойства обрабатываемого материала? 7. Как влияет на показатели обрабатываемости структура обрабатываемого материала?

Краткие теоретические сведения

Возрастание производительности труда и повышение качества выпускаемой продукции во многом зависят от того, насколько правильно определены условия обработки детали. Среди множества факторов, влияющих на эти условия, важное место занимает способность материала детали поддаваться обработке режущими инструментами, которую обычно называют обрабатываемостью.

Обрабатываемость материала является совокупностью многих его технологических свойств, воздействующих на различные стороны процесса резания. С практической точки зрения наибольший интерес представляют следующие показатели обрабатываемости:

интенсивность изнашивания рабочих поверхностей инструмента при обработке данного металла, определяющая уровень скорости резания, с которой целесообразно работать, и находящаяся в тесной связи с производительностью и себестоимостью обработки;

качество окончательно обработанной поверхности детали, которое характеризуется шероховатостью поверхности, точностью размеров и формы детали, остаточными напряжениями в поверхностном слое детали и т. д.;

величина силы резания, по которой можно определить прочность и жесткость отдельных деталей станка, деформации инструмента и детали, мощность, расходуемую на резание;

характер образования, форма и легкость отвода стружки, играющие важную роль при таких операциях, как глубокое сверление, нарезание резьб в глухих отверстиях, работа на токарных автоматах и т. д.

В зависимости от особенностей операции выбирается наиболее важная характеристика обрабатываемости, но во всех случаях, прямо или косвенно, эти характеристики связаны с интенсивностью затупления инструмента, которая определяется уровнем скорости резания.

Таким образом, в большинстве случаев обрабатываемость металла определяется путем нахождения зависимости $T=f(v)$ при прочих параметрах процесса резания, близких к оптимальным, т. е. обеспечивающих требования к качеству и стоимости детали.

Впервые изучение зависимости $T=f(v)$ было проведено в 1905 г. Тейлором. На основе экспериментальных исследований он установил, что при крупных сечениях

среза зависимость стойкости от скорости с достаточным приближением можно охарактеризовать уравнением

$$T = C_T / v^\mu; \quad v = C_v / T^m, \quad (1)$$

где C_T , C_v — коэффициенты, зависящие от свойств обрабатываемого материала, материала и геометрических параметров инструмента, параметров сечения среза, условий охлаждения и т. д.;

μ — показатель степени, отражающий интенсивность влияния v на T .

Однако в дальнейшем было установлено, что формула (1) пригодна для описания зависимости $T=f(v)$ далеко не во всех случаях, так как в зависимости от сочетания параметров резания величина μ изменяется в значительных пределах. К середине 50-х годов в связи с совершенствованием технологических процессов механической обработки, широким внедрением в производство агрегатных станков и автоматических линий, появлением машинных методов расчета режимов возникла необходимость получить уравнение, описывающее $T=f(v)$ в широком диапазоне условий резания. Были получены весьма сложные зависимости, ни одна из которых не имеет физического обоснования на основе современных теорий износа и стойкости режущих инструментов. Поэтому при выборе уравнения необходимо учитывать объем экспериментальных материалов и производственного опыта, лежащего в их основе.

В последние годы в связи с расширением круга обрабатываемых и инструментальных материалов, установлено, что в широком диапазоне режимов резания зависимости $T=f(v)$ практически всегда имеют сложный характер. Г. И. Темчин приводит схемы типовых зависимостей $T=f(v)$ в двойной логарифмической сетке координат (рис. 9.1).

Здесь линия T соответствует степенной зависимости в формуле (1). Линии D_1 и D_2 соответствуют зависимостям, когда с уменьшением скорости стой-

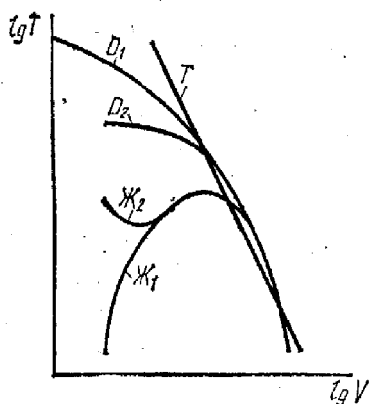


Рис. 9.1. Виды зависимостей «стойкость—скорость»

кость стремится к предельному значению. Линии $\mathcal{J}_1$ и $\mathcal{J}_2$ имеют одну или две экстремальные стойкости. В литературе имеются данные, позволяющие дать объяснения сложному характеру зависимостей $T=f(v)$ как с физической, так и с организационной точки зрения.

Среди факторов, влияющих на функцию $T=f(v)$, можно выделить: изменение физической природы изнашивания по мере возрастания скорости резания; изменение твердости и прочности инструментального материала по мере возрастания скорости резания; возникновение вибраций в определенных диапазонах условий резания и вследствие этого падение стойкости; образование нароста, которое происходит наиболее бурно при малых скоростях резания и резко снижает стойкость инструмента; снижение допускаемых величин износа при многоинструментальной обработке и снижение в связи с этим показателя степени; преждевременное снятие работоспособных инструментов одновременно с изношенными (организационно-техническая причина).

Анализ зависимостей $T=f(v)$ приводит к выводу, что для каждого вида обработки, обрабатываемого и инструментального материала существует максимально достижимое, предельное значение стойкости $T_{\text{пр}}$. Ориентировочные значения $T_{\text{пр}}$ по данным автомобильной промышленности приведены в табл. 9.1.

При обработке большинства конструкционных материалов зависимость $T=f(v)$ описывается линией типа D (см. рис. 9.1). В условиях одноинструментной обработки оптимальные значения периодов стойкости находятся на участке правой ниспадающей ветви и зависимость $T=f(v)$ описывается уравнением (1). Такие уравнения получили широкое распространение и приняты для расчетов во всех изданиях общемашиностроительных нормативов по режимам резания.

Существуют различные методы определения обрабатываемости. *Классический метод* заключается в определении зависимостей $v=f(T)$ для различных материалов. Путем замера износа резца через небольшие промежутки времени, задавшись определенным периодом стойкости T , можно найти соответствующие ему скорости резания v_{T_1} , v_{T_2} ... и определить коэффициент обрабатываемости:

$$k_0 = v_{T_1} / v_{T_2}. \quad (2)$$

Классический метод наиболее точно и объективно от-

Таблица 9.1

Инструмент	Обрабатываемый материал	Инструментальный материал	$T_{пр}$, мин
Резцы	Сталь	Быстрорежущая сталь	1500
	Чугун	»	1000
	Сталь	Твердые сплавы	600
	Чугун	»	1500
Сверла	Сталь	Быстрорежущая сталь	700
	Чугун	»	1500
	Сталь	Твердые сплавы	600
	Чугун	»	1000
Зенкеры	Сталь	Быстрорежущая сталь	700
	Чугун	»	1500
	Сталь	Твердые сплавы	500
	Чугун	»	1000
Фрезы	Сталь	Быстрорежущая сталь	3000
	Чугун	»	1500
	Сталь	Твердые сплавы	600
	Чугун	»	2000

ражает влияние обрабатываемого материала на интенсивность износа инструмента, однако он очень трудоемок и требует большого расхода обрабатываемого материала и инструмента. Поэтому в настоящее время разработаны ускоренные методы определения обрабатываемости. Рассмотрим некоторые из них.

Метод торцевой обточки заключается в том, что диск, изготовленный из испытуемого материала, обтачивают на токарном станке по торцу от центра к периферии с постоянной частотой вращения (рис. 9.2). При этом скорость резания постоянно возрастает, и на какой-то скорости наступает затупление резца. Параметры уравнения (1) получаются следующим образом:

$$Tv^h = C_v^h. \quad (3)$$

При переменной скорости резания, имеющей место в нашем случае, получим:

$$T v_{cp}^{\mu} = C_v^{\mu}. \quad (4)$$

В пределах изменения скорости резания от v_0 до v_n имеем:

$$v_{cp}^{\mu} = \frac{\int_{v_0}^{v_n} v^{\mu} dv}{v_n - v_0} = \frac{v_n^{\mu+1} - v_0^{\mu+1}}{(\mu + 1)(v_n - v_0)}, \quad (5)$$

где v_0 и v_n — скорости начала резания и момента затупления резца.

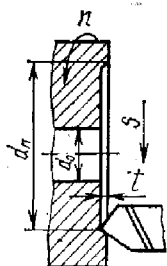


Рис. 9.2. Схема торцевой обточки

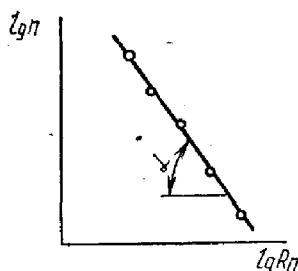


Рис. 9.3. Схема графической обработки результатов опытов по методу торцевой обточки

Время резания при торцевом точении от начального до конечного диаметра (в нашем случае стойкость резца) равно:

$$T = \frac{L}{nS} = \frac{d_n - d_0}{2nS} = \frac{1000(v_n - v_0)}{2\pi n^2 S}, \quad (6)$$

тогда

$$\frac{1000(v_n - v_0)}{2\pi n^2 S} \cdot \frac{v_n^{\mu+1} - v_0^{\mu+1}}{(\mu + 1)(v_n - v_0)} = C_v^{\mu}.$$

При условии, что $v_n^{\mu+1} \gg v_0^{\mu+1}$, получим уравнение:

$$1000 v_n^{\mu+1} \approx 2\pi n^2 S (\mu + 1) C_v^{\mu}. \quad (7)$$

В уравнении (7) — два неизвестных (C_v и μ), которые можно найти, сделав проточку торца до затупления резца при двух разных частотах вращения n_1 и n_2 . Решив систему уравнений, получим:

$$\mu = \frac{2 \lg \frac{n_1}{n_2}}{\lg \frac{v_{n_1}}{v_{n_2}}} - 1; \quad (8)$$

$$C_v = \sqrt[\mu]{\frac{1000 v_n^{\mu+1}}{2\pi n^2 S (\mu+1)}}. \quad (9)$$

Величина μ может быть легко получена графическим путем. Если в двойной логарифмической системе координат расположить по оси абсцисс значения радиусов R_n , на которых произошло затупление резца, а по оси ординат — соответствующие частоты вращения n , то линия, проведенная через экспериментальные точки, будет прямой (рис. 9.3) с углом наклона α , причем

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\mu + 1}{\mu - 1}. \quad (10)$$

Действительно, из уравнения (7) получаем:

$$\begin{aligned} \frac{\mu + 1}{2} &= \frac{\lg n_1 - \lg n_2}{\lg v_{n_1} - \lg v_{n_2}} = \frac{\lg n_1 - \lg n_2}{\lg 2\pi + \lg r_1 n_1 - \lg 2\pi - \lg r_2 n_2} = \\ &= \frac{\lg n_1 - \lg n_2}{(\lg n_1 - \lg n_2) + (\lg r_1 - \lg r_2)}; \\ \frac{2}{\mu + 1} &= 1 + \frac{\lg r_1 - \lg r_2}{\lg n_1 - \lg n_2}; \\ \frac{2}{\mu + 1} - 1 &= \frac{\lg r_1 - \lg r_2}{\lg n_1 - \lg n_2}; \quad \frac{2 - \mu - 1}{\mu + 1} = \frac{\lg r_1 - \lg r_2}{\lg n_1 - \lg n_2}; \\ \frac{\mu + 1}{\mu - 1} &= - \frac{\lg n_1 - \lg n_2}{\lg r_1 - \lg r_2} = \operatorname{tg} \alpha, \end{aligned}$$

$$\text{тогда } \mu + 1 = \mu \operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \alpha \text{ и } \mu = \frac{1 + \operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \alpha - 1}. \quad (11)$$

Изложенная выше методика позволяет графически обработать совокупность опытных точек, полученных на большом количестве частот вращения шпинделя, что уменьшает вероятность случайных ошибок.

Подставив величины, полученные из уравнения (9) и (11), в уравнение (1), можно определить скорость резания для данного сечения стружки, соответствующую экономически выгодной для данных условий стойкости инструмента

$$v_T = v_n \sqrt[n]{\frac{Dn}{2Sn(\mu + 1)T}}, \quad (12)$$

где D — диаметр, на котором затупился резец.

Второй из ускоренных методов определения обрабатываемости — *метод А. С. Кондратова* — основан на положении, что интенсивность износа резца практически не зависит от величины износа. Сущность метода заключается в том, что заготовку из исследуемого материала

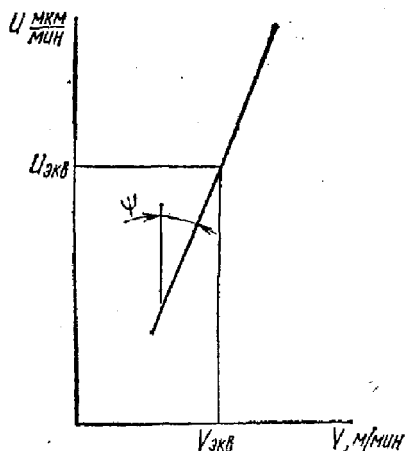


Рис. 9.4. Связь между скоростью резания и интенсивностью износа резца (метод А. С. Кондратова)

обтачивают при постоянных подаче и глубине резания одним резцом с различными скоростями резания. Для каждого значения скорости $v_1, v_2, \dots, v_n$ определяют прирост линейного износа задней поверхности резца $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_n$, соответствующий времени работы резца $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$, после чего определяют интенсивность износа $u_1 = \Delta_1/\tau_1, u_2 = \Delta_2/\tau_2, \dots, u_n = \Delta_n/\tau_n$. Затем в двойной логарифмической сетке координат строят зависимость $u = f(v)$, представ-

ляющую собой прямую линию, тангенс угла наклона которой к оси u равен показателю относительной стойкости m в формуле $v = C/T_m$ (рис. 9.4). Далее определяют эквивалентную за весь период времени работы резца интенсивность износа

$$u_{\text{экр}} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i}{\sum_{i=1}^n \tau_i} \quad (13)$$

и по графику $u = f(v)$ находят скорость резания $v_{\text{экр}}$, соответствующую $u_{\text{экр}}$. Тогда величина $C_v = v_{\text{экр}} \left(\sum_{i=1}^n \tau_i \right) \operatorname{tg} \psi$.

Данный метод снижает трудоемкость эксперимента в 6... 10 раз.

Положение о постоянстве интенсивности износа на участке равномерного износа лежит в основе метода А. Д. Макарова. Он заключается в построении кривых износа только на начальном участке с последующей их экстраполяцией до величины $h_{з.кр}$ (рис. 9.5).

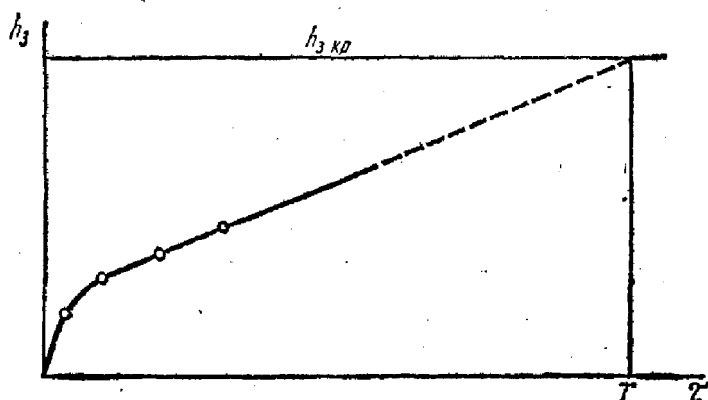


Рис. 9.5. Экстраполяция кривой износа (метод А. Д. Макарова)

Обрабатываемость материала можно ускоренно оценить также по величине некоторых физических характеристик процесса резания, таких как сила резания, температура, коэффициент усадки стружки и т. д. В этом случае экспериментальным путем определяют влияние отдельно скорости резания, глубины и подачи на рассматриваемый параметр. Затем при обработке экспериментальных данных этот параметр исключают и находят взаимосвязь между v , S и t для исследуемого материала. После этого проводят незначительное количество обычных стойкостных испытаний, определяют взаимосвязь величины стойкости с исследуемым параметром и зависимость стойкости от уровня режима резания.

Методика выполнения работы

Лабораторное оборудование: токарно-винторезный станок; заготовка (диск) из стали; резцы токарные проходные — 5; угломер; тахометр; штангенциркуль.

Эксперименты проводятся при торцевом точении диска при постоянной поперечной подаче и глубине резания. Штангенциркулем измеряют диаметр, на котором произошло затупление и строят график в координатах

$\lg R_n - \lg n$ (см. рис. 9.2). По графику и формулам (9, 11, 12) определяют величины μ , C_v и v_T .

Требования к оформлению работы

В отчете необходимо отразить условия, в которых выполнялись опыты; результаты экспериментов; построить график $\lg R_n - \lg n$; рассчитать величины μ , C_v , v_T , сделать выводы.

Протокол лабораторной работы 9

Исследование обрабатываемости стали

Условия проведения опытов

Модель станка

Материал режущей части резца

Геометрические параметры резца

Обрабатываемый материал

Сечение срезаемого слоя

Результаты опытов

Номер п.п.	Частота вращения заготовки n , об/мин	Диаметр, на котором произошло затупление D_n , мм

График зависимости $\lg n = f(\lg R_n)$

Рассчитать величины μ , C_v , v_T

Лабораторная работа 10

ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА ШЕРОХОВАТОСТЬ ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ТОЧЕНИИ

Цель работы. Определение влияния скорости резания, подачи и главного угла в плане на шероховатость обработанной поверхности; приобретение практических навыков измерения шероховатости; ознакомление с конструкцией приборов для измерения шероховатости.

Вопросы для самоконтроля. 1. Что понимается под шероховатостью обработанной поверхности; какими параметрами она характеризуется? 2. Как геомет-

рически определить высоту микронеровностей? 3. От каких факторов зависит расчетная высота микронеровностей? 4. В чем причины несоответствия величин расчетных и действительных микронеровностей? 5. Как на это несоответствие влияет наростообразование? 6. Влияние скорости резания на шероховатость обработанной поверхности. 7. Что больше влияет на шероховатость — подача или глубина резания и почему? 8. Как влияют на шероховатость свойства обрабатываемого материала? 9. В чем проявляется влияние на шероховатость углов резца? 10. Какую роль играет технологическая среда?

Краткие теоретические сведения

Разрушение деталей машин в процессе их эксплуатации в большинстве случаев начинается с поверхностного слоя. Поэтому большое практическое значение имеет изучение качества поверхности детали и влияния на него различных факторов процесса резания. Качество обработанной поверхности характеризуется ее шероховатостью, микроструктурой, степенью и глубиной наклепа, величиной и знаком остаточных напряжений и другими признаками.

Шероховатость — одна из основных характеристик качества поверхности. Она представляет собой совокупность неровностей с относительно малыми шагами, образующих микрорельеф поверхности. Для количественной оценки шероховатости поверхности ГОСТ 2789—79 устанавливает следующие параметры:

Ra — среднее арифметическое отклонение профиля;

Rz — высота неровностей профиля по десяти точкам;

$R_{\max}$ — наибольшая высота профиля;

S_m — средний шаг неровностей профиля;

S — средний шаг местных выступов профиля;

tp — относительная опорная длина профиля, где p — значение уровня сечения профиля; p выбирается из ряда 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 % от $R_{\max}$.

Величина Ra определяется как среднее арифметическое абсолютных значений отклонений профиля в пределах базовой длины (рис. 10.1)

Высоту микронеровностей можно определить из геометрических построений, сделав следующие допущения: обрабатываемый материал не подвергается деформации; система СПИД — абсолютно жесткая; режущие кромки инструмента являются геометрическими линиями. В том случае, когда у резца отсутствует радиус вершины, высоту микронеровностей можно определить из соотношений (рис. 10.2, а):

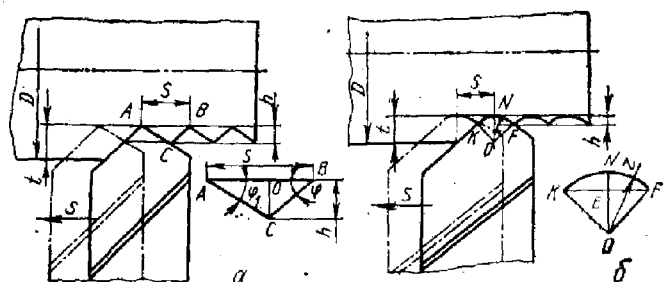


Рис. 10.2.

$$\begin{aligned} AO &= OC \operatorname{ctg} \varphi_1; \quad OB = OC \operatorname{ctg} \varphi = h \operatorname{ctg} \varphi; \\ AO + OB &= S = h (\operatorname{ctg} \varphi + \operatorname{ctg} \varphi_1) = h \frac{\sin (\varphi + \varphi_1)}{\sin \varphi \sin \varphi_1}; \\ h &= Rz = \frac{S \sin \varphi \sin \varphi_1}{\sin (\varphi + \varphi_1)}. \end{aligned} \quad (10.1)$$

Когда работает только радиусная режущая кромка (рис. 10.2, б), получаем

$$\begin{aligned} h &= EN = ON - OE; \quad OE = \sqrt{OK^2 - KE^2} = \frac{\sqrt{4r^2 - S^2}}{2}; \\ h &= Rz = r - \frac{\sqrt{4r^2 - S^2}}{2}. \end{aligned} \quad (10.2)$$

При одновременной работе прямолинейной и радиусной частей режущей кромки

$$h = Rz = r - \frac{r (\sin \varphi + \sin \varphi_1) - S \sin \varphi \sin \varphi_1}{\sin (\varphi + \varphi_1)}. \quad (10.3)$$

Таким образом, расчетные неровности при точении определяются величинами подачи, углов в плане и радиуса вершины. Однако действительные размеры и форма микронеровностей значительно отличаются от расчетных.

Это вызвано совместным действием таких процессов, как пластическое течение материала из зоны первичной деформации в сторону вершин микронеровностей; колебания детали и инструмента во время резания; образование и срывы нароста; изнашивание контактных площадок инструмента и другие. Одним из наиболее активно проявляющих себя процессов является наростообразование. Его влияние на формирование микронеровностей можно охарактеризовать следующим образом. В результате адгезионного взаимодействия на контактных площадках образуется нарост. Постепенно он увеличивает свои размеры и все больше внедряется в обрабатываемую заготовку ниже номинальной линии среза.

Это увеличивает сопротивление внедрению, зарождается трещина разрушения. При разрушении нароста он разделяется на три части — одна из них прочно скреплена со стружкой и уносится с ней, вторая остается на передней поверхности и служит основой для формирования нового нароста, а третья — остается на обработанной поверхности и влияет на расположение и размеры микронеровностей, образуя характерную чешуйчатость.

Наростообразование в значительной степени объясняет влияние на шероховатость скорости резания. При малых скоростях резания, когда нарост отсутствует, высота микронеровностей невелика. При увеличении скорости высота нароста растет, и вместе с ней растет высота микронеровностей, достигая максимума в зоне наиболее интенсивного наростообразования. Далее нарост уменьшается, вызывая уменьшение шероховатости. После исчезновения нароста отмечается ее дальнейшее снижение, которое обусловлено уменьшением объема пластической деформации и среднего коэффициента трения на площадках контакта. Если обрабатываемый материал не склонен к наростообразованию, высота микронеровностей монотонно уменьшается с ростом скорости резания, хотя степень этого уменьшения и невелика.

Когда скорость резания достигает 120—150 м/мин, она в большинстве случаев практически перестает влиять на шероховатость.

Подача, углы в плане, радиус вершины влияют на высоту микронеровностей, как показано в формулах (10.1)—(10.3): при уменьшении подачи, углов φ и φ_1 и увеличении радиуса r шероховатость уменьшается. Следует отметить, что, помимо чисто геометрического

влияния, здесь сказывается действие этих параметров на наростообразование.

Глубина резания (ширина среза) и передний угол инструмента значительного влияния на высоту микронеровностей не оказывают. С повышением твердости и прочности обрабатываемого материала и снижением его пластичности шероховатость уменьшается вследствие снижения среднего коэффициента трения и объема пластической деформации и меньшей интенсивности наростообразования.

Влияние технологической среды на шероховатость обработанной поверхности проявляется в первую очередь в изменении интенсивности наростообразования и величины среднего коэффициента трения вследствие образования на контактных площадках инструмента смазочных пленок. В результате их частичного или полного исчезновения при высоких скоростях резания действие технологической среды ослабевает, а отличия в характере влияния различных сред исчезают.

Выше указывалось, что высоту микронеровности на обработанной поверхности нельзя определить из чисто геометрических построений. Поэтому предпринимались многочисленные попытки подобрать для расчета эмпирические зависимости. Среди них можно привести, например

$$Rz = S^2/8r,$$

или

$$Rz = \frac{S^2}{8r} + \frac{a_{\min}}{2} \left(1 + \frac{ra_{\min}}{S^2} \right), \quad (10.5)$$

где $a_{\min} = kS\sqrt{t/2r}$ — минимальная толщина срезаемого слоя;

k — коэффициент, учитывающий уменьшение размеров сечения среза и механические свойства материала; для стали 45 величина $k \approx 0,3$.

Наиболее же распространенными являются степенные зависимости, широко используемые в резании металлов и аналогичные приведенным в работах 6, 7 и других.

Методика выполнения работы

Лабораторное оборудование: токарно-винторезный станок; заготовка; профилометр; резцы токарные проход-

ные, оснащенные пластинками твердого сплава; прибор для измерения углов резца; тахометр; штангенциркуль.

Заготовка для проведения экспериментов представляет из себя набор дисков равного диаметра и толщины, закрепленных на оправке со шпонкой. Между дисками установлены распорные втулки, зажим производится гайкой. На торцах дисков набиты номера. Каждый опыт выполняется на одном каком-либо диске. При поочередном выполнении опытов и переходе с одного диска на другой их номера следует фиксировать и вместе с условиями проведения опытов заносить в протокол.

Резцы имеют одинаковые геометрические параметры, за исключением углов в плане. Величина углов контролируется измерительными приборами.

Перед началом работы следует ознакомиться с оборудованием и приборами, измерить углы резца, убедиться в тщательности закрепления заготовки и резцов на станке, в наличии заземления профилометра. До начала опытов диски протачивают при постоянном режиме резания, обеспечивая равенство их диаметров, чтобы исключить влияние предыдущей обработки на формирование микронеровностей. После этого проводятся три серии опытов. В первой серии определяется зависимость величины Ra от главного угла в плане при постоянной скорости резания $v \approx 100$ м/мин и подаче $S = 0,52$ мм/об. Используются резцы с главными углами в плане $\phi = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$.

Вторая серия опытов устанавливает зависимость Ra от подачи при постоянной скорости резания $v \approx 100$ м/мин и главном угле резца в плане $\phi = 45^\circ$. Значения подачи принимаются равными $S = 0,084; 0,14; 0,26; 0,52; 0,95$ мм/об.

В третьей серии опытов определяется зависимость Ra от скорости резания при постоянной подаче $S = 0,52$ мм/об и главном угле резца в плане $\phi = 45^\circ$. Значения скоростей резания принимаются равными $v = 2; 20; 50; 100; 150$ м/мин. Необходимые частоты вращения заготовки (об/мин) подсчитываются до проведения опытов по формуле $n = 1000 v / \pi D$, где D — диаметр диска. Затем подбирается ближайшая имеющаяся на станке частота вращения шпинделя, которая проверяется тахометром, и подсчитывается действительное значение скорости резания. Это значение записывается в протокол. Глубина резания принимается постоянной.

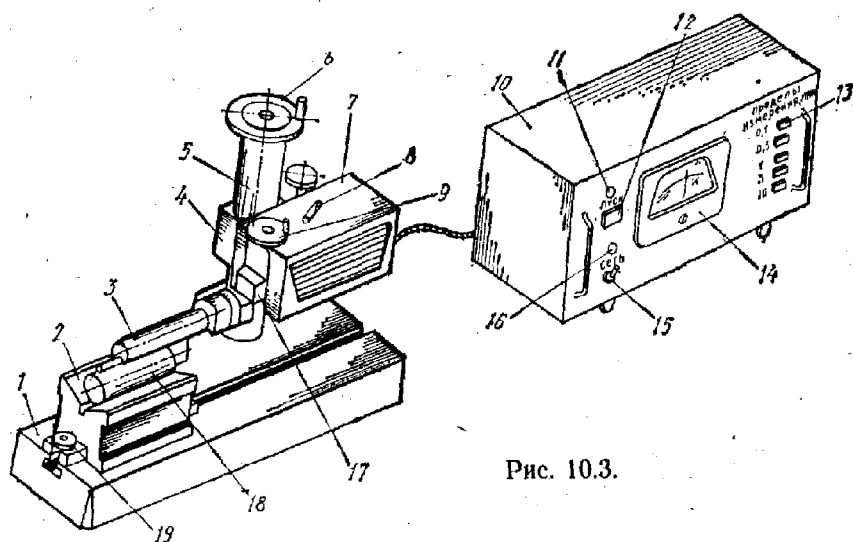


Рис. 10.3.

Устройство профилометра модели 283. На плите 1 (рис. 10.3) установлена и жестко закреплена колонка 5, внутри которой находится ходовой винт, перемещающий кронштейн 4. Вращение винта осуществляется маховичком 6. К кронштейну 4 крепится привод 7, в штоке 17 которого устанавливается на шарнире датчик-механотрон 3. На щупе датчика укреплен алмазная игла с радиусом закругления 10 мкм и твердосплавная опора. Перемещение датчика по измеряемой поверхности осуществляется приводом.

Датчик и привод кабелями соединяются с электронным блоком 10. На передней панели блока расположены показывающий прибор 14, тумблер включения сети 15, сигнальные лампы 11 и 16, переключатель пределов измерений 13, кнопка пуска хода датчика 12.

Работа на профилометре осуществляется следующим образом. Деталь 18 устанавливается в призме 2, которая крепится к плите 1 двумя зажимными винтами 19. Прибор включается в сеть тумблером 15, после включения должна загореться сигнальная лампа 16. Кронштейн 4 с приводом 7 и датчиком 3 подводится к детали маховичком 6 и опускается на измеряемую поверхность детали маховичком 9 до тех пор, пока не совпадут треугольные знаки на планке датчика и штоке 17 привода. После этого положение датчика стопорится. На переключателе пределов измерения нажимается кнопка предполагаемого диапазона шероховатости измеряемой поверхности.

Рычажком 8, расположенным на приводе, устанавливается требуемая отсечка шага. При этом следует учитывать, что перемещение датчика при отсечке шага 0,25 мм равно 2 мм, а при отсечке шага 0,8 мм — 6,4 мм. Нажимается кнопка 12 пуска хода датчика, при этом должна загореться сигнальная лампа 11, которая свидетельствует о движении датчика. После остановки датчика (сигнальная лампа погаснет) производится отсчет величины Ra по шкале показывающего прибора 14.

В том случае, когда стрелка показывающего прибора уходит за пределы шкалы или не доходит до рабочего участка, необходимо выбрать более высокий или более низкий предел измерения, нажать соответствующую кнопку на электронном блоке и повторить измерение.

Предварительная проверка работы профилометра производится по эталонному образцу шероховатости, входящему в комплект прибора. Измерения производятся в трех сечениях каждого диска, результаты измерений заносятся в протокол. После этого следует определить среднее значение величины Ra в каждой экспериментальной точке и построить графики зависимости $Ra = f(\varphi, S, v)$. По формулам (10.3) — (10.5) определяется расчетная высота микронеровностей и сравнивается с экспериментальной (при этом следует принимать $Ra \approx 0,25 R_z$).

Полученные данные сопоставляют с приведенными в справочниках, учебниках, конспектах и делают выводы о влиянии скорости резания, подачи, главного угла в плане на шероховатость обработанной поверхности.

Требования к оформлению работы

В отчете необходимо отразить: условия проведения опытов (станок, инструмент, обрабатываемый материал); результаты опытов; построить графики зависимостей $Ra = f(\varphi)$, $Ra = f(S)$, $Ra = f(v)$; сравнить результаты экспериментов с расчетными; сделать выводы.

Протокол лабораторной работы 10

Влияние различных факторов на шероховатость обработанной поверхности при точении

Условия проведения опытов

Модель станка

Материал режущей части резца

Геометрические параметры резца

Обрабатываемый материал

Глубина резания

Результаты измерений (записываются по форме, приведенной ниже по каждому пункту в отдельности):

- а) влияние изменения главного угла в плане на величину Ra ;
- б) влияние изменения подачи на величину Ra ;
- в) влияние изменения скорости резания на величину Ra .

Номер п. п.	Номер диска	Частота вращения шпинделя n , об/мин	Диаметр диска D , мм	Скорость резания v , м/мин	Подача S , мм/об	Главный угол в плане ϕ , град	Измеренное значение Ra , мкм				Значение Rz , рассчитанное по формулам		
							I сечение	II сечение	III сечение	среднее	(10.3)	(10.4)	(10.5)

Графики зависимостей $Ra=f(\phi, S, v)$. Результаты сравнения экспериментальных и расчетных значений Ra .

Лабораторная работа 11

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ РЕЖИМА РЕЗАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НОРМАТИВНО-СПРАВОЧНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Цель работы. Приобретение практических навыков определения режима резания по нормативно-справочной литературе; ознакомление со структурой справочников.

Вопросы для самоконтроля. 1. Перечислите параметры, характеризующие станок, заготовку и инструмент. 2. Какова последовательность назначения режима резания? 3. С каких позиций производится выбор инструментального материала и геометрии инструмента? 4. Подход к назначению глубины резания. 5. Какие проверочные расчеты необходимы при выборе подачи в случае черновой обработки? чистовой обработки? точения? сверления? 6. Какой из элементов срезаемого слоя (подачу или глубину) следует изменять в случае необходимости уменьшения силы резания? 7. Из каких соображений принимают нормативное значение периода стойкости ин-

струмента? 8. Чем различаются нормативный и фактический периоды стойкости? 9. Какие требования следует предъявлять к точности расчетов наивыгоднейшего периода стойкости и его соблюдения на производстве? 10. Как производится расчет скорости резания, обеспечивающей заданную стойкость? 11. Как при назначении режима резания учитываются особенности условий обработки? паспортные данные станка? 12. В каких случаях и как производится проверочный расчет по мощности резания?

Краткие теоретические сведения

Одной из задач оптимизации технологического процесса изготовления детали является выбор наивыгоднейших режимов механической обработки для каждой операции, т. е. для процесса обработки заготовки на одном рабочем месте в соответствии с техническими условиями на деталь: точностью размеров и геометрической формы, шероховатостью обработанной поверхности и т. д.

Каждая технологическая операция имеет свои особенности в зависимости от параметров заготовки, станка и инструмента. К параметрам заготовки относятся ее габариты, снимаемый припуск, свойства обрабатываемого материала и т. д.

Среди параметров, характеризующих станок, выделяются параметры непосредственно станка, режимов резания и вспомогательных движений станка. Под параметрами непосредственно станка понимают его элементы, влияющие на допустимые размеры обрабатываемой детали (высота центров токарного станка; площадь стола фрезерного станка и т. д.); диапазон изменения режимов резания, определяемый кинематикой станка (частотой вращения шпинделя и подачи); усилия резания, допускаемые прочностью рабочих механизмов станка; жесткость и виброустойчивость станка; эффективная мощность электродвигателей.

Параметры вспомогательных движений станка определяют время холостых ходов на станке.

К параметрам режима резания относятся такие, которые определяют время обработки детали: рабочая подача станка; частота вращения шпинделя станка и скорость резания; длина рабочего хода, если она определяется кинематикой станка; число проходов, за которое обрабатывается деталь.

К параметрам инструмента относятся: инструментальный материал; конструктивные и геометрические параметры инструмента (габариты резца, твердоплавленной пластинки и углы заточки режущей части; диаметр и длина рабочей части сверла; диаметр и число зубьев фрезы и т. д.); допустимое количество переточек.

Разработка технологического процесса механической обработки детали заключается в рациональном выборе всех перечисленных параметров. При этом заранее известны такие факторы, как: способ получения заготовки и ее твердость; припуск на обработку; конструкция инструмента; характеристики станка, который используется для выполнения операции, и ряд других.

Определение параметров процесса обработки может производиться либо с использованием методов оптимизации по различным критериям (см. лабораторную работу 12), либо на основе приближенных расчетов с применением нормативов (справочников). В последнем случае принята такая последовательность расчетов.

1. *Выбор материала режущей части инструмента.*
2. *Определение оптимальной геометрии инструмента* в зависимости от свойств обрабатываемого материала и условий обработки.

3. *Назначение глубины резания* с учетом величины припуска на обработку. При черновой обработке желательно назначать глубину резания, соответствующую срезанию припуска за один проход. Количество проходов свыше одного при черновой обработке следует допускать в исключительных случаях при снятии повышенных припусков. Получистовая обработка часто производится в два прохода. Первый, черновой, проход осуществляется с глубиной резания $t = (0,6—0,75)h$, а второй, окончательный, с $t = (0,3—0,25)h$. Обработка в два прохода в этом случае диктуется тем, что при снятии слоя толщиной свыше 2 мм за один проход качество обработанной поверхности получается низким, а точность ее размеров недостаточна. При чистовой обработке глубины резания назначают в зависимости от точности и шероховатости поверхности в пределах 0,5—2,0 мм на диаметр, а при обработке с шероховатостью поверхности менее $Ra\ 1,25$ —в пределах 0,1—0,4 мм.

Глубина является первым из назначаемых элементов режима резания, затем следует выбор подачи и скорости резания, обеспечивающей требуемую стойкость. Такая

последовательность обусловлена влиянием элементов режима резания на температуру в зоне резания и интенсивностью изнашивания рабочих поверхностей инструмента.

4. *Выбор подачи* *. При черновой обработке она устанавливается с учетом жесткости системы станок — инструмент — деталь; прочности детали, способа ее крепления (в патроне, в центрах и т. д.), прочности и жесткости режущего инструмента, прочности механизма подачи станка, а также установленной глубины резания. После выбора нормативной величины подачи производят проверочные расчеты.

Например, подачу, выбранную для чернового точения с заданной глубиной резания, проверяют по осевой силе резания и по прочности механизма подачи станка. При этом определяют для данного обрабатываемого материала глубину резания и подачу, осевую силу и сопоставляют ее с силой, допускаемой механизмом подачи станка, которая указывается в его паспорте. Осевая сила резания должна быть меньше или в крайнем случае равна силе, допускаемой механизмом подачи. При работе с большими сечениями среза или с большим вылетом резца выбранную подачу проверяют также по точности его державки и пластинки твердого сплава. Если выбранная подача не удовлетворяет данным условиям, то необходимо понизить ее до допустимой величины. Уменьшение величины подачи снижает силу резания, но глубина резания влияет на силу более значительно. Тем не менее уменьшают именно подачу, так как при уменьшении глубины сразу появляется необходимость во втором проходе и возрастает время обработки. Кроме того, глубина резания только в малой степени влияет на изменение периода стойкости инструмента и величины v_T , тогда как при уменьшении подачи v_T возрастает.

При чистовом точении назначение подачи необходимо согласовывать с заданной величиной шероховатости обработанной поверхности и качеством точности, учитывая при этом возможную величину прогиба детали под действием сил резания и погрешности геометрической формы обработанной поверхности.

— Для расчета сил резания применяются степенные зависимости вида

* При точении и сверлении выбирается подача S_0 , мм/об; при фрезеровании — S_z , мм/зуб.

$$P_z = C_{P_z} t^{x_{P_z}} S^{y_{P_z}} v^{z_{P_z}} k_{P_z}; \quad (11.1)$$

$$P_y = C_{P_y} t^{x_{P_y}} S^{y_{P_y}} v^{z_{P_y}} k_{P_y}; \quad (11.2)$$

$$P_x = C_{P_x} t^{x_{P_x}} S^{y_{P_x}} v^{z_{P_x}} k_{P_x}. \quad (11.3)$$

Показатели степеней x, y, z и коэффициенты C_p, k_p учитывают конкретные условия работы резца.

Принятая величина подачи уточняется по паспорту станка. При этом принимают ближайшую из имеющихся на станке подач. Допускается принимать ближайшую большую, если она превышает нормативную не более чем на 10 %.

Для проверочных расчетов можно использовать следующие формулы:

подача, допускаемая жесткостью обрабатываемой детали:

$$S_{ж.д} = \sqrt[y_{P_y}]{\frac{f_d E_d \mu J}{1,1 C_{P_y} t^{x_{P_y}} v^{z_{P_y}} k_{P_y}}}, \quad (11.4)$$

где f_d — допустимая стрела прогиба детали, равная 20 % от поля допуска на деталь при чистовой обработке и 0,2—0,4 мм при черновой обработке; E_d — модуль упругости материала детали; μ — коэффициент, учитывающий особенности закрепления детали (в патроне, в центрах, патроне и центре); J — момент инерции сечения детали (для круглого профиля $J = 0,05 D^4$); l — длина детали; k_{P_y} — коэффициент, учитывающий измененные условия работы резца;

подача, допускаемая жесткостью резца:

$$S_{ж.р} = \sqrt[z_{P_z}]{\frac{f_p E_p B H^3}{4 C_{P_z} t^{x_{P_z}} v^{y_{P_z}} k_{P_z}}}, \quad (11.5)$$

где f_p — стрела прогиба резца, равная при черновом и чистовом точении соответственно 0,1 и 0,05 мм; $E_p = 200$ ГПа — модуль упругости державки резца; B — ширина державки резца; H — высота державки резца; l_p — длина вылета резца;

подача, допускаемая прочностью державки резца:

$$S_{п.р} = \sqrt[3]{\frac{v_{Pz} BH^3 [\sigma_H]}{6 C_{Pz} t^{x_{Pz}} l_p k_{Pz}}}, \quad (11.6)$$

где $[\sigma_H] = 200$ МПа — допускаемое напряжение на изгиб державки резца (незакаленной);

подача, допускаемая прочностью пластинки твердого сплава:

$$S_{п.п} = \sqrt[3]{\frac{v_{Pz} 34c^{1.25} \left(\frac{\sin 60^\circ}{\sin \varphi} \right)^{0.8}}{C_{Pz} t^{x_{Pz}} k_{Pz}}}, \quad (11.7)$$

где c — толщина твердосплавной пластинки; φ — главный угол в плане;

подача, допускаемая прочностью механизма подачи станка:

$$S_{п.ст} = \sqrt[3]{\frac{P_{ст}}{C_{Px} t^{x_{Px}} k_{Px}}}, \quad (11.8)$$

где $P_{ст}$ — сила, допускаемая прочностью механизма подачи станка (определяется по паспорту станка).

При сверлении выбранную величину подачи проверяют по прочности и устойчивости сверла под действием сил резания и прочности механизма подачи станка.

Крутящий момент и осевую силу в этом случае определяют по формулам

$$M_K = C_M D^{x_M} S^{y_M} k_M, \quad (11.9)$$

$$P_0 = C_P D^{x_P} S^{y_P} k_P, \quad (11.10)$$

где C_M , C_P , k_M , k_P — коэффициенты, учитывающие конкретные условия работы сверла; x , y — показатели степени. Для проверочных расчетов можно использовать следующие формулы:

подача, допускаемая прочностью сверла на кручение:

$$S_{п.к} = \sqrt[3]{\frac{0,0206 \cdot 10^{1.4m+0.2n'} \tau q^3}{C_M D^{x_M} k_{з.п} k_M}}, \quad (11.11)$$

где $m = K/D$; $n' = B'/D$; K — толщина сердцевины сверла;

B' — ширина пера в сечении, перпендикулярном к винтовой линии сверла; D — диаметр сверла; $\tau = 1650$ МПа — предел прочности материала сверла на кручение; q — диаметр спинки сверла; $k_{з.п.}$ — коэффициент запаса прочности;

подача, допускаемая прочностью сверла на сжатие:

$$S_{п.с} = \sqrt[3]{\frac{\nu_P}{C_P D^{x_P} k_{з.п.} k_P} \frac{kF[\sigma_s]}{C_P D^{x_P} k_{з.п.} k_P}}, \quad (11.12)$$

где $k = (0,22 - 0,25)$ — коэффициент, учитывающий завитость сверла; $F = 0,314 D^2$ — площадь поперечного сечения рабочей части сверла; $\sigma_s = 3 - 3,2$ ГПа — предел текучести при сжатии материала сверла; $k_{з.п.}$ — коэффициент запаса прочности;

подача, допускаемая продольной устойчивостью сверла:

$$S_{п.у} = \sqrt[3]{\frac{\nu_P}{C_P l_B D^{x_P} k_P} \frac{\eta \pi^2 E J_{\min}}{C_P l_B D^{x_P} k_P}}, \quad (11.13)$$

где $\eta = 1,67$ — коэффициент, учитывающий зависимость сверла; $E = 225$ МПа — модуль упругости материала сверла; $J_{\min} = 0,0054 D^4$ — минимальный момент инерции сверла; l_B — вылет сверла;

подача, допускаемая прочностью механизма подачи станка:

$$S_{п.ст} = \sqrt[3]{\frac{\nu_P}{C_P D^{x_P} k_P} \frac{P_{ст}}{C_P D^{x_P} k_P}}. \quad (11.14)$$

Необходимо отметить, что на практике проверочные расчеты по формулам (11.4)–(11.8), (11.11)–(11.14) выполняются редко ввиду их сложности. В случае необходимости используются таблицы предельно допустимых подач, приводимые в ряде справочников.

5. Определение скорости резания. Скорость резания, допускаемая режущим инструментом при определенном периоде его стойкости, зависит от глубины резания и подачи, материала режущей части и его геометрических параметров, от обрабатываемого материала, вида обработки, охлаждения и других факторов.

При данных значениях глубины резания, подачи и периода стойкости можно рассчитать скорость резания, обеспечивающую заданную стойкость: при точении

$$v = \frac{C_v}{T m_f^{x_v} S^{y_v}} k_v, \quad (11.15)$$

при сверлении

$$v = \frac{C_v}{T m D^x S^{y_v}} k_v, \quad (11.16)$$

при фрезеровании

$$v = \frac{C_v}{T m_f^{x_v} S^{y_v} B^{n_v} z^{q_v}} k_v, \quad (11.17)$$

где C_v — коэффициент, учитывающий условия работы инструмента, принятые в справочнике за основу; k_v — коэффициент, учитывающий отличие конкретных условий работы инструмента от принятых за основу; x_v, y_v, n_v, q_v — показатели степени.

Величины нормативных периодов стойкости принимаются с учетом экономических факторов и производственного опыта эксплуатации инструментов. Определяющими здесь могут являться требования производительности обработки, ее экономичности, затрат на эксплуатацию инструмента и другие. В конкретных условиях работы инструмента периоды стойкости могут быть различными.

Их значительное увеличение, однако, требует снижения скорости резания, а значит, и производительности обработки, что экономически невыгодно. Уменьшение периода стойкости по сравнению с нормативным на 25 % увеличивает стоимость обработки всего на 2%.

В справочниках скорости резания обычно приводятся в таблицах с учетом определенных условий работы. Если конкретные условия отличаются от тех, для которых составлена данная нормативная таблица, то при выборе скорости резания табличные значения умножаются на поправочные коэффициенты.

По расчетной скорости резания подсчитывают нужную частоту вращения шпинделя станка

$$n = \frac{1000v}{\pi D}. \quad (11.18)$$

6. *Корректировка элементов режима резания.* Полученную частоту вращения шпинделя уточняют по паспорту станка и принимают ближайшее меньшее из имеющихся на станке. Превышать расчетную частоту допускается не более чем на 10 %.

По действительной частоте вращения шпинделя определяют фактическую скорость резания $V_d = \pi D n_d / 1000$,

а при фрезеровании — действительную минутную подачу $S_m = S_z z n_d$.

7. Проверка выбранного режима резания по мощности станка осуществляется при черновой обработке. В этом случае должно соблюдаться соотношение $N_{рез} \leq \leq 1,3 \eta N_{ст}$, где η — коэффициент полезного действия привода главного движения, $N_{ст}$ — мощность электродвигателя; $N_{рез}$ — мощность резания, определяемая по таблицам или формулам, путем использования величин P_z и v или M_R и n .

Если оказывается, что мощности электродвигателя станка, на котором должна производиться обработка, не хватает, надо выбрать более мощный станок. Если же это невозможно, то необходимо уменьшить выбранную частоту вращения или подачу, перейдя на ближайшие меньшие. При этом надо остановиться на таком окончательном решении, при котором произведение nS будет наибольшим, так как в этом случае будет наименьшим машинное время обработки.

8. Определение машинного времени каждого прохода по формуле

$$t_m = \frac{l_1 + l + l_2}{nS}, \quad (11.19)$$

где l — длина обрабатываемой поверхности; l_1, l_2 — длины врезания и перебега, определяемые по таблицам; S — подача; n — частота вращения инструмента или детали.

Методика выполнения работы

Расчет режима резания выполняется по одному из следующих справочников:

1. Общемашиностроительные нормативы режимов резания для технического нормирования работ на металло-режущих станках. — М.: Машиностроение, 1974. Ч. 1. — 416 с.
2. Режимы резания металлов: Справочник / Под ред. Ю. В. Барановского. — М.: Машиностроение, 1972. — 407 с.
3. Справочник металлиста / Под ред. А. Н. Малова. — М.: Машиностроение, 1977. Т. 3. — 748 с.
4. Справочник нормировщика-машиностроителя / Под ред. Е. И. Стружестраха — М.: Машгиз, 1961. Т. 2. — 892 с.

В задание входит расчет режимов резания при точении и сверлении (фрезеровании).

Задание на расчет, модель станка и его паспортные данные задаются преподавателем.

Требования к оформлению отчета

В отчете необходимо привести исходные данные для расчета, последовательность и результаты расчетов, указать найденные элементы режима резания.

Протокол лабораторной работы 11

Определение элементов режима резания с использованием нормативно-справочной литературы

Исходные данные
Результаты расчетов
Элементы режима резания.

Лабораторная работа 12

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО ВАРИАНТА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ РЕЗАНИЯ МЕТОДОМ ЛИНЕЙНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

Цель работы. Приобретение навыков использования методов оптимизации, в частности метода линейного программирования, для определения оптимального варианта функционирования системы резания.

Вопросы для самоконтроля. 1. Что из себя представляет система резания? 2. Назовите независимые переменные факторы и параметры функционирования системы резания. 3. В чем заключается задача выбора оптимальных условий функционирования системы резания? 4. В чем смысл технических ограничений, накладываемых на искомые параметры резания? 5. Перечислите разновидности (группы) технических ограничений. 6. Каковы характерные ограничения для черновой и чистовой обработки? для точения? сверления? шлифования? 7. Назовите критерии оптимальности (целевые функции) и области их использования. 8. Краткая характеристика различных методов оптимизации. 9. Особенности метода линейного программирования и его графическая интерпретация. 10. Что из себя представляет многоугольник ограничений? 11. Как графически определить оптимальный вариант режима резания?

Цель обработки материалов резанием — получение на детали новой поверхности с заданными размерами и свойствами. Это достигается в результате одновременно протекающих связанных между собой процессов упругой и пластической деформации обработанной поверхности и срезаемого слоя и превращением последнего в стружку, а также изнашиванием рабочих поверхностей режущего инструмента. Эти процессы образуют единую *систему резания*.

Каждая система, в том числе и система резания, состоит из некоторого множества элементов: некоторые из них являются *независимыми переменными факторами* и определяют состояние системы, а другие являются *параметрами ее функционирования* и зависят от сочетания конкретных независимых факторов. Переменными факторами состояния системы являются свойства обрабатываемого и инструментального материала; форма и размеры заготовки; снимаемый припуск и длина обработки; конструкция и геометрия инструмента; тип и характеристика станка; жесткость системы СПИД; состав и способ применения технологической среды; режим резания.

Результаты функционирования системы включают в себя такие параметры, как интенсивность изнашивания инструмента; критерий затупления инструмента; шероховатость и точность обработанной поверхности; наклеп и напряженное состояние под обработанной поверхностью; мощность, расходуемая на резание; виброустойчивость процесса; стружколомание и стружкозавивание; сохранность кромок детали. В целом система резания является сложной системой с большим числом состояний и связей между элементами.

Одной из задач исследования системы резания является оптимизация условий ее функционирования. В общем случае для определения оптимального решения необходимо:

- 1) правильно поставить задачу; 2) построить математическую модель процесса; 3) найти решение модели; 4) проверить модель и оценить решение; 5) реализовать решение и обеспечить контроль его правильности.

При разработке оптимальных условий функционирования системы резания исходят из того, что все переменные факторы, кроме элементов режима резания, заранее

известны и постоянны. Требуется найти такой режим резания, при котором все параметры функционирования системы находятся в определенных пределах и при этом обеспечивается цель оптимизации. Другими словами — требуется найти такие значения элементов режима резания, которые обеспечили бы максимальную эффективность технологического процесса в заданных конкретных производственных условиях при выполнении всех требований, предъявляемых к нему. Последние накладывают определенные *технические ограничения* на возможные значения искомых параметров резания. Эти ограничения условно можно разделить на несколько групп:

1) диапазоны возможных (или целесообразных) значений каждого из искомых параметров, определяемые режущими возможностями инструментов при обработке данного материала, техническими характеристиками оборудования и т. д.;

2) кинематические и пространственно-временные связи инструментов наладки между собой (это относится в основном к многоинструментным наладкам);

3) предельно допустимые значения ряда характеристик процесса резания (как, например, температура в зоне резания, качество и точность обработанной поверхности и т. д.), обусловленные требованиями к обрабатываемой детали;

4) ограничения по стойкости инструментов, учитывающие требования к периодичности смены инструмента, связанные с особенностями технологического процесса и организационной формой обслуживания оборудования;

5) предельные значения усилий и мощностей резания, допускаемые исходя из условий прочности и жесткости системы СПИД с учетом технических возможностей оборудования и требуемой точности обработки. Эти ограничения относятся как к отдельным инструментам наладки, так и к некоторым их автономным группам. В последнем случае речь идет, как правило, о суммарных усилиях и мощностях;

6) ограничения, обусловленные имеющимися ресурсами (материальными, временными и т. д.) на процесс обработки в заданное время в требуемом объеме.

Количество и смысл ограничений зависят от конкретных особенностей процесса резания. Так, например, при черновой токарной обработке, когда снимаются большие слои металла, ограничения зависят от периода стойкости

режущего инструмента, прочности инструментального материала, жесткости инструмента или его державки, мощности главного привода станка и силы, допускаемой прочностью механизма подачи. При чистовой токарной обработке главным ограничением будут заданные погрешности выдерживаемого поля допуска и формы поверхности, а также их взаимного расположения. Кроме того, необходимо обеспечить заданную шероховатость поверхности. Режимы обработки должны соответствовать паспортным данным станка и не превышать их предельных значений.

При глубоком сверлении необходимо учитывать такие ограничения, как наибольшая скорость резания, допустимая режущими возможностями сверла; наименьшая скорость резания, учитывающая условия стружкообразования и возможности непосредственно процесса резания; наибольшая подача, допустимая прочностью и жесткостью сверла и обеспечивающая стабильный отвод стружки из зоны резания; шероховатость поверхности отверстия; точность диаметрального размера; погрешности расположения оси отверстия; кинематические возможности станка.

Для шлифовальных работ учитываются следующие ограничения: шероховатость обработанной поверхности; точность детали; температура в зоне шлифования, исключая появление прижогов; мощность привода вращения круга; себестоимость шлифования.

При решении задачи оптимизации режима резания задают *критерий оптимальности*, или *целевую функцию*.

Выбор критерия оптимальности имеет большое значение, так как его необоснованное назначение может привести к ошибочным выводам и рекомендациям. В общем случае возможны следующие критерии оптимальности: наименьшая технологическая себестоимость, максимальная производительность, максимальная стойкость инструмента, наименьшие приведенные затраты. Последний показатель является обобщенным и с наибольшей эффективностью используется для выбора наилучшего варианта при возможной обработке деталей на разных моделях станков. Максимальная стойкость инструмента в качестве целевой функции используется при обработке больших поверхностей крупных, тяжелых деталей и заготовок из труднообрабатываемых сплавов, когда время выполнения одного перехода на выбранных режимах ре-

зания должно быть меньше периода стойкости инструмента, соответствующего этим режимам. Этот критерий применяется также в случаях, когда возникает необходимость экономить расход остродефицитного режущего инструмента. В условиях серийного производства наибольшее распространение получили два критерия оптимальности или целевые функции: минимум технологической себестоимости и максимум производительности при выполнении операции.

Экстремальное значение выбранного критерия эффективности определяется различными методами, которые условно разделяются на аналитические и алгоритмические. Основное достоинство различных аналитических методов — возможность качественной оценки результатов при изменении параметров исследуемой системы.

Алгоритмические (численные) методы оптимизации обеспечивают получение конкретных числовых значений исследуемых параметров. Эти методы условно подразделяются на градиентные, статистические и итеративные (методы математического программирования). Известно, что градиент функции — это вектор, координатами которого служат значения ее частных производных в данной точке и который показывает направление наибольшего возрастания или убывания целевой функции в этой точке. Градиентный метод решения задач оптимизации заключается в том, что в области допустимых решений выбирают начальную точку и, если она не является оптимальной, осуществляют дальнейшее движение по поверхности отклика. Градиентные методы являются методами экспериментальной оптимизации. К ним относятся метод случайного поиска, метод многофакторного анализа, одношаговый метод и метод крутого восхождения (наискорейшего спуска).

К статистическим методам оптимизации можно отнести метод статистических испытаний (метод Монте-Карло). Характерной его чертой является использование случайных элементов, т. е. чисел, имитирующих значение случайных величин. Источниками случайных элементов могут служить таблицы случайных чисел, датчики случайных чисел и т. д. Полученные числа принимаются за значения одной конкретной случайной величины, по которым можно сосчитать значения любой другой случайной величины. Цикл вычислений повторяют многократно, причем фиксируются точки, где значения целевой функ-

ции лучше предыдущих. Поиск прекращается, когда находят точку, близкую к экстремальной.

К методам математического программирования можно отнести методы линейного, нелинейного, целочисленного и динамического программирования. Наиболее широкое распространение получили методы линейного и нелинейного программирования. Метод нелинейного программирования используется в тех случаях, когда целевая функция нелинейна. Большинство твердосплавных инструментов, многие инструменты на агрегатных станках и автоматических линиях и многоинструментных наладках работают в диапазоне скоростей резания, где зависимость $T=f(v)$ нелинейна. Для этих случаев в настоящее время успешно применяется нелинейное программирование.

Линейное программирование предполагает, что целевая функция линейна. В нормативных материалах приводятся, главным образом, степенные зависимости, которые после логарифмирования преобразуются в линейные и используются для оптимизации режима резания.

Рассмотрим общие положения метода линейного программирования. Известно, что при использовании в расчетах экономических периодов стойкости наиболее эффективным будет такое сочетание элементов режима резания, которое обеспечивает наименьшее штучное время. Поэтому при работе за один проход в качестве целевой функции принимается зависимость

$$F = C/nS,$$

где C — постоянный коэффициент.

Влияние технических ограничений на режимы резания выражается в виде неравенств, представляющих зависимость рассматриваемой величины от элементов режима резания n , S , t . Глубина резания t принимается постоянной, так как работа ведется в один проход.

Выше отмечалось, что для построения математической модели процесса резания и использования с целью определения оптимальных режимов резания основных положений линейного программирования необходимо все неравенства технических ограничений и уравнений целевой функции преобразовать в линейные формы, прологарифмировав эти выражения. Введя обозначения $\lg n = X_1$ и $\lg S = X_2$, получим систему линейных неравенств

и линейную функцию, подлежащую оптимизации, которые в совокупности и представляют собой математическую модель процесса резания.

В общем случае она имеет вид

$$\begin{array}{r} n_1 X_1 + y_1 X_2 \geq b_1 \\ n_2 X_1 + y_2 X_2 \geq b_2 \\ \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ n_i X_1 + y_i X_2 \geq b_i \\ \hline f_0 = (X_1 + X_2) \rightarrow \max \end{array}$$

Определение оптимальных режимов резания методом линейного программирования математически сводится к тому, чтобы среди всевозможных неотрицательных значений X_1 и X_2 системы найти такие значения $X_{1\text{опт}}$ и $X_{2\text{опт}}$, при которых линейная форма целевой функции принимает наибольшее или наименьшее возможное значение.

Такая задача обычно решается с использованием ЭВМ. Вместе с тем используемая при линейном программировании математическая модель процесса резания может быть представлена в графическом виде. Каждому линейному неравенству системы и линейной форме целевой функции на плоскости соответствуют прямые линии. При пересечении этих линий образуется ряд точек. Координаты некоторых точек удовлетворяют всем зависимостям математической модели. В теории линейного программирования доказывается, что в случае, если система ограничений не противоречива, т. е. совместна, указанное множество точек является выпуклым замкнутым многоугольником, координаты вершин которого представляют собой корни совместного решения уравнений модели, а точки, принадлежащие площади, ограниченной многоугольником, удовлетворяют всем неравенствам.

Прямая, соответствующая каждому из неравенств системы, делит плоскость на две полуплоскости. По одну сторону от прямой расположены значения, удовлетворяющие неравенству. Точки, расположенные по другую сторону, не удовлетворяют решению неравенств. Точки на самой прямой удовлетворяют уравнению, лежащему в основе технического ограничения. Указанные прямые линий называются граничными.

Целевой функции, подлежащей оптимизации, соот-

ветствует прямая, наклоненная под углом 45° к осям координат. Поскольку эту линейную функцию, описываемую формулой $f_0 = X_1 + X_2$, необходимо максимизировать, то вполне понятно, что она будет максимальной в том случае, когда займет положение, при котором расстояние от нее до начала координат будет наибольшим. Это произойдет тогда, когда указанная линия пройдет через крайнюю точку многоугольника решений. Координаты этой точки и дадут оптимальные значения $X_{1\text{опт}}$ и $X_{2\text{опт}}$. По этим координатам определяются оптимальные условия функционирования системы резания.

Методика выполнения работы

Рассмотрим более подробно графический вариант оптимизации условий функционирования системы резания методом линейного программирования. В этом случае реализуется следующая последовательность действий:

1) задается критерий оптимальности (целевая функция);

2) на основании анализа поставленной задачи выбираются технические ограничения;

3) по справочной литературе или результатам исследований подбираются эмпирические зависимости и производится запись ограничений сначала в развернутом виде, а затем — в упрощенном, путем алгебраических преобразований*;

4) на логарифмической бумаге строятся прямые, соответствующие ограничениям, и оконтуривается многоугольник ограничений;

5) проводится прямая, соответствующая целевой функции, и определяются оптимальные условия функционирования системы резания.

* Рассмотрим это на примере составления ограничения по силе, допускаемой прочностью слабого звена механизма подачи:

$$P_x \leq [P_{\text{ст}}],$$

$$C_{P_x} t^{x_{P_x}} S^{y_{P_x}} \leq [P_{\text{ст}}], \quad S^{y_{P_x}} \leq \frac{[P_{\text{ст}}]}{C_{P_x} t^{x_{P_x}}},$$

где C_{P_x} , x_{P_x} , y_{P_x} определяются по справочнику, а $[P_{\text{ст}}]$ — по паспортным данным станка.

Рассмотрим конкретный пример. Определить оптимальный режим резания при точении детали из спеченного материала 20X9_п HRC₉ 54...58 резцом из сверхтвердого материала гексанит-Р на станке 16К20. Диаметр детали 50^{+0,02} мм, длина 30 мм; глубина резания 0,1 мм; период стойкости резца 60 мин; шероховатость обработанной поверхности Ra 0,63; производительность 30 шт/ч; коэффициент загрузки станка K_з=0,7; вспомогательное неперекрываемое время t_{в.н.}=0,5 мин.

Для данного случая можно составить следующие ограничения*.

1) режущие возможности инструмента, зависящие от его материала, геометрии, принятой величины стойкости и условий обработки:

$$\begin{aligned} v &\leq v_T; \\ nS^{y_v} &\leq \frac{318 C_v}{T m f^{x_v} D}; \\ nS^{0,274} &\leq 389; \end{aligned}$$

2) наименьшая скорость резания, исключающая возникновение вибраций:

$$\begin{aligned} v &\geq [v_{\text{вибр}}]; \\ n &\geq \frac{318 [v_{\text{вибр}}]}{D}; \\ n &\geq 446; \end{aligned}$$

3) наибольшие режимы резания, допускаемые требованиями к шероховатости обработанной поверхности:

$$Ra \leq [Ra];$$

$$\text{при } S \geq 0,08 \text{ мм/об: } n^{n_{Ra}} S^{y_{Ra}} \leq \frac{318^{n_{Ra}} [Ra]}{C'_{Ra} D^{n_{Ra}}};$$

$$n^{-1,0} S^{4,0} \leq 0,068 \cdot 10^{-6};$$

$$\begin{aligned} \text{при } S \leq 0,08 \text{ мм/об: } n &\geq \frac{318 C''_{Ra}}{[Ra] D}, \\ n &\geq 605; \end{aligned}$$

4) наибольшая скорость резания, обеспечивающая напряжения сжатия в поверхностных слоях детали (предельную температуру на поверхности детали):

$$\theta \leq [\theta];$$

* Данные для составления ограничений получены авторами в результате проведения экспериментальных исследований.

$$n^{n_{\theta}} \leq \frac{318^{n_{\theta}} [\theta]}{C_{\theta} D^{n_{\theta}}};$$

$$n^{0,45} \leq 21;$$

5) наименьший режим резания, допускаемый требованиями к микротвердости обработанной поверхности:

$$H_0 \geq [H_0];$$

$$n^{n_H} S^{y_H} \geq \frac{318^{n_H} [H_0]}{C_H D^{n_H}};$$

$$n^{-0,11} S^{-0,10} \geq 0,75;$$

6) наибольший режим резания, обеспечивающий требуемую точность детали:*

$$P_y \leq [P_y];$$

$$n^{n_{P_y}} S^{y_{P_y}} \leq \frac{318^{n_{P_y}} \mu f_d E \pi D^{4-n_{P_y}}}{64 C_{P_y} t^{x_{P_y}} l_d^3},$$

$$n^{-0,05} S^{0,91} \leq 2,35;$$

7) наименьший режим резания, обеспечивающий требуемую производительность обработки:

$$Q \geq [Q];$$

$$nS \geq \frac{[Q] l_{p,x}}{60 K_s - t_{в,н}};$$

$$nS \geq 40;$$

8) наименьшая скорость резания, допускаемая кинематикой станка: $v \geq v_{\min}$; $n \geq n_{\min}$; $n \geq 12,5$;

9) наибольшая скорость резания, допускаемая кинематикой станка: $v \leq v_{\max}$; $n \leq n_{\max}$; $n \leq 1600$;

10) наименьшая подача, допускаемая кинематикой станка: $S \geq S_{\min}$; $S \geq 0,05$;

11) наибольшая подача, допускаемая кинематикой станка: $S \leq S_{\max}$; $S \leq 2,8$.

Графическая интерпретация определения оптимального режима резания на логарифмической бумаге приведена на рис. 12.1. Из полученного многоугольника ограничений легко увидеть, что при чистовой обработке де-

* Расшифровка условных обозначений приведена в лабораторной работе 11.

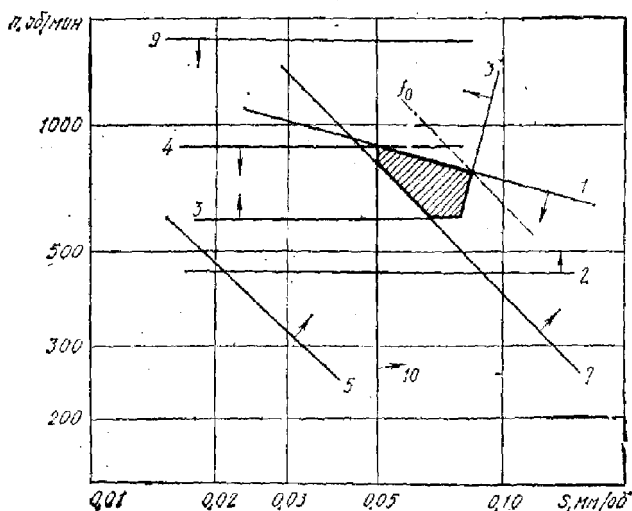


Рис. 12.1.

тали режим резания зависит не только от стойкости инструмента, но и от качества обработки (шероховатости). Оптимальным сочетанием элементов режима резания будет: $S=0,085$ мм/об; $n=760$ об/мин ($v=119$ м/мин).

В соответствии с паспортными данными станка имеем $S=0,09$ мм/об, $n=750$ об/мин.

Требования к оформлению работы

В отчете необходимо привести заданные преподавателем исходные данные, целевую функцию и систему технических ограничений в общем и цифровом виде, графическое изображение многоугольника ограничений; указать оптимальный режим резания.

Протокол лабораторной работы 12

Определение оптимального варианта функционирования системы резания методом линейного программирования

Исходные данные

Технические ограничения

Графическое изображение многоугольника ограничений

Оптимальный режим резания.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ В РЕЗАНИИ МЕТАЛЛОВ

В резании металлов используются различные методы обработки результатов эксперимента. Рассмотрим некоторые из них.

Графоаналитический метод. Сущность этого метода заключается в том, что все неизвестные величины, входящие в искомое уравнение, определяются графическим путем. Для этого по экспериментальным точкам проводят кривую, которая проходила бы как можно ближе к истинной функциональной зависимости, и определяют параметры кривой.

Большинство зависимостей в резании металлов носит эмпирический характер и имеет вид $R = C_R t^x S^y v^z$. Для того чтобы найти общее уравнение, прежде всего находят частные уравнения вида $R = C_{R_i} t^x$. Если мы прологарифмируем это уравнение, то получим: $\lg R = \lg C_{R_i} + x \lg t$. В прямоугольной системе координат с логарифмическим масштабом эта зависимость примет вид $y = A + BX$, т. е. это — уравнение прямой линии.

Существует несколько методов построения прямой по экспериментальным точкам.

1. *Построение наилучшей прямой с помощью линейки.* Наносим экспериментальные точки на график (в логарифмических координатах). Наложив на график прозрачную линейку и передвигая ее, проводим прямую, к которой экспериментальные точки лежат ближе всего. Из графика определяется величина A и B (рис. 1).

2. *Метод парных точек* заключается в определении наилучшего значения тангенса угла наклона прямой. Соединяем попарно точки, определяем несколько значений тангенса угла наклона и в качестве наилучшего принимаем среднее значение B . Прямую в этом случае проводят через точку, имеющую в качестве координат среднее значение величин X и Y . Метод дает вполне удовлетвори-

тельные результаты, если величины $(X_4 - X_1)$, $(X_5 - X_2)$, $(X_6 - X_3)$ и т. д. примерно одинаковы.

3. Графический способ построения прямой *методом наименьших квадратов*. Метод дает лучшие результаты, когда интервалы между значениями X одинаковы.

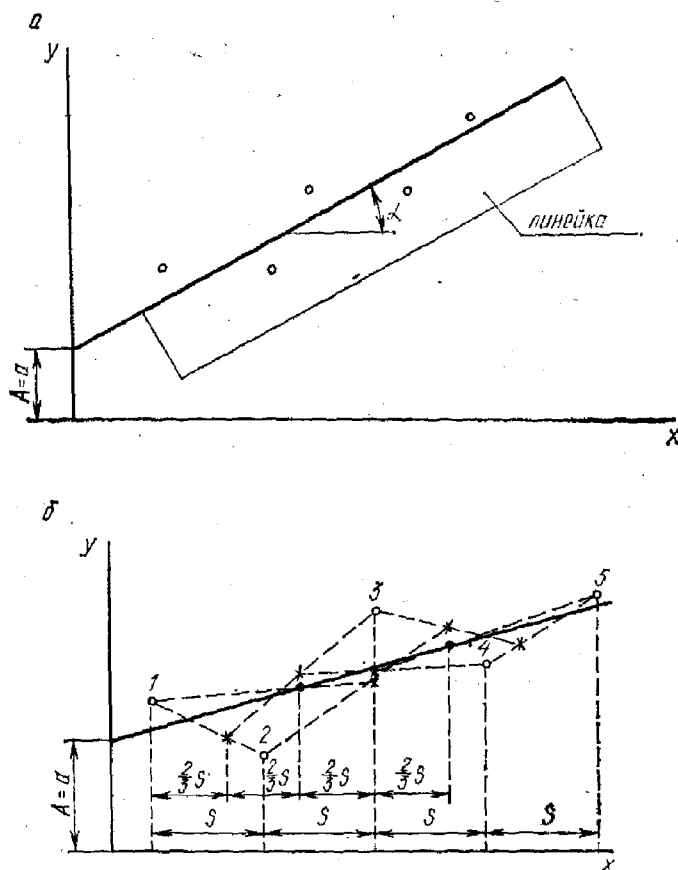


Рис. 1. Графические методы построения прямой:
а — с помощью линейки; б — методом наименьших квадратов

Проводится прямая следующим образом (см. рис. 1). Соединяем точки 1 и 2 отрезком прямой. Двигаясь в сторону точки 2, проходим вдоль отрезка расстояние, соответствующее $\frac{2}{3}S$, и делаем отметку. Соединяем полученную точку с точкой 3; двигаясь в сторону точки 3, снова проходим расстояние $\frac{2}{3}S$ и делаем новую отметку. Повторяем это, пока не будет получена последняя точка;

она лежит на наилучшей прямой, т. е. прямой наименьших квадратов. Теперь начинаем построение с другого конца и повторяем весь процесс, двигаясь в противоположном направлении. Находим вторую точку, лежащую на прямой.

Во всех случаях величины A и B определяются графически, по тангенсу угла наклона прямой ($B = \operatorname{tg} \alpha = Y/X$) и отрезку, который прямая отсекает на вертикальной оси координат ($A = a; X = 1$).

Таким методом определяют уравнения вида:

$$R = C_{R_t} t^x; \quad R = C_{R_S} S^y; \quad R = C_{R_v} v^z.$$

Для нахождения зависимости

$$R = C_{Rt} t^x S^y v^z$$

необходимо, чтобы при определении частных зависимостей во всех случаях эксперименты проводились в общей точке с координатами (t_0, S_0, v_0) . Тогда в этой точке величину R можно рассчитать и по общей, и по трем частным зависимостям, т. е.

$$R = C_{Rt} t_0^x S_0^y v_0^z = C_{R_t} t_0^x = C_{R_S} S_0^y = C_{R_v} v_0^z,$$

приравнивая попарно члены этого уравнения, получим

$$C'_R = \frac{C_{R_t}}{S_0^y v_0^z}; \quad C''_R = \frac{C_{R_S}}{t_0^x v_0^z}; \quad C'''_R = \frac{C_{R_v}}{t_0^x S_0^y};$$

$$C_R = \frac{C'_R + C''_R + C'''_R}{3}.$$

Метод наименьших квадратов. Сущность метода наименьших квадратов аналогична графоаналитическому методу, но параметры искомого уравнения находятся расчетным путем. Теория вероятностей показывает, что наилучшим приближением к истинной будет такая кривая, для которой сумма квадратов расстояний по вертикалям от точек до кривой будет минимальной. Отсюда и название «метод наименьших квадратов».

В нашем случае для прямой линии указанное требование приводит к уравнению

$$\sum_{i=1}^n (y_i - A - Bx_i)^2 \rightarrow \min,$$

где n — число экспериментальных точек.

Для определения минимума необходимо взять частные производные по A и B и приравнять их к нулю. Получим:

$$\begin{cases} -2 \sum_{i=1}^n (y_i - A - Bx_i) = 0, \\ -2 \sum_{i=1}^n (y_i - A - Bx_i) x_i = 0, \end{cases}$$

т. е.

$$\begin{cases} nA + B \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n y_i, \\ A \sum_{i=1}^n x_i + B \sum_{i=1}^n x_i^2 = \sum_{i=1}^n y_i x_i. \end{cases}$$

Решив систему уравнений, получаем:

$$B = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n (x_i)^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2};$$

$$A = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i)^2 \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i y_i}{\sum_{i=1}^n (x_i)^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}.$$

Общее уравнение находится на основе частных уравнений так же, как и при графоаналитическом методе расчета.

При выводе уравнения $R = C_R t^x S^y v^z$ графоаналитическим методом или методом наименьших квадратов необходимо провести эксперименты согласно табл. 1.

Расчет зависимостей с помощью метода наименьших квадратов целесообразно проводить с помощью табл. 2.

Планирование эксперимента (полный факторный эксперимент). Метод полного факторного планирования эксперимента требует, чтобы все независимые перемен-

Табл. 1. Экспериментальные данные

Номер п.п.	Скорость резания, м/мин	Подача, мм/об	Глубина резания, мм	Значение исследуемой величины	Примечание
------------	-------------------------	---------------	---------------------	-------------------------------	------------

I серия

1	$v = v_0$	$S = S_0$	t_1
2	»	»	t_2
3	»	»	t_3
4	»	»	t_4
5	»	»	t_5

II серия

1	$v = v_0$	S_1	$t = t_0$
2	»	S_2	»
3	»	S_3	»
4	»	S_4	»
5	»	S_5	»

III серия

1	v_1	$S = S_0$	$t = t_0$
2	v_2	»	»
3	v_3	»	»
4	v_4	»	»
5	v_5	»	»

Табл. 2. Расчет уравнения вида $R = C_{R_i} t^x$

t , мм	$\lg t_i = x_i$	R	$\lg R = y_i$	x_i^2	$x_i y_i$
----------	-----------------	-----	---------------	---------	-----------

 t_1 t_2 t_3 t_4 t_5

ные, влияющие на процесс, менялись хотя бы на двух уровнях: минимальном и максимальном. Это определяет количество необходимых экспериментальных точек N . Например, исследуется влияние на температуру резания

трех независимых переменных факторов (скорости резания, подачи и глубины), поэтому $N=2^k=2^3=8$. Для трех переменных составляется матрица планирования эксперимента (табл. 3).

Табл. 3. Матрица планирования

N	x_1	x_2	x_3
1	-1	-1	-1
2	+1	-1	-1
3	-1	+1	-1
4	+1	+1	-1
5	-1	-1	+1
6	+1	-1	+1
7	-1	+1	+1
8	+1	+1	+1

В этой матрице величина +1 соответствует максимальному значению независимой переменной, а величина -1 — минимальному. Такой вид придан матрице для обеспечения дальнейших математических расчетов.

Таким образом, для определения зависимости $R=f(t, S, v)$ требуется 8 опытов, а с учетом дублирования — 16 опытов. Для того чтобы исключить влияние различных случайных факторов, например, износа резца в процессе работы, неоднородности обрабатываемого материала и т. д., эксперимент рандомизируется, т. е. опыты производятся в случайном порядке. Используя специальные таблицы случайных чисел, получим следующую последовательность проведения экспериментов (табл. 4).

Таблица 4

Серия	I	II
Номер опыта	1 2 3 4 5 6 7 8	1 2 3 4 5 6 7 8
Номер п.п.	10 1 11 13 4 14 12 7	3 16 15 5 8 6 2 9

Таким образом, точка 2 матрицы планирования реализуется первой, точка 7 второй серии — второй, точка 1 первой серии — десятой и т. д.

Метод полного факторного планирования эксперимента позволяет найти уравнение $R=f(t, S, v)$ в виде полинома:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{\substack{i,j \\ i < j}}^k b_{ij} x_i x_j,$$

где y — значение функции (при определении степенной зависимости $y = \lg R$); x_i — кодированное значение i -й независимой переменной.

Для того чтобы найти неизвестные коэффициенты b_0, b_i, b_{ij} , необходимо выполнить следующие операции.

Находим среднее значение величины y_i в каждой экспериментальной точке по формуле

$$y_i = \frac{\sum_{m=1}^n y_{mi}}{n}.$$

Определяем дисперсию по строчкам матрицы:

$$S_i^2 = \frac{\sum_{m=1}^n (y_{mi} - y_i)^2}{n - 1}.$$

Проверяем гипотезу об однородности дисперсий с помощью критерия Кохрена по формуле

$$G = \frac{S_{i\max}^2}{N \sum_{i=1}^8 S_i^2},$$

т. е. по отношению наибольшей из дисперсий по строчкам к сумме всех дисперсий. Гипотеза об однородности принимается, если найденное $G < G_{\text{табл}}$. Для уровня значимости 5 % и числа опытов $N=8$ величина $G_{\text{табл}}=0,68$.

В случае однородности дисперсий определяется дисперсия воспроизводимости:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^8 S_i^2}{8}.$$

Определяем коэффициенты уравнения b_0, b_i, b_{ij} по формулам

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^8 y_i}{8}; \quad b_i = \frac{\sum_{i=1}^8 x_i y_i}{8}; \quad b_{ij} = \frac{\sum_{i,j} x_i x_j y_i}{8}.$$

Например:

$$\begin{aligned} b_0 &= \frac{y_1 + y_2 + y_3 + y_4 + y_5 + y_6 + y_7 + y_8}{8}; \\ b_1 &= \frac{(-1)y_1 + y_2 + (-1)y_3 + y_4 + (-1)y_5 + y_6 + (-1)y_7 + y_8}{8} = \\ &= \frac{-y_1 + y_2 - y_3 + y_4 - y_5 + y_6 - y_7 + y_8}{8}; \\ b_{12} &= [(-1)(-1)y_1 + 1 \cdot (-1)y_2 + (-1) \cdot 1 y_3 + 1 \cdot 1 y_4 + \\ &+ (-1)(-1)y_5 + 1 \cdot (-1)y_6 + (-1) \cdot 1 y_7 + 1 \cdot 1 y_8] / 8 = \\ &= \frac{y_1 - y_2 - y_3 + y_4 + y_5 - y_6 - y_7 + y_8}{8}. \end{aligned}$$

Проверяем значимость коэффициентов b с помощью критерия Стьюдента.

Для этого находим дисперсию коэффициента b по формуле

$$S_b^2 = \frac{S^2}{nN}$$

и находим величину

$$t = \frac{|b|}{\sqrt{S_b^2}}.$$

Если найденная величина $t > t_{\text{табл}}$, то коэффициент b считается значимым. В противном случае его принимают равным 0. Для уровня значимости 5 % и числа степеней свободы $\nu = N(n-1) = 8(2-1) = 8$ величина $t_{\text{табл}} = 2,31$.

Определяем расчетные значения независимой переменной $\hat{y}_i$ в каждой экспериментальной точке по значимым коэффициентам b .

Например, пусть значимы b_0, b_1, b_2, b_3 и b_{23} , тогда

$$\begin{aligned} \hat{y}_1 &= b_0 + (-1)b_1 + (-1)b_2 + (-1)b_3 + (-1)(-1)b_{23} = \\ &= b_0 - b_1 - b_2 - b_3 + b_{23}. \end{aligned}$$

Проверяем гипотезу адекватности полученного уравнения результатам эксперимента по критерию Фишера.

Для этого находим остаточную дисперсию:

$$S_{\text{ост}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^8 (y_i - \hat{y}_i)^2}{8 - d},$$

где d — количество значимых коэффициентов b .

По критерию Фишера находим:

$$F = \frac{\frac{S_{\text{ост}}^2}{S^2}}{\frac{S^2}{2}} = \frac{2S_{\text{ост}}^2}{S^2}.$$

Если значение F меньше $F_{\text{табл}}$, то гипотеза об адекватности принимается. Величину $F_{\text{табл}}$ для уровня значимости 5 % находим по статистическим таблицам.

Переводим уравнение $R = f(t, S, v)$ из нормализованного вида в натуральный. Для этого вместо кодированного значения независимой переменной x_i подставляем следующие значения:

$$x_i = (z - \bar{z})/m,$$

где z — натуральное значение i независимой переменной; $\bar{z} = (z_{\text{max}} + z_{\text{min}})/2$ — ее среднее значение; $m = (z_{\text{max}} - z_{\text{min}})/2$ — интервал варьирования.

После этого подставляем выражения для x_1, x_2, x_3 в уравнение

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^3 b_i x_i + \sum_{\substack{i,j \\ i < j}}^3 b_{ij} x_i x_j,$$

где b — значимые коэффициенты, и находим уравнение степенной зависимости.

Рассмотрим использование различных методов математической обработки на конкретных примерах.

Исследовалось влияние элементов режима резания на величину радиальной составляющей силы P_y при точении спеченной хромистой стали высокой твердости резцами из синтетического сверхтвердого материала гексанит-Р. Диапазон исследуемых скоростей резания 11...226 м/мин, подач 0,03...0,17 мм/об, глубин 0,05...0,20 мм. 5. Требуется определить общую зависимость $P_y = f(t, S, v)$.

Графоаналитический метод

Построим частную зависимость $P_v = C_v t^x$ в логарифмической системе координат. Зависимость будет иметь вид прямой линии $y = A + BX$ (рис. 2).

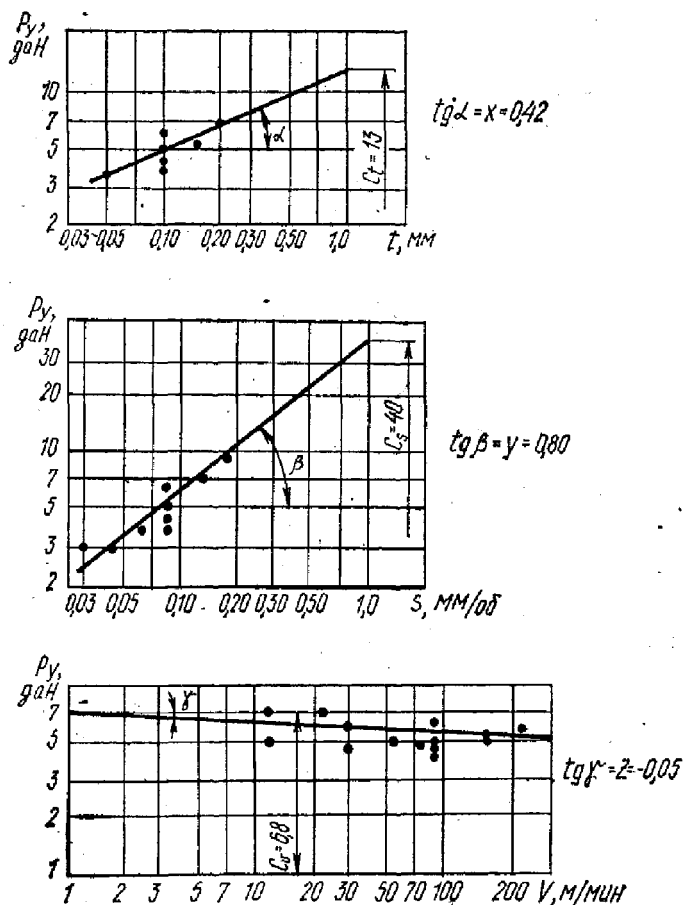


Рис. 2. Зависимости $P_v = C_v t^x$, $P_v = C_s S^y$ и $P_v = C_v V^z$

Известно, что центр логарифмической системы координат можно смещать по осям координат стандартной логарифмической сетки на любую величину, кратную $\lg 10 = 1$. Для того чтобы легко определить искомые нами величины A и B , в нашем случае центр смещен вправо на $2 \lg 10$. Теперь мы можем отложить экспериментальные точки и продлить нашу прямую до пересечения с вертикальной осью координат.

Проводя с помощью линейки прямую, определяем величину $A=13$ даН и $B=0,42$. Таким образом, наша зависимость имеет вид $P_y=13t^{0,42}$. Точно так же можно найти частные зависимости $P_y=40S^{0,8}$ и $P_y=6,8v^{-0,05}$.

Найдем теперь общую зависимость $P_y=C_{P_y}t^xS^y v^z$.

У нас имеется общая точка с координатами ($v=90$ м/мин, $S=0,08$ мм/об, $t=0,10$ мм) для всех частных зависимостей. Тогда, согласно приведенным выше уравнениям, получим:

$$C'_{P_y} = \frac{C_{P_t}}{S_0^y v_0^z} = \frac{13}{0,08^{0,8} 90^{-0,05}} = \frac{13}{0,1326 \cdot 0,7985} = 122,8;$$

$$C''_{P_y} = \frac{C_{P_S}}{t_0^x v_0^z} = \frac{40}{0,1^{0,42} 90^{-0,05}} = \frac{40}{0,3802 \cdot 0,7985} = 131,8;$$

$$C'''_{P_y} = \frac{C_{P_v}}{S_0^y t_0^x} = \frac{6,8}{0,1326 \cdot 0,3802} = 134,9;$$

$$C_{P_y} = \frac{122,8 + 131,8 + 134,9}{3} = 129,8.$$

$$P_y = 129,8 t^{0,42} S^{0,80} v^{-0,05}.$$

Ту же зависимость найдем теперь методом наименьших квадратов без графических построений. Для этого вновь найдем частные зависимости, но уже по приведенным выше формулам. Рассмотрим это на примере частной зависимости $P_y=C_P t^x$. Данные для расчета сведем в табл. 5.

Таблица 5.

$t, \text{ мм}$	$\lg t_i = x_i$	$P_y, \text{ даН}$	$\lg P_y = y_i$	x_i^2	$x_i y_i$
0,05	-1,30	3,7	0,57	1,69	-0,74
0,10	-1,00	5,4	0,65	1,00	-0,65
0,10	-1,00	4,7	0,67	1,00	-0,67
0,10	-1,00	6,3	0,80	1,00	-0,80
0,10	-1,00	5,0	0,70	1,00	-0,70
0,15	-0,82	5,3	0,72	0,67	-0,59
0,20	-0,70	6,7	0,83	0,49	-0,58
Σ	-6,82		4,94	6,85	-4,73

$$A = x = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n (x_i)^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} = \frac{-7.4,73 + 6,82 \cdot 4,94}{7.6,85 - (6,82)^2} =$$

$$= \frac{0,58}{1,44} = 0,40;$$

$$B = \lg C_t = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i)^2 \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i y_i}{n \sum_{i=1}^n (x_i)^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} =$$

$$= \frac{4,94 \cdot 6,85 - 6,82 \cdot 4,73}{1,44} = \frac{1,58}{1,44} = 1,0972;$$

$$C_t = 12,50.$$

Аналогичным образом можно получить

$$P_y = 6,33 v^{-0,047}; \quad P_y = 52 S^{0,91}.$$

Общий коэффициент C_{Py} в формуле $P_y = C_{Py} t^x S^y v^z$ можно определить из

$$C'_{Py} = \frac{C_v}{t_0^x S_0^y} = \frac{6,33}{0,1^{0,40} 0,08^{0,91}} = \frac{6,33}{0,3981 \cdot 0,1004} = 158,4;$$

$$C''_{Py} = \frac{C_s}{t_0^x v_0^z} = \frac{52}{0,1^{0,40} 90^{-0,047}} = \frac{52}{0,3981 \cdot 0,8094} = 161,4;$$

$$C'''_{Py} = \frac{C_t}{S_0^y v_0^z} = \frac{12,50}{0,08^{0,91} 90^{-0,047}} = \frac{12,50}{0,8094 \cdot 0,1004} = 153,8;$$

$$C_{Py} = \frac{C'_{Py} + C''_{Py} + C'''_{Py}}{3} = \frac{158,4 + 161,4 + 153,8}{3} = 157,8.$$

$$P_y = 157,8 t^{0,40} S^{0,91} v^{-0,047}.$$

Анализ полученных данных показывает, что графоаналитический метод и метод наименьших квадратов дают примерно одинаковую точность расчетов.

Полный факторный эксперимент (ПФЭ). Матрица планирования ПФЭ типа 2^3 строилась в диапазоне скоростей резания 52 ... 158 м/мин, подач 0,03 ... 0,12 мм/об

Таблица 6.

Скорость резания v		Подача S		Глубина t	
м/мин	уровень (x_1)	мм/об	уровень (x_2)	мм	уровень (x_3)
52	—1	0,03	—1	0,05	—1
158	+1	0,03	—1	0,05	—1
52	—1	0,12	+1	0,05	—1
158	+1	0,12	+1	0,05	—1
52	—1	0,03	—1	0,20	+1
158	+1	0,03	—1	0,20	+1
52	—1	0,12	+1	0,20	+1
158	+1	0,12	+1	0,20	+1

Сила, даН			S_t^2	$\hat{P}_{y_t}$	$(\bar{P}_t - \hat{P}_t)^2$
$P_{y_{1t}}$	$P_{y_{2t}}$	$\bar{P}_{y_t}$			
4,7	4,5	4,60	0,020	4,4	0,0400
4,0	4,5	4,25	0,125	4,4	0,0225
7,0	5,7	6,35	0,845	5,8	0,3025
5,2	5,4	5,30	0,020	5,8	0,2500
7,5	6,0	6,75	1,125	6,8	0,0025
7,5	6,2	6,85	0,845	6,8	0,0025
11,5	10,2	10,85	0,845	11,4	0,3025
11,5	12,5	12,00	0,500	11,4	0,3600
Σ			4,325		1,2825

и глубин 0,05...0,20 мм и приведена в табл. 6. Эксперименты в каждой точке повторялись дважды.

Общая зависимость $P_y = f(v, S, t)$ определяется следующим образом.

Находим средние значения величины P_y в каждой экспериментальной точке, например:

$$\bar{P}_{y_1} = \frac{4,7 + 4,5}{2} = 4,6.$$

Определяем дисперсию по строкам матрицы, например:

$$S_1^2 = \frac{\sum_{m=1}^n (P_{ymt} - \bar{P}_{yt})^2}{n-1} = \frac{(4,7-4,6)^2 + (4,5-4,6)^2}{2-1} = 0,020;$$

$$S_8^2 = \frac{(11,5-12,0)^2 + (12,5-12,0)^2}{2-1} = 0,500.$$

Проверяем гипотезу об однородности дисперсий с помощью критерия Кохрена по формуле

$$\frac{S_{i\max}^2}{\sum_{i=1}^8 S_i^2} = \frac{1,125}{4,325} = 0,26.$$

Так как для уровня значимости 5 % и числа степеней свободы $f_1 = n-1 = 1$ и $f_2 = N = 8$ $G_{\text{табл}} = 0,68 > 0,26$, то гипотеза об однородности дисперсий принимается. Величину G можно найти по табл. 7.

Таблица 7.

$f_1 \backslash f_2$	2	3	4	5	6	7	8
1	0,99	0,97	0,91	0,84	0,78	0,73	0,68
2	0,97	0,87	0,77	0,68	0,62	0,56	0,51
3	0,94	0,80	0,68	0,60	0,53	0,48	0,44

Дисперсия воспроизводимости равна

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^N S_i^2}{N} = \frac{4,325}{8} = 0,5406.$$

Коэффициенты уравнения:

$$b_0 = \frac{4,6 + 4,25 + 6,35 + 5,30 + 6,75 + 6,85 + 10,85 + 12,0}{8} = 7,1;$$

$$b_1 = \frac{-4,6 + 4,25 - 6,35 + 5,30 - 6,75 + 6,85 - 10,85 + 12,0}{8} = -0,02;$$

$$b_2 = 1,5; \quad b_3 = 2;$$

$$b_{11} = [(-1)(-1)4,6 + (+1)(-1)4,25 + (-1)(+1)6,35 + (+1)(+1)5,30 + (-1)(-1)6,75 + (+1)(-1)6,85 + + (-1)(+1)10,85 + (+1)(+1)12,0]/8 = 0,04;$$

$$b_{13} = 0,3; \quad b_{23} = 0,8.$$

Дисперсия коэффициентов уравнения:

$$S_b^2 = \frac{S^2}{2,8} = \frac{0,5406}{16} = 0,034; \quad \sqrt{S_b^2} = 0,18.$$

Находим величину критерия Стьюдента для коэффициентов уравнения:

$$t_1 = \frac{|b_1|}{\sqrt{S_{b_1}^2}} = \frac{0,02}{0,18} = 0,11.$$

t_0	t_1	t_2	t_3	t_{12}	t_{23}	t_{13}
39,4	0,11	8,3	11,1	0,22	4,4	1,7

В тех случаях, когда найденная величина $t > t_{\text{табл}} = 2,31$ для уровня значимости 5% и числа степеней свободы $\nu = N(n-1) = 8$, коэффициент b_i следует принять равным 0. Для нашего примера

$$b_1 = 0; \quad b_{12} = 0; \quad b_{13} = 0, \text{ т. е.}$$

$$y = 7,1 + 1,5x_2 + 2x_3 + 0,8x_2x_3.$$

ν	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
t	12,71	4,30	3,18	2,78	2,57	2,45	2,37	2,31	2,26	2,23	2,20	2,13	2,16	2,15

Определяем расчетные значения величины $\hat{P}_{y_i}$ (даН) (см. табл. 6)

$$\hat{P}_{y_1} = 7,1 - 1,5 - 2 + 0,8 = 4,4;$$

$$\hat{P}_{y_3} = 7,1 + 1,5 - 2 - 0,8 = 5,8.$$

Остаточная дисперсия равна:

$$S_{\text{ост}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{P}_{y_i} - \bar{P}_{y_i})^2}{N - d} = \frac{1,2825}{8 - 4} = 0,32.$$

Проверяем гипотезу адекватности полученного уравнения по критерию Фишера:

$$F = \frac{2S_{\text{ост}}^2}{S^2} = \frac{0,64}{0,54} = 1,2.$$

Так как $1,2 < F_{\text{табл}} = 3,8$ для числа степеней свободы $f_1 = N - d = 4$; $f = N(n - 1) = 8$ при уровне значимости 5 %, то гипотеза адекватности принимается. Величину критерия Фишера определяем из табл. 8.

Таблица 8

$f_1 \backslash f_2$	1	2	3	4	5
1	164,4	199,5	215,7	224,6	230,2
2	18,5	19,2	19,2	19,3	19,3
3	10,1	9,6	9,3	9,1	9,0
4	7,7	6,9	6,6	6,4	6,3
5	6,6	5,8	5,4	5,2	5,1
6	6,0	5,1	4,8	4,5	4,4
7	5,6	4,7	4,4	4,1	4,0
8	5,3	4,5	4,1	3,8	3,7

Переводим уравнение $P_y = f(v, S, t)$ из нормализованного вида в натуральный. Для этого вместо кодированного значения независимых переменных подставляем значения

$$x_1 = \frac{v - \frac{v_{\max} + v_{\min}}{2}}{\frac{v_{\max} - v_{\min}}{2}} = \frac{v - \frac{158 + 52}{2}}{\frac{158 - 52}{2}} = \frac{v - 105}{53};$$

$$x_2 = \frac{S - 0,075}{0,045}; \quad x_3 = \frac{t - 0,125}{0,075}.$$

Окончательно наше уравнение имеет вид

$$P_y = 7,1 + 1,5 \frac{S - 0,075}{0,045} + 2 \frac{t - 0,125}{0,075} +$$

$$+ 0,8 \frac{(S - 0,075)(t - 0,125)}{0,045 \cdot 0,075} = 3,4 + 3,7S + 8,9t + 237St.$$

Следует отметить, что данное уравнение согласно теории планирования эксперимента можно использовать в $\sqrt{3}$ большем по размаху диапазоне режимов резания, чем тот, в котором проводились эксперименты, т. е. при $v = 13 \dots 197$ м/мин; $S = 0,005 \dots 0,15$ мм/об; $t = 0,005 \dots 0,25$ мм.

В середине исследуемого диапазона более точно можно рассчитать величину P_y с помощью однофакторных экспериментов, а для всего диапазона — с помощью ПФЭ.

ЛИТЕРАТУРА

Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий.— 2-е изд., перераб. и доп.— М.: Наука, 1976.— 279 с.

Аришинов В. А., Алексеев Г. А. Резание металлов и режущий инструмент.— 3-е изд., перераб. и доп.— М.: Машиностроение, 1976.— 440 с.

Барсегянц Р. О., Межуев Б. Н. Лабораторные работы по курсу «Резание металлов».— М.: Высш. шк., 1964.— 127 с.

Бобров В. Ф. Основы теории резания металлов.— М.: Машиностроение, 1975.— 344 с.

Егоров С. В., Червяков А. Г. Резание конструкционных материалов и режущий инструмент (Лабораторный практикум.— 2-е изд., перераб.— М.: Высш. шк., 1975.— 188 с.

Машевич З. А. Лабораторные работы по курсу «Основы учения о резании металлов и режущий инструмент».— 2-е изд., перераб. и доп.— М.: Машиностроение, 1967.— 228 с.

Подураев В. Н. Резание труднообрабатываемых материалов.— М.: Высш. шк., 1974.— 587 с.

Резников А. Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов.— М.: Машиностроение, 1981.— 279 с.

Третьяков И. П., Аришинов В. А., Киселев Н. Ф. и др. Лабораторные работы по курсу «Резание металлов».— М.: Машиностроение, 1965.— 146 с.

Ящерицын П. И., Еременко М. Л., Жигалко Н. И. Основы резания металлов и режущий инструмент.— 2-е изд., перераб. и доп.— Мн.: Выш. шк., 1981.— 560 с.

ГОСТ 25762—83. Обработка резания: Термины, определения и обозначения общих понятий.— Введ. 01.07.84.— М., 1983.— 41 с.

ГОСТ 25751—83. Инструменты режущие: Термины и определения общих понятий.— Введ. 01.07.84.— М., 1983.— 24 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
Лабораторная работа 1. Геометрия рабочей части резцов	5
Лабораторная работа 2. Геометрия сверла с винтовыми канавками	30
Лабораторная работа 3. Геометрия рабочей части фрезы	51
Лабораторная работа 4. Влияние различных факторов на усадку стружки	64
Лабораторная работа 5. Исследование физических параметров процесса резания по корню стружки	72
Лабораторная работа 6. Влияние различных факторов на силу резания при точении	81
Лабораторная работа 7. Влияние различных факторов на температуру резания при точении	93
Лабораторная работа 8. Исследование износа резцов и зависимости стойкости от скорости резания	110
Лабораторная работа 9. Исследование обрабатываемости стали	121
Лабораторная работа 10. Влияние различных факторов на шероховатость обработанной поверхности при точении	130
Лабораторная работа 11. Определение элементов режима резания с использованием нормативно-справочной литературы	139
Лабораторная работа 12. Определение оптимального варианта функционирования системы резания методом линейного программирования	152
Приложение. Обработка результатов экспериментов в резании металлов	163
Литература	181

*Коженкова Тамара Иосифовна
Фельдштейн Евгений Эммануилович*

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО РЕЗАНИЮ МЕТАЛЛОВ

Зав. редакцией *Р. И. Масловский*. Редактор *Л. В. Петрович*. Обложка *С. В. Боленка*. Худож. редактор *А. Г. Звонарев*. Техн. редактор *И. П. Тихонова*. Корректор *В. П. Шкредова*.

ИБ № 1900

Сдано в набор 17.04.84. Подписано в печать 18.01.85. АТ 18508. Формат 84×108¹/₃₂. Бумага тип. № 3. Гарнитура литературная. Высокая печать. Усл. печ. л. 9,24. Усл. кр.-отт. 9,45. Уч.-изд. л. 9,42. Тираж 6500 экз. Зак. 915. Цена 35 к.

Издательство «Высшая школа» Государственного комитета БССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 220048, Минск, пр. Машерова, 11.

Ордена Трудового Красного Знамени типография издательства ЦК КП Белоруссии. 220041, Минск, Ленинский проспект, 79.