

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Металлорежущие станки и инструменты»

ТЕОРИЯ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

*Методические рекомендации к лабораторным работам
для студентов специальности
1-36 01 04 «Оборудование и технологии высокоэффективных
процессов обработки материалов»
очной и заочной форм обучения*



Могилев 2021

УДК 621.9
ББК 34.63
Т33

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Металлорежущие станки и инструменты»
«26» марта 2021 г., протокол № 12

Составитель канд. техн. наук, доц. С. А. Сухоцкий

Рецензент канд. техн. наук, доц. Д. М. Свирепа

Методические рекомендации предназначены для проведения лабораторных работ по дисциплине «Теория обработки материалов» для студентов специальности 1-36 01 04 «Оборудование и технологии высокоэффективных процессов обработки материалов».

Учебно-методическое издание

ТЕОРИЯ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

Ответственный за выпуск	С. Н. Хатетовский
Корректор	А. А. Подошевка
Компьютерная верстка	Е. В. Ковалевская

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч. -изд. л. . Тираж 38 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 07.03.2019.
Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский
университет, 2021

Содержание

Инструкция по охране труда при проведении лабораторных работ	4
1 Типы резцов и геометрические параметры режущей части основных их типов	5
2 Исследование влияния различных факторов на величину нароста и шероховатость обработанной поверхности.....	11
3 Исследование деформации срезаемого слоя	15
4 Исследование влияния режимов резания на составляющие силы резания, действующих на передней и задней поверхностях лезвия.....	21
5 Исследование влияния различных факторов на шероховатость обработанной поверхности.....	25
6 Исследование износа и стойкости резцов	28
7 Оптимизация режимов резания при сверлении	37
Список литературы	43

Инструкция по охране труда при проведении лабораторных работ

Общие требования безопасности

Допуск студентов к лабораторным занятиям производится только после инструктажа по технике безопасности, о чем делается соответствующая запись в специальном журнале (бланке).

Требования безопасности перед началом работы

1 Внимательно изучить содержание и порядок проведения лабораторной работы, а также безопасные приемы его выполнения.

2 Перед каждым включением оборудования предварительно убедиться, что его пуск безопасен.

Требования безопасности во время работы

1 Точно выполнять все указания преподавателя.

2 Не прикасаться к находящимся под напряжением элементам электрических цепей, к корпусам стационарного электрооборудования, не производить переключения в цепях до отключения источника питания.

3 Запрещается во время работы оборудования снимать ограждения и предохранительные устройства, а также держать их открытыми.

4 Во время работы запрещается касаться руками вращающихся и перемещающихся частей, вводить руки в зону движения.

Требования безопасности по окончании работы

1 Полностью выключить оборудование.

2 Привести в порядок рабочее место.

3 Предупредить преподавателя обо всех, даже малейших и незначительных, неисправностях оборудования.

Требования безопасности в аварийных ситуациях

1 В случае травмирования кого-либо немедленно доложить преподавателю.

2 При выходе оборудования из строя (нет освещения, возгорание токопроводов, поломка механических деталей) необходимо:

– отключить оборудование (обесточить);

– доложить преподавателю о случившемся, а в случае возгорания приступить к немедленной его ликвидации первичными средствами пожаротушения.

1 Типы резцов и геометрические параметры режущей части основных их типов

Цель работы: ознакомиться с типами резцов и элементами лезвия резца; изучить геометрические и конструктивные параметры резцов различных типов, методику измерения и измерить геометрические параметры резцов; приобрести навыки эскизирования резцов.

Резец – это однолезвийный инструмент для обработки деталей с поступательным или вращательным главным движением резания и возможностью движения подачи в любом направлении.

Резец является наиболее распространенным инструментом, его применяют на токарных, револьверных, карусельных, расточных, строгальных и долбежных станках, токарных автоматах и полуавтоматах и на многих специальных станках. В зависимости от вида станка и рода выполняемой работы применяют резцы различных типов, отличающихся по назначению, форме, конструкции и размерам.

Основные типы резцов. Резцы различают по следующим признакам.

1 По виду обработки.

Прходные для обработки наружных цилиндрических поверхностей. Прходные резцы могут быть прямыми (рисунок 1.1, а) и отогнутыми (рисунок 1.1, б). Отогнутые резцы получили широкое распространение из-за универсальности, позволяющей вести обработку не только цилиндрических, но и торцовых поверхностей с поперечной подачей. Прходные упорные резцы (рисунок 1.1, в) имеют угол в плане $\varphi = 90^\circ$, их применяют при обтачивании ступенчатых валиков и при обработке нежестких деталей.

Подрезные (рисунок 1.1, г) предназначены для обработки торцовых поверхностей, перпендикулярных оси вращения детали, эти резцы работают с поперечной подачей.

Расточные (рисунок 1.1, д) предназначены для обработки отверстий.

Отрезные (рисунок 1.1, е) для отрезки заготовок или обработанных из прутка деталей.

Резьбонарезные (рисунок 1.1, ж) предназначены для нарезания резьбы.

Резцы для контурного точения (рисунок 1.1, з) обеспечивают возможность обработки тел вращения с фасонной образующей на станках с ЧПУ и на станках с копирующими устройствами. Эти резцы имеют увеличенные вспомогательные углы в плане.

Фасонные резцы предназначены для обработки деталей сложного профиля на токарных, револьверных станках, автоматах и полуавтоматах.

2 По характеру обработки: черновые, чистовые, для тонкого точения.

3 По установке относительно детали: радиальные и тангенциальные.

4 По направлению подачи: правые и левые.

5 По конструкции головки: прямые, отогнутые, изогнутые и оттянутые.

6 По сечению корпуса: прямоугольные, квадратные и круглые.

7 По конструкции: цельные, составные и сборные.

8 По материалу рабочей части: из инструментальных сталей, из твердого сплава, из керамических материалов, из алмаза, сверхтвердых синтетических материалов.

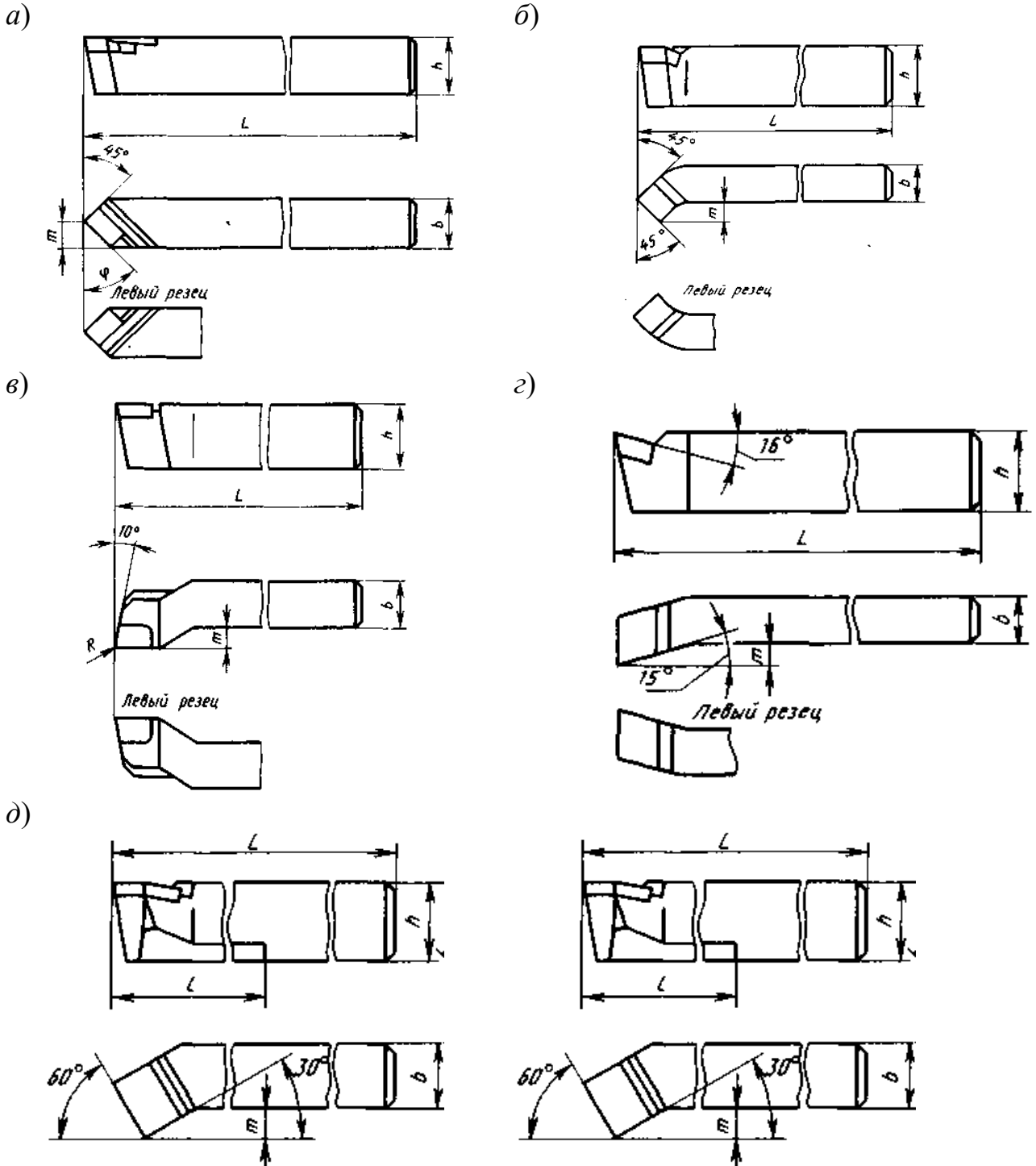
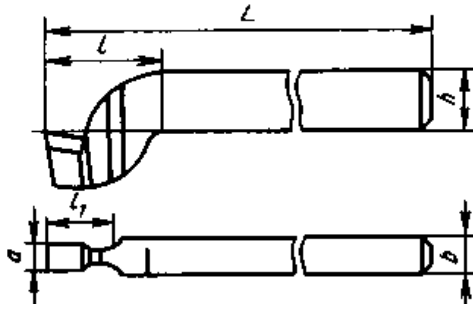
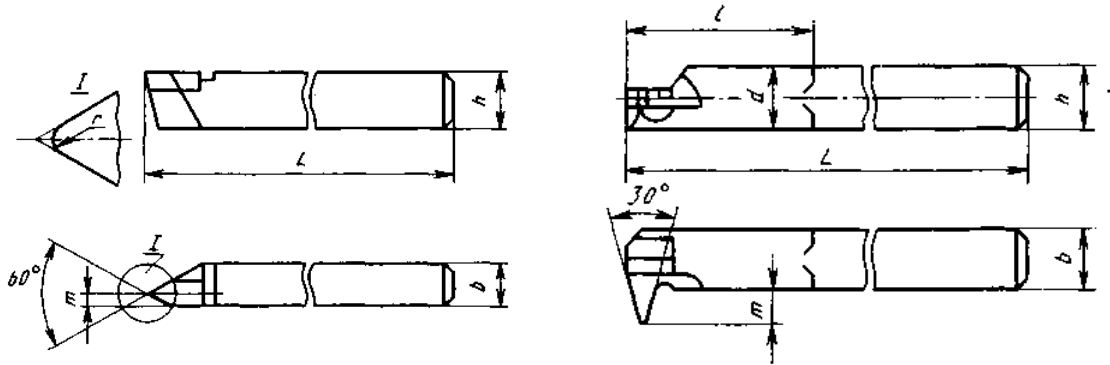


Рисунок 1.1 – Типы резцов

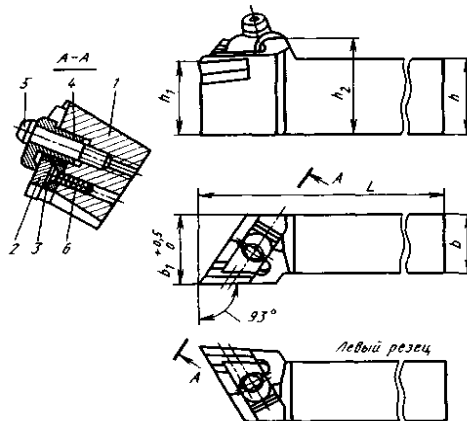
e)



ж)



з)



Окончание рисунка 1.1

Элементы лезвия резца. Рабочая часть любого режущего инструмента (резца, сверла, фрезы и др.) состоит из одного или многих режущих лезвий. На лезвии затачиваются передняя поверхность, контактирующая в процессе резания со срезаемым слоем и стружкой; главная задняя поверхность, контактирующая с поверхностью резания; вспомогательная задняя поверхность, обращенная к обработанной поверхности (рисунок 1.2). При пересечении передней и главной задней поверхностей образуется главная режущая кромка, а передней и вспомогательной задней – вспомогательная режущая кромка. Главной режущей кромкой формируется большая сторона сечения срезаемого слоя, а вспомогательной – меньшая. Режущие кромки никогда не бывают абсолютно острыми; образующие их поверхности сопрягаются по радиусу округления r . Место сопряжения главной и вспомогательной режущих кромок называется вершиной режущего лезвия.

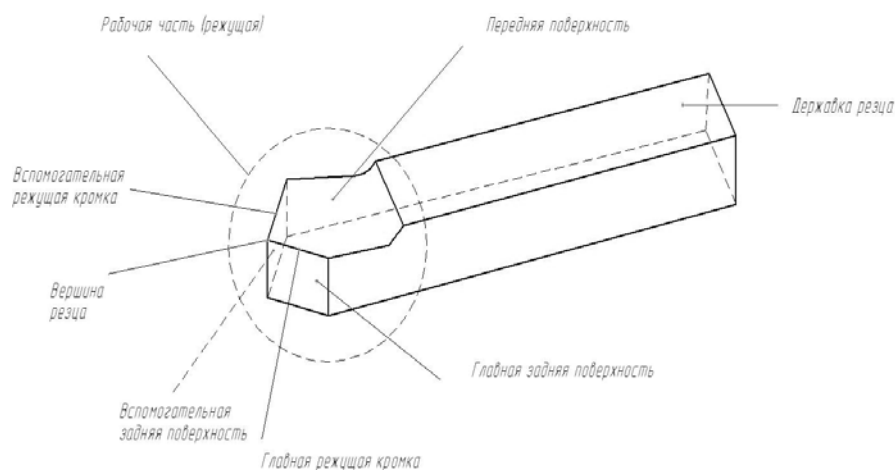


Рисунок 1.2 – Рабочие поверхности и режущие кромки резца

Координатные плоскости. Для определения положения режущих кромок резца принимают следующие координатные плоскости (рисунок 1.3): 1 – основная; 2 – резания; 3 – рабочая; 4 – главная секущая, а также вспомогательная секущая плоскость (на рисунке не показана).

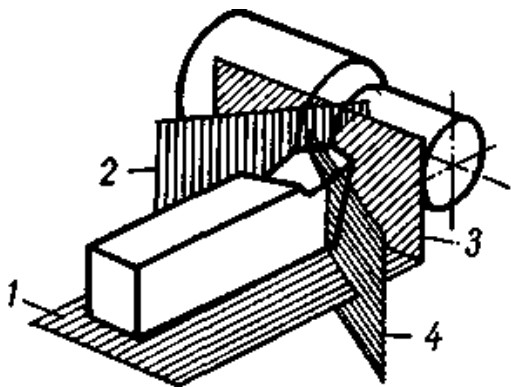


Рисунок 1.3 – Координатные плоскости

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

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 перпендикулярно к нижней опорной поверхности резца.

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

Так как углы резца двугранные, определяются они в секущих плоскостях. Эти плоскости должны быть перпендикулярны к ребру угла, которым является режущая кромка. Главной секущей плоскостью 4 называется координатная плоскость, перпендикулярная к линии пересечения основной плоскости 1

Координатные плоскости рассматривают в различных системах координат. Статическая система имеет начало в рассматриваемой точке режущей кромки и ориентирована относительно направления скорости главного движения резания, кинематическая – относительно направления скорости результирующего движения резания, инструментальная – относительно элементов режущего инструмента, принятых за базу.

и плоскости резания 2. В связи с тем, что плоскость резания касательна к главной режущей кромке в рассматриваемой точке, главная секущая плоскость всегда нормальна к ее проекции на основную плоскость. Вспомогательной секущей плоскостью называется плоскость, перпендикулярная (в рассматриваемой точке) к проекции вспомогательной режущей кромки на основную плоскость.

Геометрические параметры резцов. По расположению режущих кромок относительно координатных плоскостей определяют геометрию режущего лезвия (углы его заточки). Углы, определяемые в главной секущей плоскости, называются главными (они определяют режущий клин, отделяющий от припуска слой металла, превращаемый в стружку), определяемые во вспомогательной секущей плоскости – вспомогательными.

В главной секущей плоскости $N-N$ рассматривают главные задний и передний углы, углы заострения и резания (рисунок 1.4).

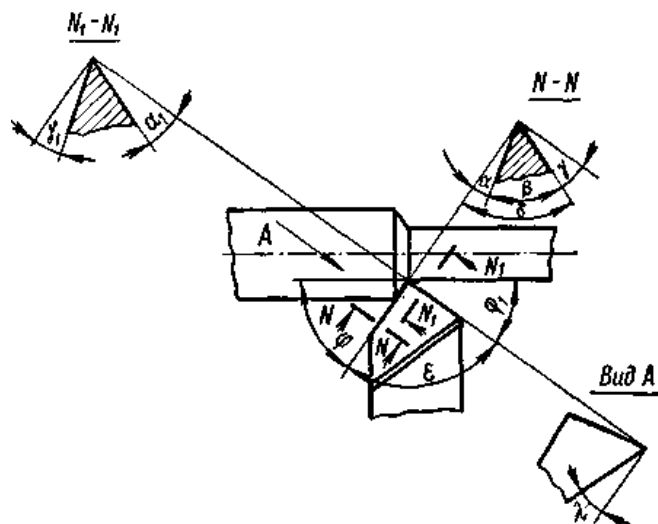


Рисунок 1.4 – Геометрические параметры резца

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 режущей кромки. Он имеет положительное значение, если передняя поверхность направлена вниз от режущей кромки; отрицательное – 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 $N_1 - N_1$ рассматривают вспомогательные задний α_1 и передний γ_1 углы. Вспомогательный задний угол – это угол

между касательной к вспомогательной задней поверхности резца и плоскостью, проведенной через точку вспомогательной режущей кромки перпендикулярно к основной плоскости.

В основной плоскости измеряются углы в плане. Главным углом в плане φ называется угол между плоскостью резания и рабочей плоскостью. Для резца он определяется проекцией главной режущей кромки на основную 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 $\varphi + \varphi_1 + \varepsilon = 180^\circ$.

В плоскости резания измеряется угол наклона главной режущей кромки λ . Это угол между главной режущей кромкой и основной плоскостью. Если вершина резца – низшая точка кромки, то угол λ – положительный, если высшая – отрицательный. Если режущая кромка параллельна основной плоскости, угол λ равен нулю. Все перечисленные углы резца соответствуют данным определениям, если вершина резца установлена на уровне оси вращения обрабатываемой детали и геометрическая ось стержня резца расположена перпендикулярно к оси вращения обрабатываемой детали. Нарушение этих условий приводит к изменению углов.

Габаритные размеры резцов. С целью унификации присоединительных размеров резцедержателей станков сечения резцов стандартизированы. Принят следующий ряд размеров сечения $H \times B$, мм²: квадратные 4×4; 6×6; 8×8; 10×10; 12×12; 16×16; 20×20; 25×25; 32×32; 40×40; прямоугольные: 16×10; 20×12; 20×16; 25×16; 25×20; 32×20; 32×25; 40×25; 40×32; 50×32; 50×40; 63×50; круглые диаметром от 10 до 40 мм. Прямоугольная форма сечения принята с отношением сторон $H \times B = 1,6$ для полустойковой и чистой обработки и $H \times B = 1,25$ для черновой обработки.

Измерение геометрических параметров резцов. Измерение габаритных размеров резца выполняют масштабной линейкой или штангенциркулем, а угловых параметров – универсальным, настольным или маятниковым угломером.

Задние углы, передние углы и углы наклона главной режущей кромки измеряются настольным угломером конструкции МИЗ.

При измерении передних и задних углов резец устанавливают на плите настольного угломера так, чтобы ножи измерителя лежали в главной секущей плоскости, т. е. перпендикулярно проекции главной режущей кромки на основную плоскость.

Для измерения заднего угла измеритель устанавливают на нужную высоту и закрепляют винтом. Нож подводят до соприкосновения с главной задней поверхностью и на шкале угломера отсчитывают величину угла α .

Для измерения переднего угла нож измерителя подводят до соприкосновения с передней поверхностью и на шкале угломера отсчитывают величину угла γ .

Для измерения вспомогательных углов, ножи измерителя устанавливают во вспомогательной секущей плоскости, т. е. в плоскости, перпендикулярной про-

екции вспомогательной режущей кромки, на основную плоскость, затем ножи измерителя подводят поочередно до соприкосновения с вспомогательной задней и передней поверхностями и по шкале угломера отсчитывают величину углов.

Для измерения угла наклона главной режущей кромки нож измерителя устанавливают в плоскости, проходящей через эту кромку, подводят до соприкосновения с режущей кромкой и по шкале угломера отсчитывают величину угла λ .

Порядок выполнения работы. Ознакомиться и дать характеристику каждому из трех резцов различных типов. Заэскизировать каждый резец. На эскизах обозначить соответствующими буквами углы резца. С помощью настольного и универсального угломеров измерить углы резца. Оформить отчет по лабораторной работе. Результаты измерения геометрических параметров режущей части резца свести в таблицу 1.1.

Таблица 1.1 – Геометрические параметры режущей части резцов

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

Содержание отчета. Цель работы. Эскизы резцов. Результаты измерений углов резцов в таблице 1.1. Выводы по работе.

2 Исследование влияния различных факторов на величину нароста и шероховатость обработанной поверхности

Цель работы: ознакомиться с условиями возникновения нароста, а также путем визуального наблюдения с характером влияния нароста на шероховатость обработанной поверхности; исследовать влияние скорости резания, подачи и величины переднего угла резца на величину нароста.

В процессе резания металлов при определенных условиях может иметь место процесс наростообразования. Этот процесс заключается в том, что на передней поверхности инструмента у режущей кромки образуется слой металла клиновидной формы, строение которого резко отличается от строения стружки (рисунок 2.1). Такой слой металла называется наростом. Твердость его в 2,5–3,5 раза превосходит твердость обрабатываемого материала, из которого он образован, а потому он способен выполнять функции режущего инструмента.

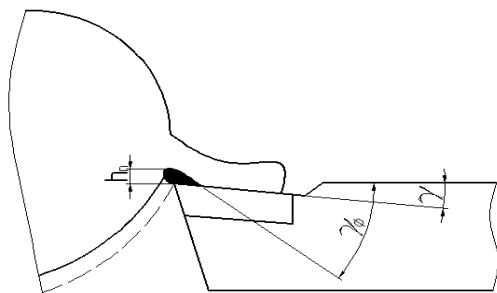


Рисунок 2.1 – Схема образования нароста

Нарост образуется лишь в том случае, когда резание сопровождается наличием сильно деформированной зоны вторичных пластических деформаций и высокого значения коэффициента трения на контактной площадке передней поверхности инструмента; в результате высокого трения стружка оказывается настолько сильно сцепленной с инструментом, что разрушение происходит не по поверхности их раздела, а на некотором расстоянии от нее.

Оторвавшиеся слои стружки при этом перестают двигаться и, накладываясь друг на друга, образуют клиновидное относительно неподвижное тело на передней поверхности – нарост. Накопление отстающих от общего потока стружки контактных слоев вызывает увеличение высоты нароста. Однако это происходит лишь до определенного предела, после происходит частичный или полный срыв нароста. Причем одна его часть уносится стружкой, а другая – обработанной поверхностью. После этого процесс повторяется. Поэтому типичным признаком наростообразования является чешуйчатый характер контактной поверхности стружки и обработанной поверхности, несущих на себе периодически срывающиеся части нароста. Вследствие периодических наслоений и срывов размер и форма нароста изменяются. Тем не менее можно говорить о форме и размерах нароста для данных условий резания, имея в виду их средневероятные значения.

Нарост практически не образуется при передних углах инструмента более 45° и при коэффициентах трения менее 0,5, при резании серого чугуна и хрупких материалов, когда стружка обращается в мелочь, при прерывистом резании, т. к. в этом случае нарост не успевает образоваться. При повышении температуры до значений, при которых уменьшается сопротивление обрабатываемого материала сдвигу, размеры нароста уменьшаются. Величина, форма и устойчивость нароста наиболее сильно зависят от скорости резания (рисунок 2.2).

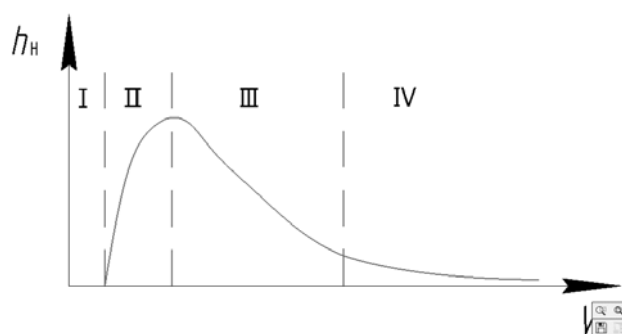


Рисунок 2.2 – Зависимость величины нароста от скорости резания

При очень малых скоростях резания ($V < 1$ м/мин, зона I) нарост отсутствует, образуется элементная стружка. При повышении скорости до 15...30 м/мин (зона II – появляется нарост, высота которого растет при увеличении скорости) стружка образуется сливная. Дальнейшее повышение скорости до 80...100 м/мин (зона III) характеризуется уменьшением высоты нароста. Верхней границей этой зоны является отсутствие нароста. В зоне IV отсутствует нарост. Увеличение подачи (рисунок 2.3) сдвигает кривую в зону низких скоростей резания и увеличивает максимум в ней. Увеличение переднего угла (рисунок 2.4) сдвигает кривую в зону более высоких скоростей резания и уменьшает максимум на ней.

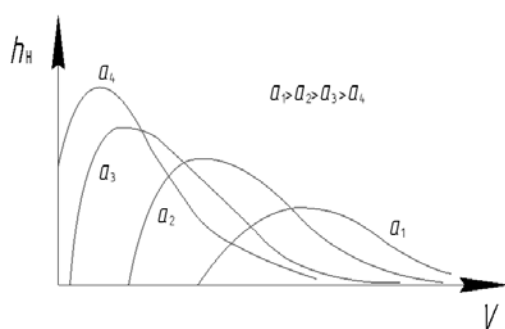


Рисунок 2.3 – Влияние скорости резания на высоту нароста при увеличении подачи

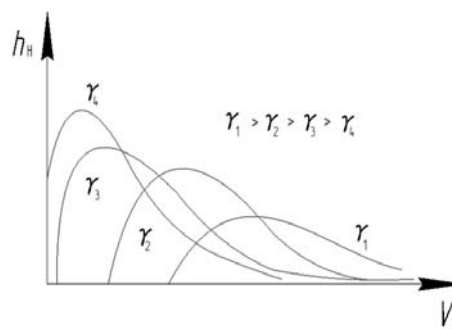


Рисунок 2.4 – Влияние скорости резания на высоту нароста при увеличении переднего угла

Наростообразование изменяет условия работы инструмента. Возникая на передней поверхности инструмента, нарост изменяет направление схода стружки, выполняет функции режущего клина, увеличивает фактический передний угол (см. рисунок 2.1). Это способствует уменьшению степени деформации срезаемого слоя и силы резания, т. е. более легкому отделению стружки. Причем чем больше высота нароста, тем больше фактический передний угол.

При определенных скоростях резания нарост выполняет защитные функции по отношению к инструменту, т. е. нарост препятствует изнашиванию контактных поверхностей инструмента. Тепло при резании воспринимается в первую очередь наростом. Наряду с этим, наростообразование имеет и отрицательные стороны.

При образовании нароста изменяются размеры детали (см. рисунок 2.1). В зоне скоростей резания, соответствующих максимальной высоте нароста, наблюдается резкое увеличение шероховатости обработанной поверхности. При периодическом разрушении нароста на поверхности резания и обработанной поверхности образуются надрывы и борозды, а часть нароста внедряется в обработанную поверхность. Все это увеличивает шероховатость обработанной поверхности, и, таким образом, зоны II и III скоростей резания наименее благоприятны для чистовой обработки. При росте нароста, его разрушении и последующем возрастании происходит периодическое изменение γ_ϕ , а следовательно, и силы резания. Все эти обстоятельства делают крайне нежела-

ными возникновение нароста при чистовой обработке.

Итак, при черновой обработке нарост полезен, а при чистовой вреден.

Для борьбы с наростообразованием, особенно при чистовой обработке, необходимо:

- правильно выбирать режимы резания и геометрические параметры инструмента;
- тщательно затачивать и доводить поверхности инструмента;
- применять СОЖ.

Оборудование, приборы, инструменты: токарно-винторезный станок; заготовку из алюминия или мягкой стали; резцы подрезные с одинаковыми задними углами и передними: $\gamma = 0^\circ$, $\gamma = 10^\circ$, $\gamma = 20^\circ$, $\gamma = 30^\circ$; угломеры для измерения геометрии резцов; инструментальный микроскоп; штангенциркуль.

Порядок выполнения работы.

1 Ознакомиться с инструментами, приспособлениями и станком.

2 Измерить геометрические параметры резцов.

3 Провести три серии опытов по определению величины нароста:

- при переменном значении переднего угла ($\gamma = 0^\circ$, 10° , 20° и 30°);
- при переменном значении подачи. При этом продольная подача изменяется от 0,11 до 1 мм/об ($\gamma = 0^\circ$; $V = 40$ м/мин);
- при переменном значении скорости резания $V = 10, 30, 60, 100$ м/мин ($\gamma = 0^\circ$; $S = 0,15$ мм/об).

Все остальные условия опытов должны сохраняться строго постоянными.

Для трех серий опытов производится резание с рассчитанными скоростями; срезание производится в течение 10...20 с, после чего резец быстро отводится от образца и выключается продольная подача. Состояние передней поверхности резца и прирезцовой стороны стружки после каждого опыта изучается на инструментальном микроскопе. Если на резце образовался нарост, то измеряют его высоту h_H , мм.

4 На основании полученных данных построить графики зависимости $h_H = f(\gamma, S, V)$.

5 Отметить в таблице экспериментальных данных связь между величиной нароста и шероховатостью обработанной поверхности.

6 Полученные графические зависимости сравнить с данными литературы и сделать выводы о влиянии γ, S, V на величину нароста.

Содержание отчета. Цель работы. Схема обработки с указанием размеров заготовки. Схема образования нароста. Экспериментальные данные (таблица 2.1). Графики зависимости величины нароста h_H от γ, S, V . Выводы по работе.

Таблица 2.1 – Экспериментальные данные

Номер серии опытов	Номер отчета	Передний угол резца, град	Подача, мм/об	Скорость, м/мин	Частота вращения, мин ⁻¹	Высота нароста, мм
Первый	1	0	0,15	40		
	2	10				
	3	20				
	4	30				
Второй	1	0		40		
	2					
	3					
	4					
Третий	1	0	0,15	10		
	2			30		
	3			80		
	4			100		

3 Исследование деформации срезаемого слоя

Цель работы: ознакомиться с методом непосредственного определения коэффициента усадки стружки; исследовать влияние скорости резания, подачи и величины переднего угла резца на коэффициент усадки стружки, влияние обрабатываемого материала, скорости резания и подачи на тип стружки.

В процессе резания по мере продвижения резца передняя поверхность с некоторой силой сжимает объем обрабатываемого материала, который находится впереди резца. Под действием силы сжатия напряжения в срезаемом слое превышают прочность обрабатываемого материала, поэтому происходит пластическая деформация срезаемого слоя и превращение его в стружку. Форма стружки и степень ее деформации свидетельствуют о напряжениях в срезаемом слое и характеризуют затраты энергии на процесс резания, а также условия работы режущего инструмента и интенсивность его изнашивания.

Цель изучения процесса стружкообразования состоит в том, чтобы выявить условия, при которых работа, затраченная на удаление срезаемого слоя, была бы наименьшей.

Важным показателем пластического деформирования срезаемого слоя является коэффициент усадки стружки K , который характеризует изменение формы и размеров срезаемого слоя.

Явление изменения размеров срезаемого слоя при превращении в стружку называется усадкой стружки.

Срезаемый слой металла, в отличие от своих первоначальных размеров L , a и b , характеризуется длиной L_c , толщиной a_c и шириной b_c . При этом, как правило, $L_c < L$ и $a_c > a$ (рисунок 3.1, а). Ширина стружки b_c мало отличается от ширины срезаемого слоя b .

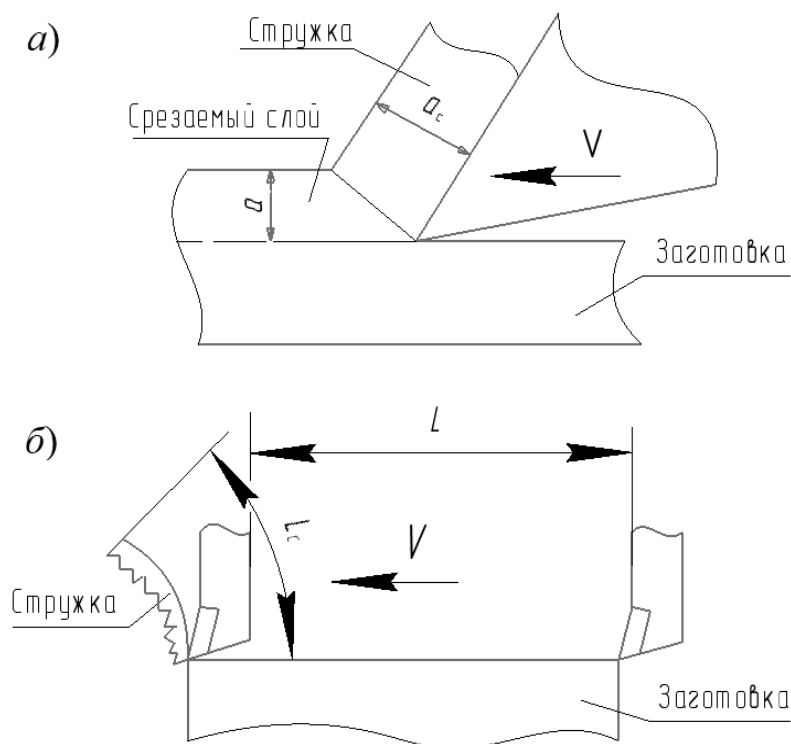


Рисунок 3.1 – Схема утолщения (а) и укорочения (б) стружки

Отношение длины пути L (рисунок 3.1, б), проходимого резцом, к длине деформированной стружки L_c называется *коэффициентом продольной усадки стружки* и определяется по формуле

$$K_L = \frac{L}{L_c}. \quad (3.1)$$

Коэффициент поперечной усадки стружки определяется по формуле

$$K_a = \frac{a_c}{a}. \quad (3.2)$$

Так как объем деформированного тела остается неизменным, то объем срезаемого слоя и стружки

$$a \cdot b \cdot L = a_c \cdot b_c \cdot L_c. \quad (3.3)$$

Откуда

$$\frac{L}{L_c} = \frac{a_c \cdot b_c}{a \cdot b} = \frac{a_c}{a}, \quad (3.4)$$

или

$$K_L = K_a.$$

Таким образом, продольная усадка стружки равна ее поперечной усадке. Величина коэффициента K при обработке сталей колеблется чаще всего от двух до пяти. Чем выше срезаемый слой подвергался пластической деформации, тем меньше усадка стружки. Следовательно, наименьший коэффициент K соответствует наилучшим условиям процесса резания.

Коэффициент K может быть определен различными способами в зависимости от имеющегося в лаборатории оборудования.

Весовой метод. Для определения коэффициента используется отношение площадей поперечного сечения стружки и срезаемого слоя:

$$K_L = \frac{a_c \cdot b_c}{a \cdot b}. \quad (3.5)$$

Методика работы заключается в следующем: от исследуемой стружки отламывается кусочек произвольной длины L_C и взвешивается на торсионных весах; пусть вес этого кусочка будет G , тогда объем этой стружки

$$W = \frac{G}{\gamma}, \quad (3.6)$$

где γ – удельный вес обрабатываемого материала.

При резании в силу несжимаемости металла

$$W = L_C \cdot a_c \cdot b_c = L \cdot a \cdot b. \quad (3.7)$$

Тогда при известных a и b

$$L = \frac{W}{a \cdot b}. \quad (3.8)$$

Следовательно, зная L_C , получим

$$K_L = \frac{W}{L_C \cdot a \cdot b}. \quad (3.9)$$

Метод измерения длины пути резания L . Снимается стружка длиной L_C (рисунок 3.1, б). Длина пути реза измеряется штангенциркулем, а длина стружки – гибкой мерой (упругой стальной проволочкой или лентой).

Коэффициент усадки стружки в этом случае определится как

$$K_L = \frac{L}{L_C}. \quad (3.10)$$

Метод непосредственного измерения. Основан на измерении толщины стружки a_c при известной толщине среза a (см. рисунок 3.1, а). Определение коэффициента усадки стружки K_a состоит в следующем.

Осуществляется свободное точение стальной трубы подрезным резцом (рисунок 3.2). При этом толщина среза a равна величине подачи S . Толщина стружки измеряется на инструментальном микроскопе. Для этого участок стружки, полученной при некотором режиме, закрепляется в струбцине (рисунок 3.3) и подвергается шлифованию на плоскошлифовальном станке. Таким методом осуществляется продольное или косое сечение стружки. Поскольку ее противорезцовая сторона имеет пилообразную форму, то толщина стружки должна оцениваться как среднее арифметическое между наименьшим и наибольшим значениями 5-6 замеров.

Коэффициент усадки стружки в этом случае определяется по формуле (3.2).

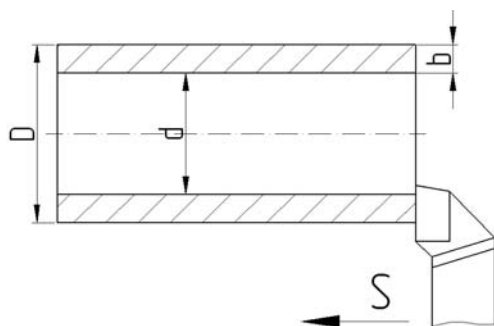


Рисунок 3.2 – Схема свободного резания

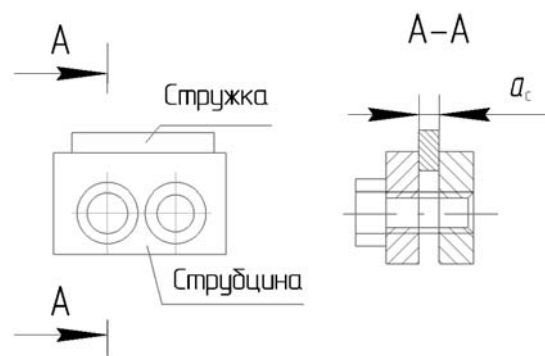


Рисунок 3.3 – Стружка, закрепленная в струбцине

Типы стружек. Согласно классификации И. А. Тиме различают четыре типа стружек (рисунок 3.4):

1) *элементная стружка* состоит из отдельных сильнодеформированных элементов (см. рисунок 3.4, а), приблизительно одинаковой формы, не связанных или слабо связанных друг с другом. Границу mn , отделяющую образовавшийся элемент стружки от срезаемого слоя, называют поверхностью скалывания. По ней происходит разрушение срезаемого слоя. Элементная стружка образуется при малой скорости резания (1...3 м/мин);

2) *суставчатая стружка* также состоит из отдельных элементов, но прочно связанных друг с другом (см. рисунок 3.4, б). Суставчатая стружка образуется при повышении скорости резания до 10...15 м/мин;

3) *сливная стружка* представляет собой сплошную непрерывно сходящую ленту, на которой отдельные элементы трудно различимы (см. рисунок 3.4, в).

Поверхность стружки, прилегающую к передней поверхности инструмента, называют контактной стороной стружки. Она гладкая и даже отполирована при высоких скоростях резания. Противоположная сторона называется свободной поверхностью стружки. Она покрыта мелкими зубчиками и имеет бархатистый вид. Сливная стружка образуется при скорости резания свыше 60...100 м/мин;

4) *стружка надлома* образуется при резании чугуна и других хрупких металлов (см. рисунок 3.4, г). Она состоит из отдельных кусочков, имеющих различные размеры и форму. Ее образованию сопутствует мелкая металлическая пыль. Поверхность разрушения mn может располагаться ниже поверхности резания, в результате чего последняя покрыта следами из кусочков стружки.

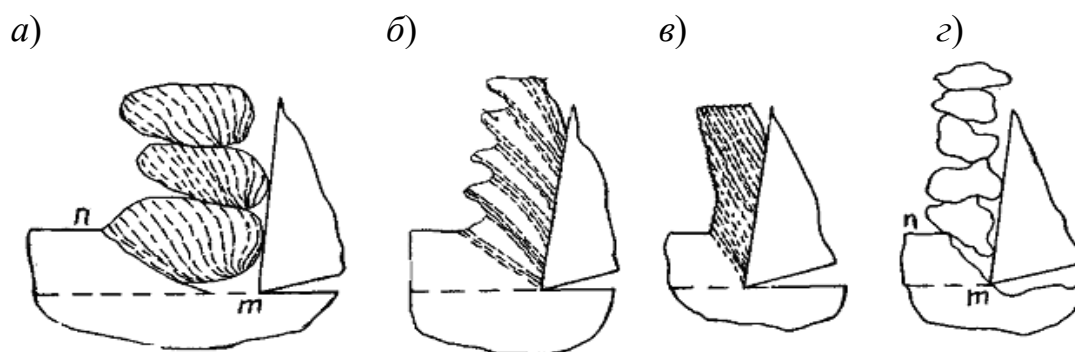


Рисунок 3.4 – Типы стружек

Тип стружки зависит от рода и свойств обрабатываемого материала, геометрии инструмента и режима резания.

При резании пластичных материалов возможно образование элементной, суставчатой и сливной стружек. По мере увеличения твердости и прочности обрабатываемого материала сливная стружка переходит в суставчатую, а затем в элементную.

Из геометрических параметров инструмента наибольшее влияние на тип стружки оказывает передний угол. С его увеличением элементная стружка переходит в суставчатую, а затем и в сливную.

Глубина резания не оказывает влияния на тип стружки. Увеличение подачи (толщина срезаемого слоя) при резании пластичных материалов приводит к переходу сливной стружки в суставчатую, а затем в элементную, а при резании хрупких материалов приводит к переходу элементной стружки в стружку надлома.

В производственных условиях наиболее часто при резании конструкционных сталей получается сливная стружка, а при резании чугуна – стружка надлома.

Оборудование, приборы и инструменты: токарный станок; плоскошлифовальный станок; инструментальный микроскоп; заготовка в виде трубы; резцы подрезные с одинаковыми задними углами и передними: $\gamma = -10^\circ$, $\gamma = 0^\circ$, $\gamma = 10^\circ$, $\gamma = 20^\circ$; штангенциркуль; струбцины специальные; плоскогубцы.

Порядок выполнения работы.

1 Ознакомиться с инструментами, приспособлениями и станками.

2 Измерить геометрические параметры резцов.

3 Провести три серии опытов по определению коэффициентов усадки стружки:

– при переменном значении переднего угла ($\gamma = -10^\circ$, 0° , 10° и 20° , $V = 120$ м/мин; $S = 0,15$ мм/об);

– при переменном значении толщины срезаемого слоя (подачи) ($\gamma = 10^\circ$, $V = 120$ м/мин; $S = 0,07$; $0,15$; $0,29$ и $0,67$ мм/об);

– при переменном значении скорости резания ($\gamma = 10^\circ$; $V = 5$, 20 , 30 , 60 , 150 и 190 м/мин; $S = 0,15$ мм/об).

Все остальные условия опыта должны сохраняться постоянными.

Для третьей серии опытов:

– производится резание с рассчитанными скоростями;

– участок получившейся стружки закрепляется в струбцине;

4 Исследование влияния режимов резания на составляющие силы резания, действующих на передней и задней поверхностях лезвия

Цель работы: ознакомиться с методикой измерения составляющих силы резания при точении с помощью 3-компонентного динамометра, с методами экспериментального определения сил, действующих на передней и задней поверхностях лезвия; исследовать влияние скорости резания, подачи и глубины резания на составляющие силы резания; провести графоаналитическую обработку полученных экспериментальных данных.

Составляющие силы резания при точении. Силы, возникающие при резании, определяют не только нагрузку системы станок–приспособление–инструмент–деталь, но и температуру резания, стойкость режущего инструмента, точность обработки, производительность и требуемую мощность. Поэтому задача определения величины этих сил представляется весьма важной в теоретическом и практическом отношениях.

Процесс резания обрабатываемого материала сопровождается возникновением в срезаемом слое сначала упругих, а затем пластических деформаций, а также трением стружки о переднюю поверхность лезвия и трением задней поверхности лезвия об обрабатываемую поверхность, что и является источником 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.

Таким образом, в процессе резания металлов возникает некоторая сила сопротивления резанию, которая является результирующей неравномерно распределенной нагрузки на задней и передней поверхностях лезвия. Но так как закон изменения интенсивности распределенной нагрузки не известен, то не известна точка приложения и направление упомянутой равнодействующей. Поэтому при исследовании силовой напряженности процесса резания принято измерять составляющие силы резания P_Z , P_X , P_Y .

При продольном точении (рисунок 4.1, а) равнодействующая сила резания раскладывается на три, при подрезании торца втулки (рисунок 4.1, б) на две и при отрезке (рисунок 4.1, в) на две взаимно перпендикулярные составляющие. Касательная составляющая силы резания P_Z – главная и часто наибольшая по величине, действует в направлении траектории главного рабочего движения. Она создает крутящий момент, нагружает привод главного движения, изгибает резец и заготовку. По этой силе производится расчет деталей коробки скоростей, шпинделя, суппорта и других ответственных деталей станка.

Осевая составляющая силы резания P_x действует в направлении продольной подачи, т. е. на механизм подачи станка, на шпиндель и его опоры в осевом направлении. Эта сила преодолевается механизмом подачи станка, а поэтому в основном по ней и рассчитываются детали коробки подач, фартука и упорные подшипники шпинделя.

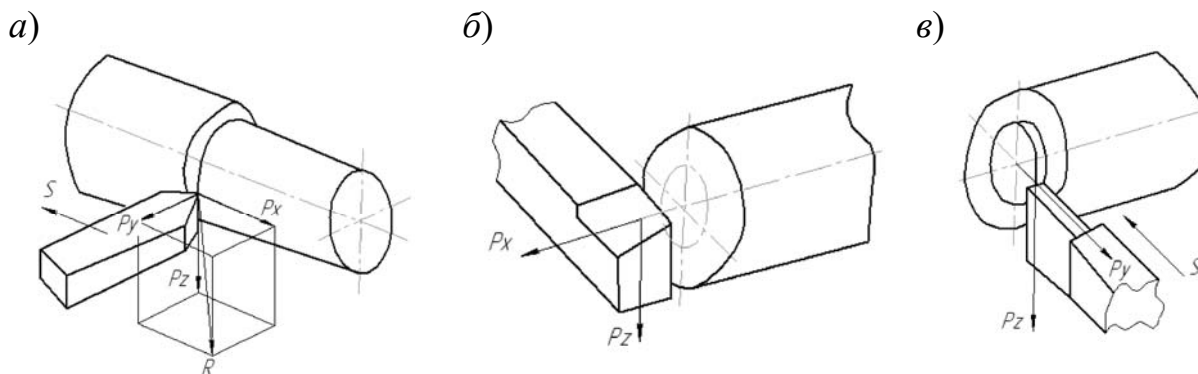


Рисунок 4.1 – Составляющие силы резания, действующие на резец

Радиальная составляющая силы резания P_y направлена нормально оси детали и стремится прогнуть изделие и оттолкнуть от него резец. Она действует на суппорт, станину, шпиндель и заднюю бабку станка. По этой силе производится расчет станка на жесткость и рационального давления на подшипники шпинделя.

Таким образом, знание величины P_z , P_x и P_y необходимо для расчета станка и его механизмов, для прогнозирования точности обработки деталей.

В нормальных условиях принимают

$$P_x = (0,2 \dots 0,3) P_z; \quad (4.1)$$

$$P_y = (0,3 \dots 0,4) P_z. \quad (4.2)$$

В действительности эти соотношения значительно колеблются в зависимости от геометрии резца, степени его затупления и других факторов. Величины составляющих силы резания зависят от очень многих факторов: физико-механических свойств обрабатываемого материала; геометрии, материала и степени износа инструмента; глубины резания; подачи и скорости резания; вида применяемой СОЖ и т. д., поэтому аналитическое определение сил резания затруднено. В практических случаях обычно составляющие P_z , P_x , P_y определяют с помощью эмпирических формул (полученных экспериментальным путем). Эти формулы представляют обычно в виде степенной зависимости

$$P = C_p \cdot t^{X_p} \cdot S^{Y_p} \cdot V^{Z_p}, \quad (4.3)$$

где C_P – коэффициент, учитывающий некоторые конкретные условия резания (обрабатываемый материал, инструментальный материал, геометрию инструмента, условие смазки и т. д.);

t, S, V – глубина резания, подача и скорость резания;

Z_P, Y_P, X_P – показатели степеней, характеризующие закон изменения составляющих силы резания в зависимости от изменения t, S, V .

Из элементов режима резания наиболее существенное влияние на величину составляющих P_Z, P_X, P_Y оказывают глубина резания и подача S . С увеличением глубины резания возрастает сечение срезаемого слоя ($f = S \cdot t = a \cdot b$), и поскольку коэффициент трения и усадка стружки остаются почти без изменения, следует ожидать пропорционального роста составляющих силы резания.

С увеличением подачи сечение срезаемого слоя также пропорционально возрастает, ввиду снижения коэффициента трения стружки о переднюю поверхность резца усадка уменьшается, поэтому составляющие силы резания должны расти не пропорционально росту подачи, а с некоторым отставанием.

Изменение скорости резания влияет на составляющие силы резания так, как оно влияет на изменение коэффициента усадки стружки при резании материалов, не склонных к наростообразованию, коэффициент усадки монотонно убывает при увеличении скорости. Также ведут себя и составляющие силы резания, уменьшающиеся при увеличении скорости: вначале быстро, а затем более медленно. При резании материалов, склонных к наростообразованию, кривая $P_Z = f(V)$ немонотонна. Сила P_Z имеет минимум при максимально развитом наросте (рисунок 4.2). При уменьшении высоты нароста сила P_Z возрастает, а при скоростях резания, соответствующих исчезновению нароста, сила P_Z при увеличении скорости непрерывно уменьшается.

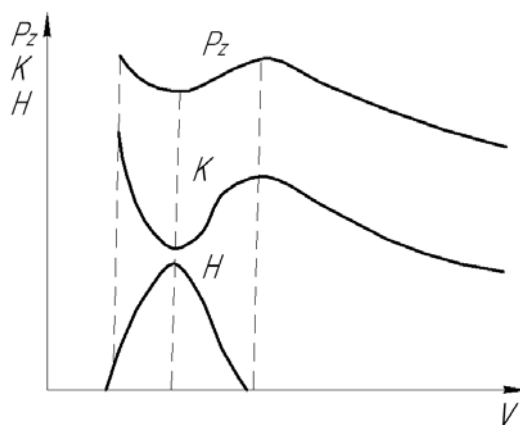


Рисунок 4.2 – Влияние скоростей резания на высоту нароста H , коэффициент усадки стружки K и силу P_Z

Аппаратура, применяемая для измерения составляющих силы резания. Зависимость составляющих силы резания от факторов процесса резания обычно находят экспериментально. Для измерения составляющих силы резания P_Z, P_X, P_Y при резании металлов используются специальные приборы, называемые динамометрами.

Наибольшее применение имеют электрические динамометры (пьезоэлектрические, емкостные, индукционные и динамометры с проволочными датчиками сопротивления). 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.

Оборудование, приборы и инструменты: токарно-винторезный станок; заготовка в виде трубы для осуществления свободного продольного точения; токарные резцы с тремя различными передними углами ($\lambda = 0^\circ$, $\lambda = 10^\circ$ и $\lambda = 20^\circ$); трехкомпонентный динамометр М30-3-6к; штангенциркуль; угломеры для измерения геометрии резцов.

Порядок выполнения работы.

1 Ознакомиться с инструментом, станком и приборами.

2 Измерить геометрические параметры резцов.

3 Изучить конструкцию и принцип действия трехкомпонентного динамометра М30-3-6к.

4 Провести экспериментальное исследование влияния режимов резания на составляющие силы резания P_Z , P_X и P_Y в три этапа, т. е. измерить составляющие P_Z , P_X и P_Y при переменной t и постоянных V и S ; при переменной S и постоянных t и V ; при переменной V и постоянных S и t .

Все остальные условия опыта должны сохраняться постоянными.

Полученные данные занести в таблицу отчета.

5 Полученные экспериментальные данные обрабатываются графическим методом.

В результате обработки выводятся следующие уравнения:

$$P_Z = C_{Pz} \cdot t^{XPz} \cdot S^{YPz} \cdot V^{ZPz}; \quad (4.4)$$

$$P_Y = C_{Py} \cdot t^{XPy} \cdot S^{YPy} \cdot V^{ZPy}; \quad (4.5)$$

$$P_X = C_{Px} \cdot t^{XPx} \cdot S^{YPx} \cdot V^{ZPx}. \quad (4.6)$$

Полученные зависимости проверить путем подстановки в формулы (4.4)–(4.6) данных конкретного опыта.

6 Полученные экспериментальные данные сравнить с данными литературы и сделать выводы о влиянии режимов резания на составляющие силы резания.

7 Оформить отчет по лабораторной работе.

Содержание отчета. Цель работы. Схема сил, действующих на резец. Экспериментальные данные свести в таблицу 4.1. Графики изменения составляющей силы резания в зависимости от глубины резания, от подачи и скорости резания в логарифмических координатах. Определение значений показателей степеней z , y , x . Выводы.

Таблица 4.1 – Экспериментальные данные

Номер серии опыта	Номер опыта	Режим резания				Составляющие силы резания, Н		
		Глубина, мм	Подача, мм/об	Частота вращения, мин ⁻¹	Скорость, м/мин	P_z	P_x	P_y
Первый	1							
	2							
	3							
	4							
Второй	1							
	2							
	3							
	4							
Третий	1							
	2							
	3							
	4							

5 Исследование влияния различных факторов на шероховатость обработанной поверхности

Цель работы: изучить способ измерения высоты микронеровностей с помощью профилографа-профилометра; выяснить характер влияния скорости резания V , главного угла в плане φ , радиуса при вершине r и подачи на шероховатость обработанной поверхности при точении проходными резцами с неперетачиваемыми твердосплавными пластинками.

Качество поверхностного слоя характеризуется шероховатостью поверхности, микроструктурой, глубиной и степенью наклепа и остаточными напряжениями. Наиболее разработанной и точно определяемой характеристикой качества поверхности является ее шероховатость.

В первом приближении шероховатость может быть определена расчетным путем.

При условии обработки, если $r = 0$, расчетная формула для определения высоты неровности при точении (рисунок 5.1) будет иметь следующий вид:

$$R_{zp} = \frac{S \cdot \sin \varphi \cdot \sin \varphi_1}{\sin(\varphi + \varphi_1)}, \quad (5.1)$$

где S – подача, мм/об;

φ и φ_1 – углы в плане, град.

При условии обработки, когда резец имеет радиус при вершине $r \neq 0$ и соблюдаются неравенства (рисунок 5.2) $\varphi > \arcsin \frac{S_z}{2r}$ и $\varphi_1 < \arcsin \frac{S_z}{2r}$ высота неровности определяется по формуле

$$R_{Zp} = \frac{S_z^2}{8r}. \quad (5.2)$$

Разумеется, эти соотношения дают весьма значительные погрешности. Наиболее точно шероховатость обработанной поверхности может быть измерена с помощью приборов (профиллографа-профилометра, растровых микроскопов).

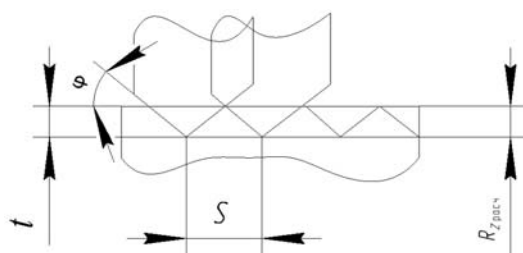


Рисунок 5.1 – Шероховатость при точении резцом с радиусом при вершине $r = 0$

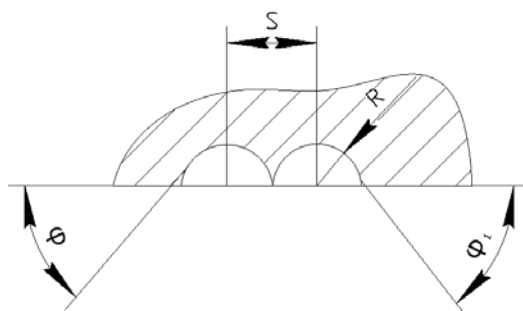


Рисунок 5.2 – Шероховатость при точении резцом с радиусом при вершине $r \neq 0$

Шероховатость поверхности (параметры и характеристики) рассматривается в соответствии с ГОСТ 2789–73. Согласно ГОСТу, шероховатость поверхности определяется средним арифметическим отклонением профиля R_a , высотой неровностей профиля по 10-ти точкам R_z , наибольшей высотой профиля R_{max} , средним шагом неровностей S_n , средним шагом местных выступов профиля S и относительной опорной длиной профиля t_p .

R_a – среднее арифметическое из абсолютных значений отклонений профиля в пределах базовой длины.

R_z – сумма средних абсолютных значений высот пяти наибольших выступов профиля в пределах базовой длины.

R_{max} – расстояние между линией выступов профиля и линией впадин профиля в пределах базовой длины.

В процессе обработки резанием на формирование микропрофиля обработанной поверхности влияют следующие основные факторы: геометрические

(углы в плане φ , φ_1 , радиус при вершине r , шероховатость формообразующей поверхности режущего инструмента R_u , количество участвующих в работе режущих кромок z); кинематические (подача S , смещение режущих кромок, неодинаковость углов в плане на участвующих в работе режущих кромок); факторы, влияющие на условия пластического деформирования материала в зоне резания – скорость резания V , время работы инструмента τ , радиус округления режущей кромки ρ , износ инструмента h , глубина резания t , передний угол γ , задний угол α ; свойства обрабатываемого материала; динамическое состояние системы резания; свойства и способы подвода СОЖ, а также вторичная температура T и коэффициент трения μ в зоне резания.

Оборудование, приборы и инструменты: токарно-винторезный станок; четыре заготовки из стали 45 длиной 220 мм и диаметром 70 мм; токарные проходные резцы ($\varphi = 30^\circ$, 45° и 60° ; $r = 0,2$; $0,8$ и $1,4$); штангенциркуль ШЦ-II-125-0,05 ГОСТ 166-80; профиллограф-профилометр Surfrest SJ-210.

Порядок проведения работы.

1 Изучить характеристики параметров шероховатости обработанной поверхности.

2 Выявить зависимости шероховатости обработанной поверхности от скорости резания, подачи, главного угла в плане φ и радиуса при вершине резца r .

Для изучения влияния скорости резания V на шероховатость исследуемой поверхности используют образец из стали 45 (рисунок 5.3). Образец обрабатывается проходным резцом с 4-гранной пластинкой твердого сплава. Углы в плане резца $\varphi = \varphi_1 = 45^\circ$. Обработку ведут с постоянной глубиной резания $t = 2$ мм и постоянной подачей $S = 0,3$ мм/об, а скорость резания изменяют для обработки каждого участка образца $V = 10, 20, 40$ и 80 м/мин.

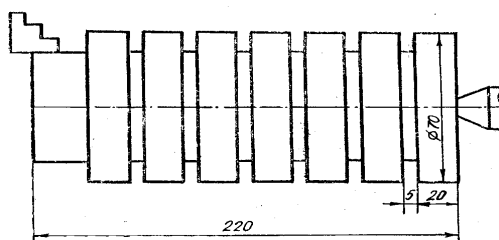


Рисунок 5.3 – Эскиз заготовки

После точения производят измерение параметра R_a на профиллографе-профилометре. Также вычисляют высоту неровностей Rz_p расчетным путем и сравнивают с результатами измерений (таблица 5.1).

Аналогично производят исследование влияния подачи S , главного угла в плане φ и угла при вершине резца r на шероховатость обработанной поверхности. Обработку образцов производят с постоянной глубиной резания $t = 2$ мм и скоростью резания $V = 120$ м/мин.

Переменные значения подачи для установления зависимости $R_a = f(S)$, $S = 0,07; 0,15; 0,2; 0,3; 0,47$ и $0,61$ мм/об.

Переменные значения главного угла в плане для установления зависимости $R_a = f(\varphi)$, $\varphi = 30^\circ; 45^\circ$ и 60° .

Переменные значения угла при вершине резца для установления зависимости $R_a = f(r)$, $r = 0,2; 0,8$ и $1,4$ мм.

По полученным значениям высоты неровностей Rz_p или среднего арифметического отклонения профиля строят графики зависимостей $R_a = f(V)$, $R_a = f(S)$, $R_a = f(\varphi)$, $R_a = f(r)$.

Содержание отчета. Цель работы. Схема обработки с указанием размеров заготовки. Схема измерения шероховатости. Результаты измерения и расчеты высоты неровностей. Графики зависимостей: $R_a = f(V)$, $R_a = f(S)$, $R_a = f(\varphi)$, $R_a = f(r)$. Выводы.

Таблица 5.1 – Экспериментальные данные

Серия опыта	Номер опыта	Угол в плане φ	Радиус резца r	Режим резания				Параметры шероховатости	
				Глубина t , мм	Подача S , мм/об	Частота вращения n , об/мин	Скорость резания V , м/мин	Rz_p , мм	R_a , мкм
Первая	1								
	2								
	3								
	4								
Вторая	1								
	2								
	3								
	4								
	5								
	6								
Третья	1								
	2								
	3								
Четвертая	1								
	2								
	3								

6 Исследование износа и стойкости резцов

Цель работы: ознакомиться с характером износа резцов, зависимостью износа резцов от времени работы, методом определения оптимального износа; получить зависимости стойкости резца от скорости резания; приобрести навыков измерения величины износа резца.

Износ и стойкость резцов. В процессе резания на рабочую часть резца, как и других режущих инструментов, действуют большие удельные силы, высокая температура, сила трения, другие факторы, приводящие резец к износу (затуп-

лению). В результате трения стружки о переднюю поверхность инструмента и задней поверхности инструмента о поверхность резания детали происходит изнашивание, истирание контактных площадок инструмента. На задней поверхности вследствие износа появляется площадка с задним углом, равным нулю; на передней поверхности появляется лунка (рисунок 6.1).

Появление площадки износа на задней поверхности инструмента искажает его форму, при этом увеличивается трение, ухудшается условие работы. При значительной величине площадки износа h_3 на задней поверхности инструмента резко возрастает сила резания и температура. Увеличение лунки на передней поверхности опасно только тогда, когда увеличивающаяся лунка и площадка износа по 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 h_3 на задней поверхности инструмента. Дополнительной мерой величины износа является глубина h_n и ширина b лунки на передней поверхности инструмента. Измеряется также расстояние от лунки до режущего лезвия f . Измерение производится с помощью лупы с делениями или инструментального микроскопа. Глубину лунки измеряют индикатором с игольчатым наконечником. Суммарный износ можно определить, взвешивая инструмент по мере его изнашивания.

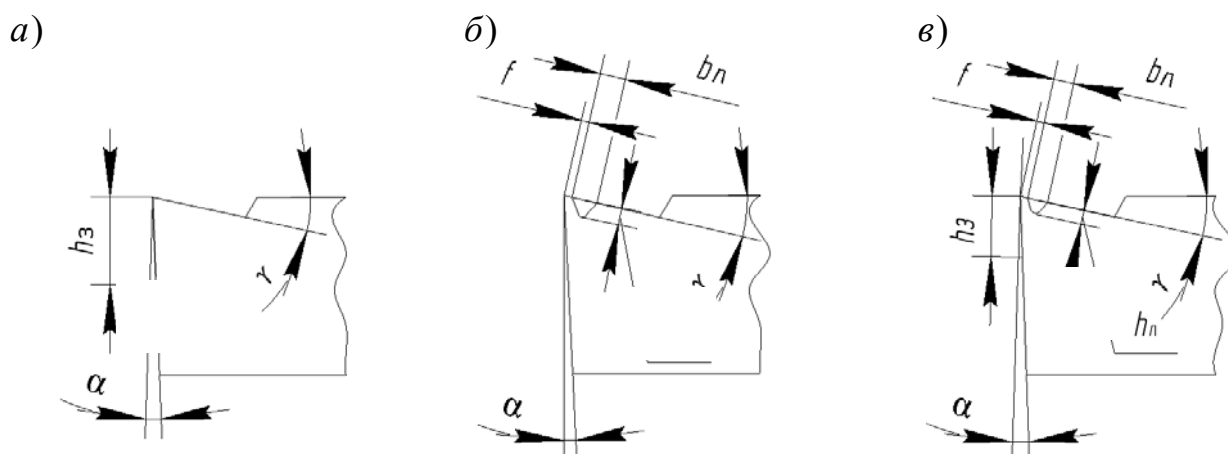


Рисунок 6.1 – Виды износа резцов

Применяя метод радиоактивных изотопов, можно сократить продолжительность опытов при исследовании влияния различных факторов на интенсивность износа режущего инструмента.

В любых условиях работы износ происходит по передней и задней поверхности 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 хрупких материалов износ будет наблюдаться только по задней поверхности инструмента. При увеличении скорости резания и толщины среза наблюдается одновременный износ по передней и задней поверхности одновременно. 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.

Закономерность нарастания величины износа в зависимости от времени работы инструмента выражается графиком, называемым кривой износа (рисунок 6.2).

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 приблизительно пропорционально времени работы.

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

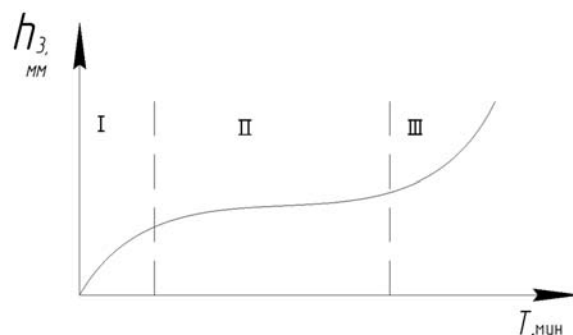


Рисунок 6.2 – Зависимость износа задней поверхности резца от времени его работы

При росте в некоторый момент износ по передней и задней поверхности очень быстро увеличивается в размерах, лунка на передней поверхности и площадка износа на задней поверхности соединяются, и режущая кромка разрушается. С этого момента начинается катастрофический износ, которого допускать нельзя, т. к. 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. Усиленный 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 должен быть 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);

- *силовой критерий*, при котором о затуплении резца судят по резкому увеличению сил резания. Для этого необходимо работать, применяя динамометры;

- *технологический 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 техническим требованиям к ней.

Каждой величине износа по задней поверхности соответствует определенная величина радиального износа. Из-за этого деталь получается конусной, и ее размеры могут выходить из поля допуска (рисунок 6.3);

- *оптимальный критерий* (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 обеспечивается наибольший полный период стойкости режущего инструмента.

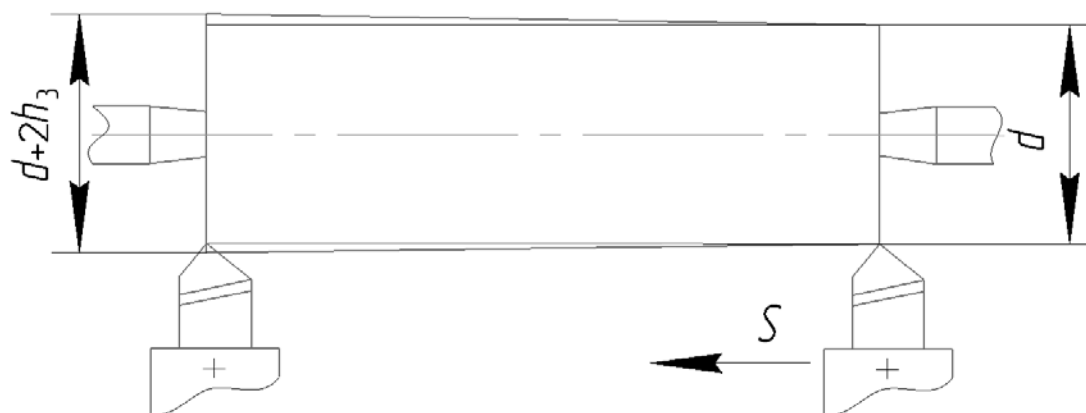


Рисунок 6.3 – Схема влияния износа резца на размер обработанной поверхности

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.

Иногда для выражения технологических возможностей стойкость измеряют в метрах пути резания (линейная стойкость) T_e 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.

Наибольшая суммарная стойкость (общий срок службы или 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:

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

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 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 (рисунок 6.4).

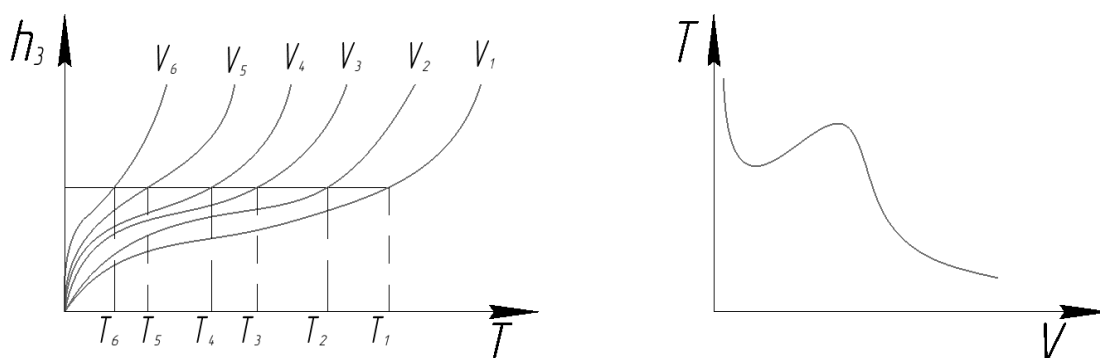


Рисунок 6.4 – Зависимость между скоростью резания и стойкостью резца

Такая зависимость объясняется тем, что при малых скоростях температура резания невысока и интенсивность износа также возрастает медленно, по мере увеличения скорости (при невысоких скоростях резания). С увеличением температуры на контактных площадках в каком-то диапазоне температур увеличиваются молекулярное слипание в местах контакта и интенсивность адгезионного износа. При дальнейшем повышении скорости резания и температуры слипание между стружкой и резцом уменьшается, облегчается относительное скольжение, интенсивность адгезионного износа снижается и стойкость повышается. В этом диапазоне температур (особенно 600 °С...800 °С) также несколько повышается ударная вязкость твердого сплава. При дальнейшем повышении скорости и возрастании при этом температуры резко снижаются твердость и прочность твердого сплава, что приводит к резкому повышению интенсивности износа инструмента и, следовательно, к резкому снижению стойкости. 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 $T = f(u)$. Эта зависимость выражается формулами

$$T = C_T / V^u; \quad V = C_V / T^m; \quad m = 1/u, \quad (6.2)$$

где m – показатель относительной скорости, характеризующий влияние заданной стойкости на допустимую скорость резания;

C_T, 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, т. к. уже при невысоких скоростях резания повышение температуры приведет к резкому снижению режущих свойств инструментального материала и снижению стойкости.

Оборудование, приборы и инструменты: токарно-винторезный станок; микроскоп; заготовки диаметрами 80...100 мм и $L = 400...600$ мм из серого чугуна; резцы токарные проходные правые из быстрорежущей стали Р6М5 с углами заточки $\gamma = 12^\circ$, $\alpha = 8^\circ$, $\varphi = 45^\circ$ (не менее 4 шт.); штангенциркуль; угломер; секундомер.

Порядок выполнения работы.

1 Ознакомиться с инструментами, приспособлениями и станком.

2 Измерить геометрические параметры резцов.

3 По нормативным материалам для обработки чугуна быстрорежущим резцом с углами заточки $\gamma = 12^\circ$, $\alpha = 8^\circ$, $\varphi = 45^\circ$ и выбранной глубине резания $t = 1,5...2,5$ мм и подаче $S = 0,3...0,5$ мм/об определить скорость резания.

По найденной скорости резания определить частоту вращения и принять частоту вращения по станку.

4 По назначенным режимам резания (t, S, V) произвести обработку заготовки.

Для определения стойкости необходимо сначала установить предельно допустимую величину износа резца, соответствующую выбранному для данных условий работы критерию затупления (или критерию износа). Принимаем в работе за критерий затупления оптимальный износ, обеспечивающий наибольшую долговечность инструмента, т. е. его наибольший срок службы (наибольшую суммарную стойкость) ΣT .

Резание продолжают до полного затупления резца ($h_3 = 1,8...2,0$ мм). Периодически, через каждые 1,5...3 мин, резец останавливают и, не снимая его, измеряют величину износа, соответствующую времени резания от начала работы до момента остановки резца, т. е. времени, за которое образовалась эта площадка износа. Затем резание продолжают дальше; полученные данные заносятся в протокол отчета.

Величину износа измеряют лупой с делениями или с помощью микроскопа. Отсчет величины площадки износа ведется по делениям в окуляре и умножается на поправку на фактическое фокусное расстояние. На основании полученных данных строится кривая износа (см. рисунок 6.2).

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

5 Определить количество переточек, допустимых резцом при определенной величине износа по задней поверхности. Для восстановления геометрии резца при его переточке по задней поверхности надо удалить слой металла, толщина которого, измеренная в направлении передней поверхности, будет равна (см. рисунок 6.1):

$$H = h + a = \frac{h_3}{\cos \gamma / (\operatorname{tg} \alpha \cdot \sin \gamma)} + a, \quad (6.3)$$

где γ – передний угол резца, град;

α – задний угол резца, град;

a – допуск на переточку (в среднем берется $a = 0,15$ мм).

После всех переточек на резце должна остаться часть пластинки, которая еще прочно удерживается на державке, т. е. пластинку по ширине можно использовать примерно на $2/3$. Полезная ширина пластинки определяется по эмпирической формуле

$$l = \frac{2}{3}(b - 2), \quad (6.4)$$

где b – ширина пластинки резца.

Поэтому допустимое количество переточек $K = \frac{l}{H}$.

6 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 соответствующую данному износу продолжительность работы резца (если эти замеренные величины износа поочередно считать предельно допустимыми, то продолжительность работы до такой величины износа будет соответствующей ему стойкостью T , мин), находят для каждого значения h_3 суммарную стойкость

$$\sum T = T(K + 1). \quad (6.5)$$

7 По полученным данным построить график зависимости $\Sigma T = f(h_3)$. Чем больше допустимая величина износа, тем больше время работы до его достижения, тем больший слой металла необходимо срезать с резца при его переточке. Следовательно, тем меньше возможное для этого резца количество переточек. Поэтому суммарная стойкость (срок службы или долговечность) резца с увеличением допустимого износа сначала увеличивается, а затем, когда количество допустимых переточек становится слишком малым, уменьшается (рисунок 6.5).

Износ, соответствующий максимальной ΣT резца, является оптимальным, т. е. наиболее выгодным. Откладывая его величину на кривой износа, можно найти оптимальную стойкость резца при данной скорости резания (рисунок 6.6).

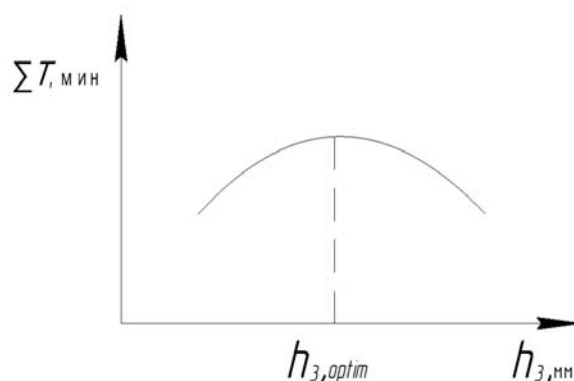


Рисунок 6.5 – Зависимость полного периода стойкости резца от величины износа по задней поверхности

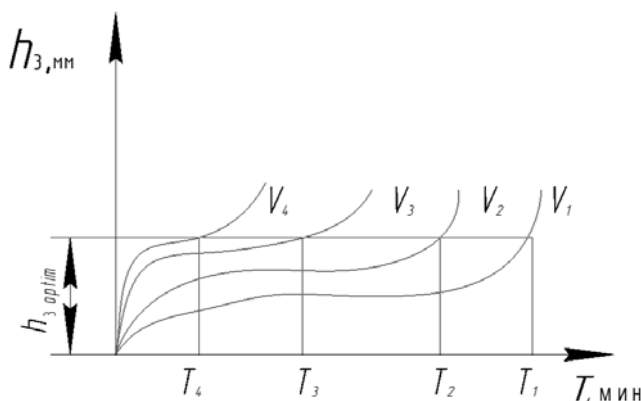


Рисунок 6.6 – Зависимость износа задней поверхности резца от времени его работы при различных скоростях резания

8 Для определения зависимости стойкости от скорости резания работу проводят при различных скоростях резания, т. е. работают до затупления с неизменными условиями резания, изменяя для каждого случая только скорость резания V . Полученные данные заносятся в протокол отчета. На их основании строятся кривые износа для различных скоростей. Зная предельно допустимую при выбранном критерии затупления величину износа, можно найти по

графику стойкость, соответствующую каждой скорости резания (см. рисунок 6.6). Величины стойкости, соответствующие различным скоростям, записываются в соответствующую таблицу протокола отчета. По этим данным строится график зависимости стойкости резания $T = f(V)$.

9 Обработывая полученные результаты графоаналитическим методом, получить коэффициенты и показатели степени в формулах

$$T = \frac{C_T}{V^u}; \quad V = \frac{C_V}{T^m}. \quad (6.6)$$

Для этого построить график зависимости $T = f(u)$ в логарифмических координатах.

Записать уравнение полученной прямой:

$$\lg T = \lg C_m + u \lg u. \quad (6.7)$$

Определить коэффициент

$$\mu = \operatorname{tg} \alpha = -\operatorname{tg} \beta. \quad (6.8)$$

Перевести уравнение из логарифмической формы в степенную зависимость (потенцировать):

$$T = \frac{C_T}{V^u}.$$

Определить коэффициент C_T . Он равен ординате при значении скорости резания $V = 1$, но найти его по графику затруднительно, т. к. угол подъема прямой велик. Поэтому C_T определяется расчетом:

$$C'_T = T_1 \cdot V_1^u; \quad C''_T = T_2 \cdot V_2^u; \quad C'''_T = T_3 \cdot V_3^u. \quad (6.9)$$

Коэффициент C_T находится как среднее арифметическое нескольких значений:

$$C_T = \frac{C'_1 + C''_2 + C'''_3}{3}. \quad (6.10)$$

Выполнение работы заканчивается вписыванием в отчет формул с численными значениями коэффициента и показателя степени:

$$T = \frac{C_T}{V^u}; \quad V = \frac{C_V}{T^m}.$$

Содержание отчета. Цель работы. Результаты измерений в таблице 6.1. Результаты вычислений в таблице 6.2. Схема затупления рабочих поверхностей. Зависимость износа резца от времени его работы (кривая износа). Графики зависимости $\Sigma T = f(h_3)$, $h_3 = f(T)$. Выводы по работе.

Таблица 6.1 – Экспериментальные данные

Диаметр заготовки, мм	Режим резания				Длина одного прохода L , мм	Износ по передней поверхности h_n , мм
	t , мм	S , мм/об	n , мин ⁻¹	V , м/мин		

Таблица 6.2 – Экспериментальные данные

Время резания до замера износа T , мин	Износ по задней поверхности h_3 , мм	Величина на передней поверхности резца h_n , мм	Величина на передней поверхности резца H_n , мм	Количество переточек K	Полный период стойкости резца ΣT , мин

7 Оптимизация режимов резания при сверлении

Цель работы: ознакомиться с методикой нахождения оптимальных режимов резания при сверлении.

Назначение оптимального режима резания заключается в выборе наиболее выгодного сочетания скорости резания и подачи, обеспечивающих в данных условиях с учетом целесообразного использования режущих свойств инструмента и кинематических возможностей оборудования, наибольшую производительность общественного труда и наименьшую себестоимость операции. При этом должны быть наиболее полно использованы режущая способность инструмента и прочность, динамические возможности станка при соблюдении технических условий на изготовление детали.

Диаметр инструмента выбирается в зависимости от размера обрабатываемого отверстия и характера обработки. При сверлении для сокращения времени рекомендуется обработку вести в один проход.

Для уменьшения силы подачи при сверлении рекомендуется принять сверла с подточкой перемычки и со срезанной перемычкой.

Длина сверла сильно влияет на период его стойкости. Во всех случаях необходимо стремиться использовать сверла минимальной длины, даже несмотря на то, что это уменьшает количество возможных переточек. Кроме того, длинные сверла подвергаются износу преимущественно по ленточкам с образованием прямой конусности, что лишает возможности их нормальной переточки

по задним поверхностям на небольшую длину, вынуждает укорачивать их об-резкой изношенной по ленточкам части, что сокращает полный период стойко-сти сверла.

Минимальная длина рабочей части (до конца стружечных канавок) сверла, необходимая для данной операции:

$$l_{\min} = l_{ce} + l_{em} + l_{cmp}, \quad (7.1)$$

где l_{\min} – необходимая длина стружечных канавок, мм;

l_{ce} – длина сверления с учетом входа и выхода сверла, мм;

l_{em} – длина кондукторной втулки (при сверлении без кондуктора $l_{em} = 0$), мм;

l_{cmp} – длина рабочей части, необходимая для свободного выхода стружки, мм.

Длина сверления с учетом входа и выхода сверла

$$l_{ce} = l_{омв} + l_{вх} + l_{вых}, \quad (7.2)$$

где $l_{омв}$ – глубина отверстия, мм;

$l_{вх}$ – глубина врезания (для стандартных сверл $l_{вх} = 0,4d$);

d – диаметр сверла, мм;

$l_{вых}$ – глубина выхода сверла (для сверления глухого отверстия $l_{вых} = 0$, сквозного – $l_{вых} = 2...3$ мм).

Длина выхода стружечной канавки

$$l_{cmp} = 2d. \quad (7.3)$$

Если расчет оптимальных режимов резания производится с помощью ЭВМ, значение l стандартных сверл можно определить с помощью приближен-ных зависимостей, приведенных в таблице 7.1.

После выбора серии сверла стандартное значение длины рабочей части сверла l учитывается при дальнейших расчетах оптимальных режимов резания и при вычислении количества возможных переточек сверла.

Таблица 7.1 – Формулы для расчета l_{\min}

Тип хво- стовика	Цилиндрический				Конический		
	Короткая ГОСТ 4010–77	Средняя ГОСТ 10902–77	Длинная ГОСТ 12122–77	Длинная ГОСТ 886–77	Средняя ГОСТ 10903–77	Длинная ГОСТ 12121–77	Удлиненная ГОСТ 2092–77
$l, \text{ мм}$	$6d^{0,8}$	$15d^{0,75}$	$27d^{0,6}$	$37d^{0,5}$	$15d^{0,7}$	$25d^{0,65}$	$58d^{0,45}$

Определение количества возможных переточек сверла. Длина рабочей части сверла, которая может быть сточена в процессе переточек:

$$l_n = l - l_{\min}. \quad (7.4)$$

Количество возможных переточек

$$i = l_n - \Delta l, \quad (7.5)$$

где Δl – длина стачивания за одну переточку, может быть определена по нормативам или приближенно по следующим формулам:

– для сверл, обрабатывающих сталь,

$$\Delta l = 0,5d^{0,4};$$

– для сверл, обрабатывающих чугуны,

$$\Delta l = 0,4d^{0,4}.$$

Вычисленное по формуле (7.5) количество возможных переточек сверла используется в дальнейшем для определения себестоимости сверлильной операции.

Расчет оптимальных параметров режима резания при сверлении. Режимы резания определяются по эмпирическим формулам, в которых отражается влияние параметров сверлильной операции (диаметр d , выбранный период стойкости T , группа обрабатываемого материала и его твердость и т. п.) на значениях рекомендуемой скорости главного движения резания и подачи. Полагается, что использование в формуле для расчета скорости главного движения резания нормативного периода стойкости T дает скорость главного движения резания, обеспечивающую минимальную себестоимость операции сверления. Поскольку при отсутствии других ограничительных факторов наименьшая себестоимость операции должна служить основным критерием оптимальности выбранных режимов, расчет оптимальных режимов резания в первом приближении производится с учетом нормативного периода стойкости.

Определение оптимального значения подачи. Рекомендуемое значение подачи S_o зависит от физико-механических свойств обрабатываемого материала, диаметра сверла, характера операции и некоторых других факторов.

Для обычных условий сверления

$$S_o \approx K_S \cdot K_{HB} \cdot d, \quad (7.6)$$

где S_o – подача, мм/об;

K_S – коэффициент, определяющий группу обрабатываемого материала;

K_{HB} – поправочный коэффициент, учитывающий твердость обрабатываемого материала l_{\min} ;

d – диаметр сверла, мм.

После определения по формуле (7.6) значение подачи уточняется по паспортным данным сверлильного станка, т. е. берется ближайшее паспортное

значение подачи S_o .

Если условия операции сверления значительно отличаются от обычных, значение подачи S_o выбирается соответствующим ближайшему или меньшему паспортному значению по сравнению с тем, что определено по формуле (7.6). Выбор уменьшенного или увеличенного значения подачи определяется с учетом следующих условий:

– меньшее значение подачи следует использовать при сложных условиях работы (сверление наклонного отверстия, отверстия повышенной точности (выше Н12) перед развертыванием, при сверлении под резьбу или деталей пониженной жесткости, отверстия глубиной более 10 диаметров и т. п.);

– большее значение подачи можно использовать при работе сверлами короткой серии, при глубине отверстия менее трех диаметров и т. п.

Определение оптимального значения скорости главного движения резания.

Скорость главного движения резания:

– для обработки стали

$$v = \frac{C_v \cdot d^y}{T^m \cdot S_o^z} \cdot \left(\frac{A_v}{HB} \right)^x \cdot K_{MV} \cdot K_{общ}; \quad (7.7)$$

– для обработки чугуна

$$v = \frac{C_v \cdot d^y}{T^m \cdot S_o^z} \cdot \left(\frac{A_v}{HB} \right)^x \cdot K_{общ}, \quad (7.8)$$

где d – диаметр сверла, мм;

T – принятый период стойкости сверла (нормативные значения периода стойкости определяются по справочникам; приближенные значения можно определить по эмпирическим зависимостям: $T = C_T d^{0,5}$ – для сверл, обрабатывающих сталь; $T = C_T d^{0,5}$ – для сверл, обрабатывающих чугун);

S_o – подача на оборот сверла, мм/об;

HB – значение твердости обрабатываемого материала в единицу Бриннеля;

K_{MV} – поправочный коэффициент, учитывающий группу обрабатываемого материала;

$K_{общ}$ – поправочный коэффициент, учитывающий конкретные условия сверления.

Значения коэффициентов и показателей степеней в формулах (7.7) и (7.8) можно определить из таблицы 7.2.

Определение частоты вращения шпинделя для рекомендуемой скорости главного движения резания в общем случае:

$$n = \frac{1000 \cdot v}{\pi \cdot d}. \quad (7.9)$$

Окончательно выбираем ближайшее паспортное значение n_{cm} .
Далее определяется уточненная скорость главного движения резания

$$V_{cm} = \frac{\pi \cdot d \cdot n_{cm}}{1000}. \quad (7.10)$$

Таблица 7.2 – Показатели степеней в формуле (7.7)

Коэффициент или показатель степени	При обработке стали	При обработке чугуна
A_V	200	190
Z	0,5	0,475
C_T	10	17
C_V	9,8	8,3
y	0,4	0,35
t	0,2	0,125
x	0,9	1,3

Установленные значения параметров режима резания S_o и n_{cm} являются в первом приближении оптимальными для данных условий сверлильной операции. Однако для принятия решения об использовании того или иного режима резания следует проанализировать основные технологические показатели сверлильной операции при использовании ближайших паспортных значений S_o и n_{cm} . При расчете оптимальных режимов резания с помощью ЭВМ такой анализ должен производиться в обязательном порядке. При этом анализируются показатели операции для одного соседнего большего и одного соседнего меньшего паспортного значения S_o и n_{cm} . Таким образом, анализируются девять возможных вариантов режима резания, охватывающих практически весь разумный диапазон режимов резания.

Паспортные данные основных типов вертикально-сверлильных станков приведены в таблице 7.3.

Таблица 7.3 – Паспортные данные станков

Модель станка	2Н118	2Н125	2Н135	2Н150
Максимальный диаметр сверла d_m , мм	18	25	35	50
Допустимая сила подачи станка P_x , Н	5600	9000	15000	23500
Мощность двигателя станка N_{cm} , кВт	1,5	2,8	4,0	7,5

Определение осевой составляющей силы резания P_x и мощности резания N_p .
Осевая составляющая силы резания (в ньютонах):

– для сверления стали

$$P_x = 904 \cdot d \cdot S_o^{0,7} \left(\frac{HB}{200} \right)^{0,75} \cdot K_{MP}; \quad (7.11)$$

– для сверления чугуна

$$P_x = 568 \cdot d \cdot S_o^{0,8} \left(\frac{HB}{190} \right)^{0,6}. \quad (7.12)$$

Коэффициент K_{MP} характеризует группу обрабатываемой стали.

Мощность резания (в киловаттах):

– для сверления стали

$$N_p = 0,0114 \cdot v_{cm} \cdot d \cdot S_o^{0,71} \left(\frac{HB}{200} \right)^{0,75} \cdot K_{MP}; \quad (7.13)$$

– для сверления чугуна

$$N_p = 0,0069 \cdot v_{cm} \cdot d \cdot S_o^{0,8} \left(\frac{HB}{190} \right)^{0,6}. \quad (7.14)$$

Необходимая мощность двигателя станка определяется как N_p/η (где η – КПД станка, $\eta = 0,8$).

Для выбора модели сверлильного станка необходимо обеспечить следующие условия: $D_m > d$; $P_{xcm} > P_x$; $N_{cm} > N_p/\eta$.

Порядок выполнения работ.

1 Ознакомиться с оптимизацией режимов резания с помощью ЭВМ.

2 Рассчитать:

- минимальную длину рабочей части сверла;
- возможное количество переточек;
- скорость резания;
- частоту вращения шпинделя.

3 Подобрать:

- станок;
- длину рабочей части сверла.

4 Определить n_{cm} ; V_{cm} ; осевую составляющую силы резания; мощность резания.

5 Написать вывод по работе.

Содержание отчета. Цель работы. Результаты расчетов режимов резания при сверлении. Выводы по работе.

Список литературы

- 1 **Попок, Н. Н.** Теория резания: учебное пособие / Н. Н. Попок. – Минск: ИВЦ Минфина, 2019. – 372 с.
- 2 **Кудряшов, Е. А.** Резание материалов: учебное пособие / Е. А. Кудряшов. – Москва: Альфа-М; ИНФРА-М; 2014. – 224 с.
- 3 **Барботько, А. И.** Резание материалов: учебное пособие для вузов / А. И. Барботько. – Старый Оскол: ТНТ, 2011. – 432 с.
- 4 Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. / Под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова. – Москва: Машиностроение, 1985. – Т. 2. – 496 с.
- 5 **Ящерицын, П. И.** Теория резания: учебник / П. И. Ящерицын, Е. Э. Фельдштейн, М. А. Корниевич. – 2-е изд., испр. и доп. – Минск: Новое знание, 2006. – 512 с.
- 6 Обработка металлов резанием: справочник технолога / А. А. Панов [и др.]; под общ. ред. А. А. Панова. – Москва: Машиностроение, 1988. – 736 с.