

ПОСОБИЕ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «РЕЗАНИЕ МАТЕРИАЛОВ И ФИЗИКО- ХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

РАЗДЕЛ I. РАЗРУШЕНИЕ – ЕДИНАЯ ОСНОВА МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ

Процесс резания представляет собой комплекс чрезвычайно сложных явлений, зависящих от физико-механических свойств обрабатываемого материала, качества режущего инструмента, условий резания, состояния станка, жесткости технологической системы.

Процесс резания сопровождается упругими и пластическими деформациями, разрушением материала, трением, износом режущего инструмента, вибрациями отдельных деталей и узлов и технологической системы (станок-приспособление-инструмент-деталь) в целом. Знание закономерностей этих явлений позволяет выбирать оптимальные условия, обеспечивающие производительную и качественную обработку деталей

Деформация металлического материала при достижении определенных напряжений может заканчиваться его разрушением.

Под *разрушением* принято понимать процесс необратимого нарушения сплошности материала и разделение его на отдельные части под действием напряжений.

При этом разрушение представляет собой процесс, состоящий из ряда последовательных стадий, которые включают

- а) зарождение трещин субмикроскопических размеров,
- б) их развитие и, наконец,
- в) заключительное макроскопическое разделение образца на отдельные части.

Типы разрушения материалов:

- сжимающие (отрицательные нормальные),
- растягивающие (положительные нормальные),
- касательные.

Сжимающие напряжения разрушения не вызывают, оно происходит в результате воздействия растягивающих или касательных напряжений

В теории прочности различают разрушение путем отрыва или скола (под действием растягивающих напряжений) и путем среза (под действием касательных напряжений). Отрыв обычно соответствует такому разрушению, которое происходит без сколь-нибудь заметной предварительной пластической деформации. Однако разрушению путем среза подобная деформация (порой значительная по величине) всегда предшествует. По этой причине принято считать, что отрыв обычно

соответствует так называемому хрупкому разрушению, а срез - вязкому разрушению.

Виды разрушений материалов при обработке:

- кинематическое разрушение;
- физико-химическое разрушение;
- механическое разрушение;
- тепловой вид разрушения;
- химический вид разрушения;

Кинематическое разрушение (кинематика).

Процесс резания представляет собой комплекс чрезвычайно сложных явлений, зависящих от физико-механических свойств обрабатываемого материала, качества режущего инструмента, условий резания, состояния станка, жесткости технологической системы.

Процесс резания сопровождается упругими и пластическими деформациями, разрушением материала, трением, износом режущего инструмента, вибрациями отдельных деталей и узлов и технологической системы (станок-приспособление-инструмент-деталь) в целом. Знание закономерностей этих явлений позволяет выбирать оптимальные условия, обеспечивающие производительную и качественную обработку деталей (рис.1.1).

Кинематика процесса резания — это закономерности относительного движения инструмента и заготовки без учета физических явлений, протекающих в зоне резания. При этом технологическая станочная система считается абсолютно жесткой и не зависящей от каких-либо физико-химических воздействий. Изучение и анализ кинематики резания имеет большое значение, поскольку при определенном соотношении скоростей абсолютных движений, которые совершаются при резании, кинематика определяет траекторию рабочего движения инструмента относительно детали.

Важным явлением процесса резания является *разрушение*. Оно характерно для процесса стружкообразования и определяет характер работы режущего инструмента. При стружкообразовании разрушение может быть как основным, так и сопутствующим показателем. Основным оно будет при резании хрупких материалов, когда под воздействием передней поверхности инструмента непосредственно у режущей кромки образуется система трещин, развивается опережающая магистральная трещина и отделяется элемент стружки. При резании пластичных материалов разрушение происходит только после значительных упругих и пластических деформаций. Интенсивность их протекания зависит от схемы напряженного состояния, тепловых, химических и электромагнитных процессов и является основным параметром стружкообразования.

Механическое разрушение (обработку) производят путем внедрения в

поверхность обрабатываемой заготовки клинообразного твердого тела – режущей части инструмента, который движется под воздействием привода станка. В результате этого в зоне соприкосновения режущего клина инструмента и срезаемого слоя заготовки происходит сложный физико-химический процесс пластической деформации и разрушения металла, приводящий к образованию стружки и отделению ее от заготовки. Установлено, что процесс стружкообразования при механической обработке является одной из разновидностей пластического деформирования и поверхностного *диспергирования*, происходящего при сложнапряженном состоянии материала срезаемого слоя.

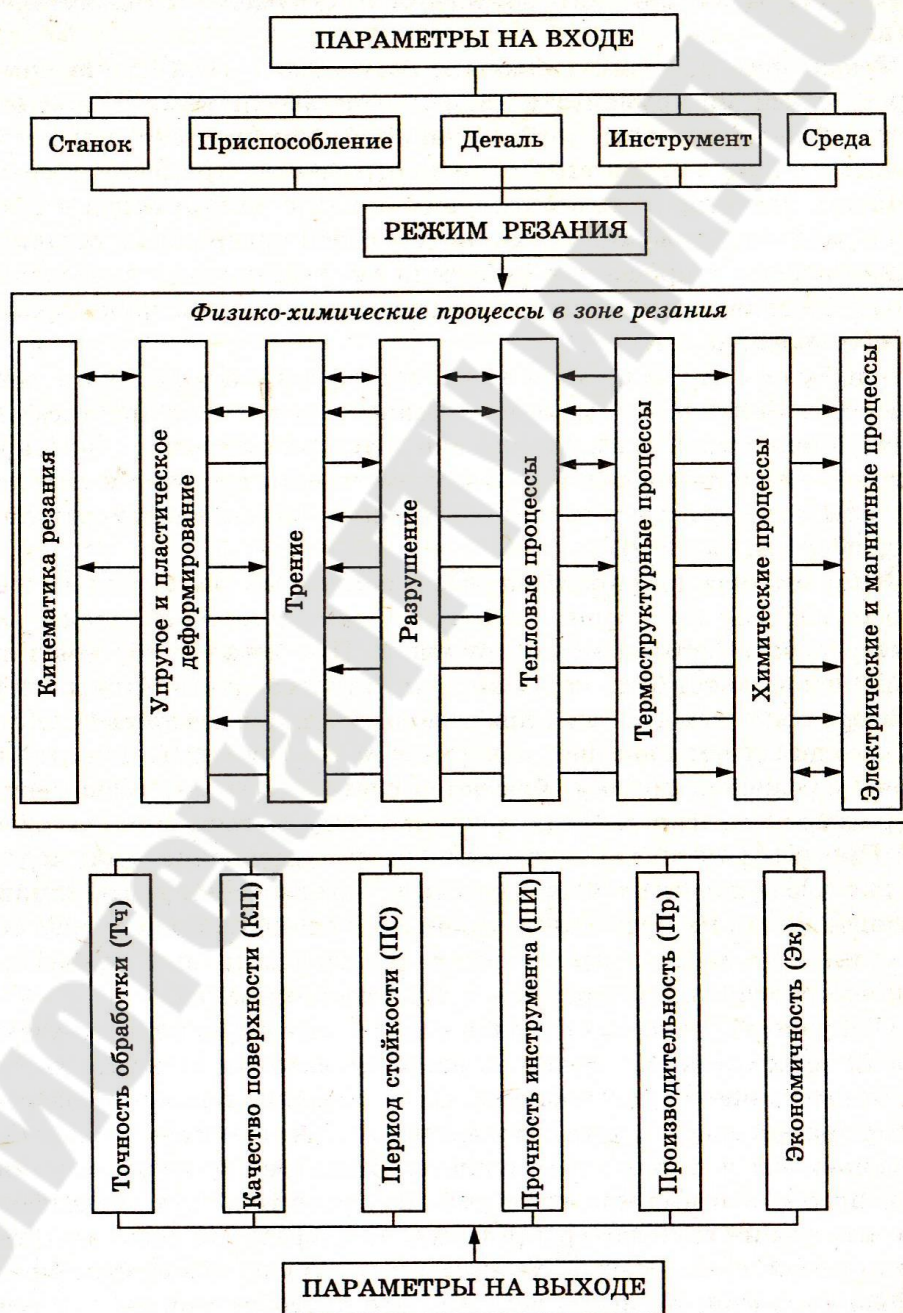


Рис. 1.1. Схема взаимосвязей в системе резания

Диспергирование – это смешивание, по меньшей мере, двух субстанций, которые: не растворяются друг в друге, трудно растворяются друг в друге или не вступают в реакцию друг с другом. В процессе диспергирования одно вещество (дисперсионная фаза) распределяется по второму веществу (сплошная фаза).

Механическая обработка может использовать два вида резания непрерывный и прерывистый. Непрерывный процесс резания - это точение, сверление, зенкерование, развертывание, резьбонарезание. Прерывистый процесс резания - это строгание, долбление, протягивание, фрезерование. Он осуществляется путем периодического повторения цикла, т.е. резания и отдых инструмента. При этом важное значение имеют физико-химические процессы, связанные с врезанием и выходом клина инструмента.

Тепловые процессы, сопровождающие процесс резания, — одни из наиболее важных процессов в физико-химическом механизме этого процесса. Они определяют закономерности превращений энергии в различных процессах, сопровождающихся поглощением и выделением теплоты. Наиболее существенно при этом преобразование механической энергии в тепловую, вызывающее изменение температуры резания. Температурой резания устанавливается связь между химическим, структурным строением и физико-химическими свойствами исходного материала заготовки, с одной стороны, и стружки и поверхностного слоя обработанной детали — с другой.

Термоструктурные процессы вызывают изменение строения и физико-химических свойств обрабатываемого материала под действием сил и температур, возникающих при обработке. Наиболее интенсивно они протекают при энергонапряженных видах обработки, например шлифовании, лезвийной обработке с высокими скоростями резания и т.д. При этом под воздействием высоких температур изменяется микроструктура поверхностного слоя, возникают значительные остаточные напряжения, микротрещины, изменяется дислокационная структура материала. Термоструктурные изменения физико-механических свойств обрабатываемого материала, в свою очередь, оказывают обратное воздействие на тепловые и влияют на электрические и магнитные процессы в зоне резания. Так, на изменения в микроструктуре затрачивается значительное количество теплоты и, как следствие, стабилизируется уровень температур в зоне резания, несмотря на возрастание, например, скорости резания. Различия в микроструктурах материала влияют на его удельное электросопротивление, магнитную проницаемость, коэрцитивную силу и другие электромагнитные свойства.

Химическим называется метод обработки, использующий химическую энергию непосредственно для технологических целей. В этом

случае обработку, т.е. снятие определенного слоя металла, осуществляют в химически активной среде. Например, глубокое контурное травление (химическое фрезерование). Оно заключается в регулируемом по времени и месту растворении металла с поверхности путем травления в кислотных и щелочных ваннах.

Химические процессы протекают вследствие возникновения на контактных площадках химически чистых (ювенильных) поверхностей, которые находятся в активном состоянии и существенно влияют на процесс резания. Одна из причин этого — образование оксидных пленок, которые существенно снижают коэффициенты трения на контактных площадках, изменяют условия наростообразования и ряд других параметров процесса резания. Такой процесс, как диффузия, в значительной степени определяет интенсивность изнашивания и уровень стойкости режущего инструмента. Широкий диапазон химических процессов наблюдается в результате использования технологических сред. При этом изменяются как параметры процесса резания, так и эксплуатационные свойства поверхностного слоя детали. Интенсивность химических процессов в значительной степени связана с уровнем температур в зоне резания.

Однако существуют химические методы обработки, использующие химическую энергию непосредственно для технологических целей. В этом случае обработку, т.е. снятие определенного слоя металла, осуществляют в химически активной среде. Например, глубокое контурное травление (химическое фрезерование). Оно заключается в регулируемом по времени и месту растворении металла с поверхности путем травления в кислотных и щелочных ваннах.

Электрические и магнитные процессы обусловлены несколькими процессами, среди которых интенсивный нагрев зоны контакта и образование термоЭДС в замкнутой цепи станок — приспособление — инструмент — деталь, возникновение ЭДС самоиндукции, поперечный термомагнитный эффект и др.

Таким образом, независимо от метода обработки качество системы резания определяется ее механическими, тепловыми, электрическими, магнитными, химическими и другими свойствами. В соответствии с этим систему резания можно разделить на ряд частных подсистем: механическую, тепловую и т.д. Все они являются замкнутыми, т.е. выход последнего элемента связан со входом в первый. Закономерности функционирования таких систем рассматривает теория автоматического регулирования.

Классификация способов обработки деталей резанием производится по следующим признакам:

1. Тип энергии, подводимый в зону обработки. Типы энергии являются механическая, электрическая, химическая, тепловая.

2. Способ подводы энергии. Он определяется взаимным положением заготовки и рабочих поверхностей инструмента в пространстве и его измерения во времени.

3. Вид физико-химического механизма. Он играет ведущую роль в снятии материала удаляемого слоя и определяет наименования данного метода обработки. Основными физико-химическими процессами, обуславливающими снятие материала, являются пластическая деформация с последующим вязким или хрупким разрушением, плавление, испарение, анодное растворение, эрозионное разрушение.

Основным химическим процессом, используемым для снятия материала, является травление (Химическое разрушение) происходящее в результате протекания определенных реакций технологической среды с заготовкой.

4. Схема формообразования. Она определяет кинематику процесса обработки. Совокупность относительных движений инструмента и обрабатываемой заготовки, необходимых для получения заданной поверхности, называемой кинематической схемой обработки.

Схема формообразования изучает закономерности относительного движения инструмента и заготовки без учета физических явлений, протекающих в зоне обработки, действующих сил, температуры активных сред.

Широко используются комбинированные способы обработки.

1. Способы обработки, основанные с одновременным механическим и химическим воздействием на удаляемый слой – механическая обработка с подачей в зону резания активных смазочно-охлаждающих жидкостей и химико-механическая обработка. В последнем методе удаление металла происходит, прежде всего, в результате химических реакций между обрабатываемой поверхностью и технологической средой при одновременном механическом воздействии, интенсифицирующем процесс. Например, химико-механическая обработка в растворах солей металлов.

2. Способы обработки, основанные на термомеханическом воздействии - резанием с предварительным подогревом заготовок, резание с непрерывным нагревом материала срезаемого слоя в процессе движения резца (инструмента).

3. Способы обработки, основанные на сочетании механического вибрационного воздействия с равномерным механическим или другими физическими видами воздействия. Вибрационное резание осуществляется путем наложения вибраций на обычную принятую кинематическую схему механической обработки, резание с наложением колебаний ультразвуковой частоты является его частным случаем (выше 16 кГц). Снятие материала

может происходить в результате периодического воздействия абразивных частиц, находящихся в поле ультразвуковых колебаний.

4. Способы обработки, основанные на совмещении электрического воздействия с другими видами воздействия. К ним относятся электроконтактная и анодно-механическая обработка. Электроконтактная обработка осуществляется путем удаления материала в сочетании электротермического и электроэрозионного воздействий с механическим выносом образующих продуктов.

Классификация физико-химических способов обработки материалов.

В современном машиностроении при изготовлении ответственных деталей применяются физико-химические способы размерной и упрочняюще-чистовой обработки. Эти способы дополняют, а иногда заменяют традиционные процессы резания. Постоянно растущие требования к качеству, надежности и долговечности изделий делают актуальными создание и применение новых методов обработки и упрочняющей технологии для повышения износостойкости, коррозионной стойкости, жаропрочности и других эксплуатационных характеристик. На рис.1.1. представлена классификация физико-химических методов обработки материалов.

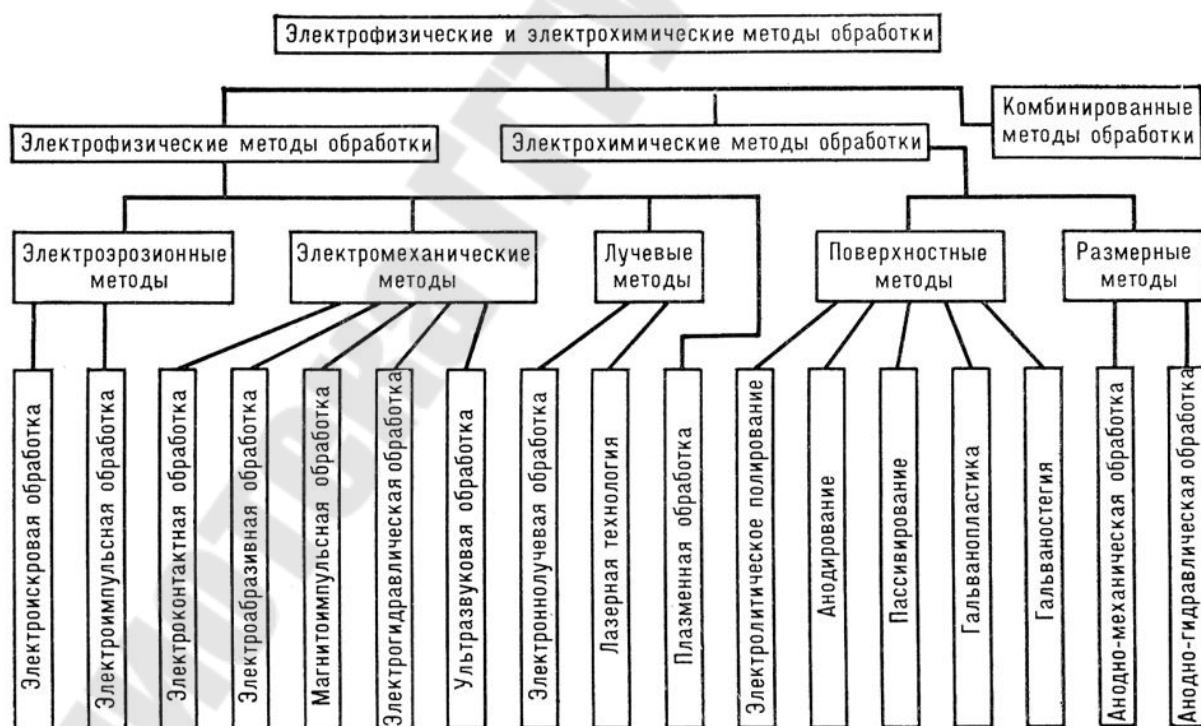


Рис. 1.2. Классификация физико-химических методов обработки материалов

Физико-химические способы имеют следующие достоинства и преимущества перед процессами резания:

- 1). Копирование формы инструмента сложной формы сразу по всей поверхности заготовки при его простом поступательном движении;
- 2). Обработка материалов ведется при практической независимости режимов обработки от твердости и вязкости материала;
- 3). Выполнение уникальных операций (обработка отверстий с криволинейной или спиральной осью, изготовление очень маленьких отверстий, узких и глубоких канавок);
- 4). Малые значения сил, действующих в процессе обработки, а при некоторых методах отсутствие механического контакта инструмента и заготовки;
- 5). Используется инструмент менее твердый и менее прочный, чем обрабатываемый материал;
- 6). Высокая производительность обработки при сравнительно высокой точности получения размеров;
- 7). Возможность механизации и автоматизации процесса физико-химической обработки, а также многостаночного обслуживания.

Однако физико-химические способы обработки более энергоемки, чем процессы резания. Основные физико-химические способы размерной и упрочняюще-чистовой обработки заготовок следующие:

1. Электроразрядные — электроэрозионный, электроконтактный и абразивно-эрозионный.
2. Электрохимические — электрохимикогидравлический и электрохимикомеханический.
3. Ультразвуковые — размерная ультразвуковая обработка и наложение ультразвуковых колебаний на режущий инструмент.
4. Лучевые — лазерный, электроннолучевой и плазменный.
5. Магнитноимпульсная — индукционная и электродинамическая.
6. Магнитноабразивная.
7. Комбинированные — анодно-механический, электроэрозионно-химический, ультразвуковой, электрохимический и электролазерный.

В этих методах удаление припуска происходит путем электрической или химической эрозии. Они особенно эффективны при изготовлении таких изделий: штампы, пресс-формы, турбинные лопатки, камеры сгорания, фасонный твердосплавный инструмент, электронная аппаратура и др.

Технико-экономический эффект их применения тем выше, чем сложнее конфигурация обрабатываемых деталей: время изготовления обычных фасонных поверхностей снижается в 2 ... 3 раза, сложных — в 5 ... 10 раз. Большинство физико-химических методов разработано в СССР.

Основные особенности рабочих процессов физико-химических методов и процесса резания приведены в таблице 1.

Таблица 1. Основные особенности рабочих процессов физико-химических методов и процесса резания

Способ обработки	Рабочий процесс	Используемая энергия	Мощность удельная, $N_{уд}$, Вт/см ²	Рабочая среда	Род обрабатываемых материалов
1	2	3	4	5	6
Электро-эрозионный	Эрозия в импульсных разрядах	Тепловая	$10^4 \dots 10^8$	Жидкость диэлектрическая	Электропроводящие
Электро-контактный	Механическое удаление нагретого металла	то же	10^4	Воздух, газ	то же
Электро-химический	Анодное растворение	Химическая	$10^3 \dots 10^4$	Электролит	_____, ____
Анодно-механический	Анодно-механическое удаление	Химическая + механическая	то же	то же	_____, ____
Ультразвуковой	Хрупкое разрушение при ударном вдавливании абразивных зерен	Механическая	_____, ____	Абразивная	Металлы и неметаллы (тверд., и хрупк.)
Электронно-лучевой	Эрозия под действием потока электронов	Тепловая	$10^6 \dots 10^8$	Вакуум $10^{-4} \dots 10^{-6}$	Электропроводящие
Ионно-лучевой	Катодное распыление	то же	$10^6 \dots 10^7$	Вакуум $10^{-2} \dots 10^{-4}$	Лучше электропроводящие
Светолучевой	Световая эрозия	_____, ____	$10^6 \dots 10^8$	Газ, жидкость	Любые
Процессы резания	Большие упруго-пластические деформации	Механическая	$10^2 \dots 10^3$	Газ, СОЖ	_____, ____

РАЗДЕЛ II

ЛЕЗВИЙНАЯ ОБРАБОТКА РЕЗАНИЕМ МАТЕРИАЛОВ

Тема 2.1. Система резания материалов, ее элементы и структура.

Система резания представляет собой необходимую для обработки данной заготовки регулируемую технологическую систему, т.е. совокупность станка, инструментов, приспособлений, технологической среды, с одной стороны, и процесса резания — с другой. Процесс резания можно рассматривать как механизм системы регулирования, связывающий технологическую систему и получающиеся в результате обработки технологические параметры детали.

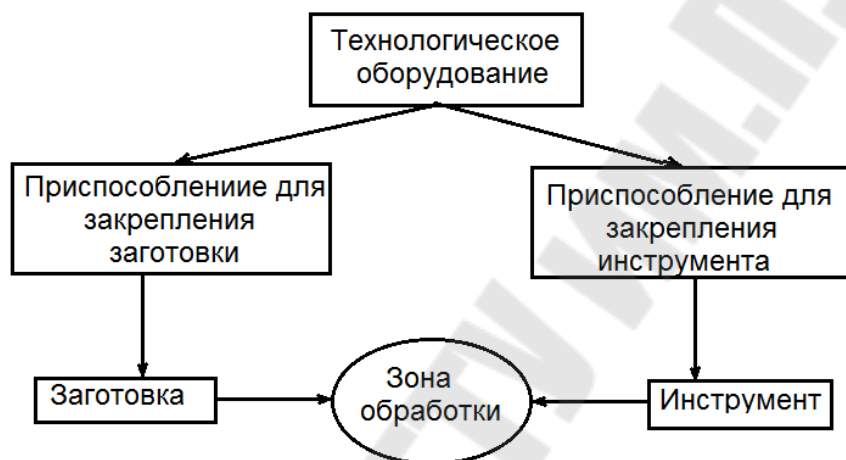


Рис. 2.1.1. Структура системы резанием

Процесс резания осуществляется на различных металлорежущих станках. Заготовка (деталь) и режущий инструмент закрепляются на станке с помощью специальных устройств, называемых станочными приспособлениями. Во время обработки создается замкнутая система (рис. 2.1) последовательно соединенных элементов: технологическое оборудование – станок, приспособление для закрепления инструмента, приспособление для закрепления заготовки (детали), заготовка и инструмент – зона обработки (резания).

Кинематика процесса резания — это закономерности относительного движения инструмента и заготовки без учета физических явлений, протекающих в зоне резания. При этом технологическая станочная система считается абсолютно жесткой и не зависящей от каких-либо физико-химических явлений.

Под *методом обработки резанием* понимают общую разновидность резания, отличающуюся основными кинематическими признаками, а именно:

- видом главного движения резания;

- местом приложения главного движения резания (к заготовке или к инструменту);
- спецификой движения подачи.

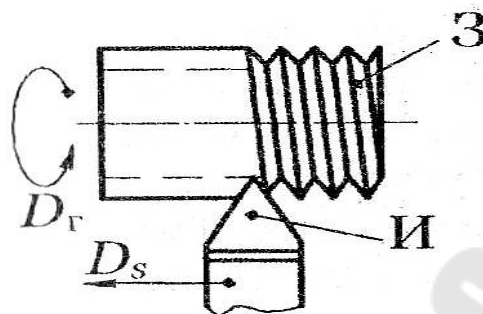


Рис. 2.1.2. Схема обработки поверхности резанием: И – инструмент, З – заготовка, D_s – движение подачи

Элементами процесса резания являются главное движение резания и вспомогательные движения резания. Совокупность этих элементов называется *режимом резания* (рис. 2.1.2).

Главным движением резания D_r называется элементарное движение с наибольшей скоростью. Без него процесс резания, как правило, невозможен. Главным может быть как прямолинейное, так и вращательное движение, причём оно может совершаться как инструментом, так и заготовкой. В совокупности элементарных движений, составляющих движение резания, главным может быть только одно движение (рис. 2.2).

Вспомогательные движения разделяются на движение подачи D_s , установочное движение D_y и касательное движение D_k .

Движением подачи D_s называется элементарное движение для распространения зоны резания на всю протяжённость обработки. Движение подачи может быть как прямолинейным, так и вращательным, оно может быть приложено как к инструменту, так и к заготовке. Движений подачи может быть несколько (до четырёх). В зависимости от вида и направления различают следующие движения подачи: продольное, поперечное, радиальное, тангенциальное, осевое, круговое и т. д.

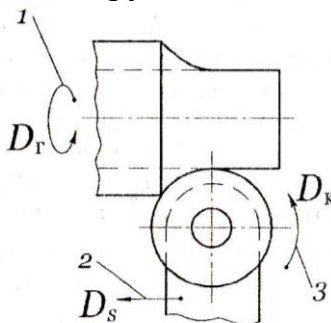


Рис. 2.1.3. Обработка резанием: D_r – главное движение резания, D_k – касательное движение, D_s – движение подачи.

Касательным движением D_k называется движение режущей кромки инструмента вдоль самой себя (рис. 2.1.3).

Следует заметить, что существует еще одно движение D_y , которое называется установочным (рис. 2.1.3). Установочное движение - это перемещение инструмента для установки на новый проход или на новую поверхность детали.

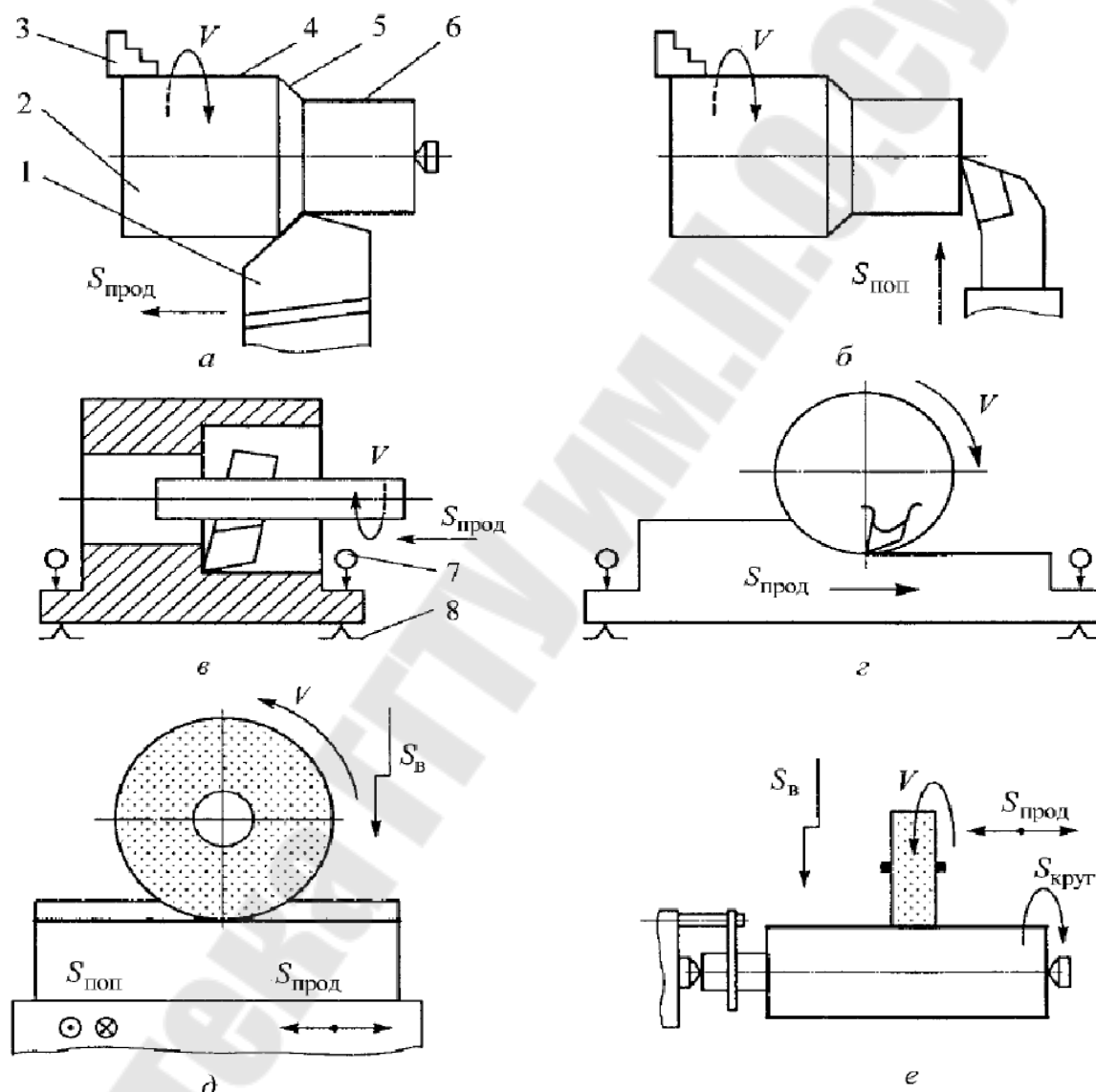


Рис. 2.1.4. Схемы обработки заготовок: а – продольным точением; б – поперечным точением; в – растачиванием; г – фрезерованием; д – плоским шлифованием; е – круглым шлифованием: 1 – режущий инструмент; 2 – заготовка; 3 – станочное (рабочее) приспособление; 4 – обрабатываемая поверхность; 5 – поверхность резания; 6 – обработанная поверхность; 7 – прижим; 8 – базирующий элемент; V – движение резания; $S_{\text{прод}}$, $S_{\text{поп}}$, S_v , $S_{\text{крут}}$ – соответственно продольное, поперечное, вертикальное и круговое движения подачи

Элементами процесса резания являются скорости главного движения резания и подачи, а также глубина резания. Совокупность этих элементов называется *режимом резания* (рис. 2.1.4).

Скоростью результирующего движения резания (скорость резания) v_c называется скорость рассматриваемой точки режущей кромки в результирующем движении резания. Единицами измерения скорости результирующего движения резания (v_c) являются: для лезвийной обработки - м/мин, для абразивной обработки - м/с. Такое различие единиц измерения скорости резания объясняется значительно более высоким скоростным режимом абразивной обработки вследствие большей твердости и теплостойкости абразивных материалов, более благоприятными условиями теплообразования и теплообмена в зоне резания.

Если главное движение является вращательным, то: для лезвийной обработки $V = \pi Dn / 1000$, для шлифования $V = \pi Dn / (1000 \dots 60)$, где D – наибольший диаметр обрабатываемой поверхности заготовки или диаметр вращающегося инструмента, мм; n – частота вращения заготовки (инструмента), об/мин.

Если главное движение является возвратно-поступательным, а скорости рабочего и холостого ходов разные, средняя скорость, м/мин,

$$V = (K + 1)Lm / 1000,$$

где $K = V_{p.x} / V_{x.x}$ – коэффициент отношения скорости рабочего хода $V_{p.x}$ к скорости холостого хода $V_{x.x}$; L – расчетная длина хода резца, мм; m – число двойных ходов резца в минуту.

Скорость движения подачи (подача) S – путь точки режущего лезвия инструмента относительно заготовки в единицу времени в направлении движения подачи. Различают: подачу в минуту (минутную) S_m – перемещение режущего инструмента в минуту, мм/мин; подачу на оборот S_o – перемещение режущего инструмента за один оборот заготовки или инструмента, мм/об; подачу на зуб S_z (для многозубых инструментов) – перемещение режущего инструмента за время поворота на угол, равный угловому шагу зубьев, мм/зуб; подачу на двойной ход S_{2x} – перемещение режущего инструмента за один двойной ход, мм/2х.

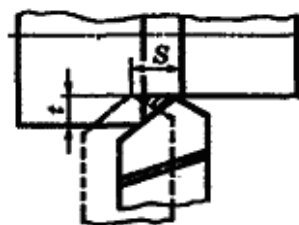


Рис. 2.1.5. Глубина подачи при точении

Глубина резания t – кратчайшее расстояние между обработанной и обрабатываемой поверхностями, мм. При точении (рис. 2.1.5.) глубина резания

$$t = 0,5(D_3 - d),$$

где D_3 и d – соответственно диаметры заготовки и обработанной поверхности, мм.

Глубина резания, частота вращения детали или инструмента и подача характеризуют процесс резания с *технологической стороны* – с точки зрения положения и движения инструмента, обеспечивающих процесс резания рис. 2.1.5.

К методам обработки относятся:

- обработка точением;
- фрезерная обработка (фрезерование);
- осевая обработка;
- строгально-долбежная обработка (строгание, долбление);
- протяжная обработка (протягивание, прошивание);
- абразивная обработка.

Точение - лезвийная обработка с вращательным главным движением резания и возможностью изменения радиуса его траектории. Например, *обтачивание* - точение наружной поверхности с движением подачи вдоль образующей линии обработанной поверхности (рис. 2.1.6).

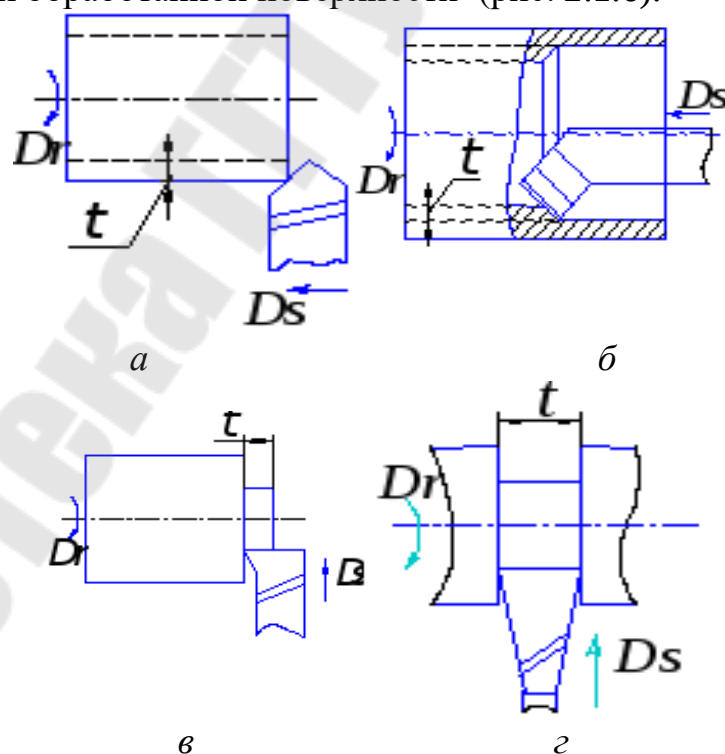


Рис. 2.1.6. Обработка точением:

a – обтачивание; $б$ – растачивание; $в$ – подрезание; $г$ – отрезание

Растачивание – точение внутренней поверхности с движением подачи вдоль образующей обработанной поверхности (рис. 2.1.6, б).

Подрезание - точение торцевой поверхности (рис. 2.1.6, в).

В зависимости от направления движения подачи различают продольное и поперечное подрезание.

Осевая обработка - лезвийная обработка резанием при постоянном радиусе его траектории с движением подачи только вдоль оси главного движения резания. Например, *сверление* - осевая обработка сверлом (рис. 2.1.7, а). *Рассверливание* - сверление, результатом которого является увеличение диаметра отверстия (рис. 2.1.7, б). *Зенкерование* – осевая обработка зенкером (рис. 3, в). *Развертывание* – осевая обработка разверткой (рис. 2.1.6, г).

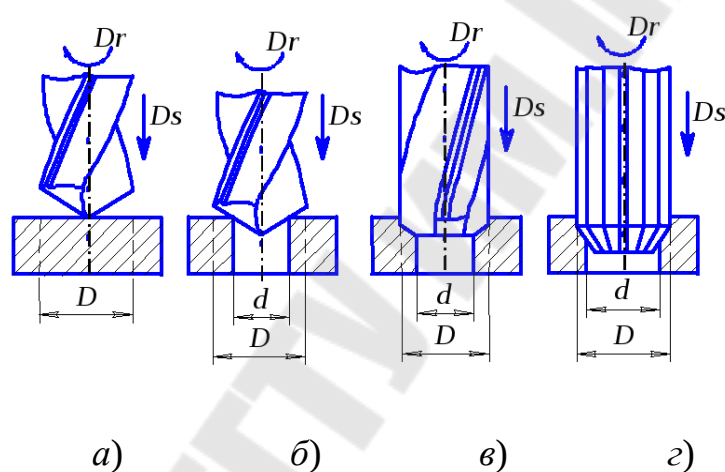


Рис. 2.1.7 - Осевая обработка: а – сверление; б – рассверливание; в – зенкерование; г - развертывание

Фрезерование - лезвийная обработка с вращательным главным движением резания при постоянном радиусе его траектории, сообщаемым инструменту, и хотя бы одним движением подачи, направленным перпендикулярно оси главного движения резания.

Периферийное фрезерование – фрезерование периферийным лезвийным инструментом. Например, фрезерование цилиндрической фрезой (рис. 2.1.8, а). *Торцовое фрезерование* – фрезерование торцевым лезвийным инструментом (рис. 2.1.8, б). *Встречное фрезерование* - фрезерование, при котором в месте контакта инструмента и заготовки векторы скоростей главного движения резания и движения подачи заготовки относительно инструмента направлены в противоположные стороны (рис. 2.1.8, в).

Попутное фрезерование - фрезерование, при котором в месте контакта инструмента и заготовки векторы скоростей главного движения резания и движения подачи заготовки относительно инструмента направлены в одну сторону (рис. 2.1.8, г).

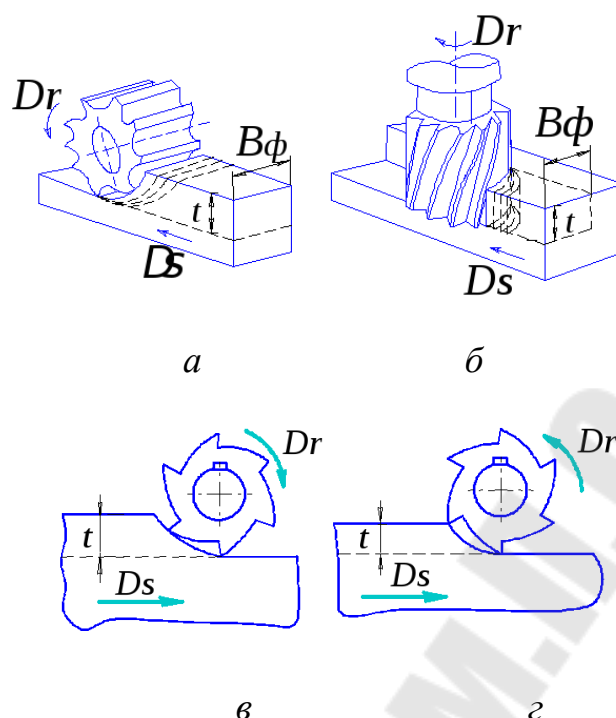


Рис. 2.1.8. Фрезерование: *а* – периферийное (цилиндрическое) фрезерование; *б* – торцовое периферийное фрезерование; *в* – встречное периферийное фрезерование; *г* – попутное периферийное фрезерование

Строгание - обработка резанием, осуществляемая однолезвийным инструментом с возвратно-поступательным главным движением (рис. 2.1.9, *а*).

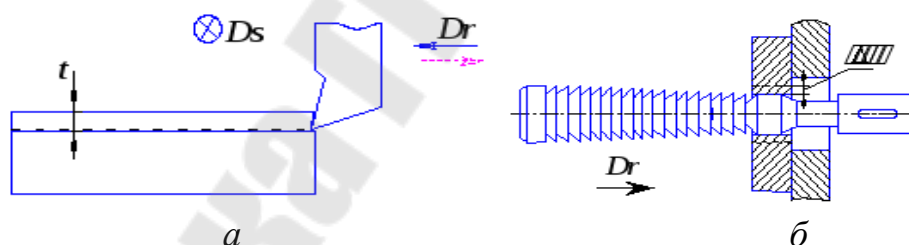


Рис. 2.1.9. Виды обработки резанием: *а* – строгание; *б* – протягивание

Протягивание - обработка многолезвийным инструментом с поступательным главным движением резания, распространяемая на всю обрабатываемую поверхность без движения подачи (рис. 2.1.9, *б*).

Абразивная обработка - обработка резанием, осуществляемая множеством абразивных зерен. К ней относятся: шлифование, хонингование, суперфиниширование и др. *Шлифование* (обдирочное, скоростное и высокоскоростное, наружное и внутреннее, плоское, профильное, встречное и попутное и др.) – абразивная обработка, при которой инструмент совершает только вращательное движение, которое является главным движением резания, а заготовка - любое движение (рис.

2.1.10, а). *Хонингование* (наружное и внутреннее, плоское и профильное и др.) - доводка, осуществляемая при одновременно выполняемых вращательном и возвратно-поступательном движениях абразивного инструмента (рис. 2.1.10, б). *Доводка* - абразивная обработка, при которой инструмент и заготовка совершают любое движение со скоростями одного порядка или при неподвижности одного из них другой совершает сложное движение.

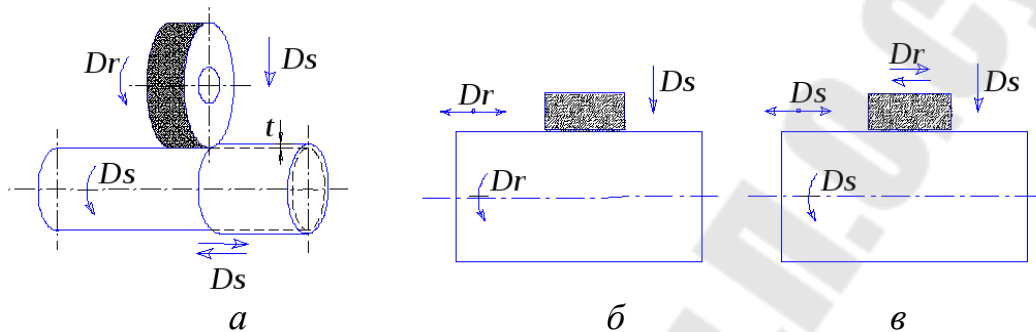


Рис. 2.1.10. Абразивная обработка:
а – наружное шлифование; б – хонингование; в – суперфиниширование

Под сложным движением абразивного инструмента или заготовки понимается два или несколько одновременно выполняемых заготовкой или (и) инструментом простых движений, например, возвратно-поступательное и вращательное (рис. 2.1.10, а и б) и т.п.

Суперфиниширование (плоское, в центрах, бесцентровое)- доводка, осуществляемая при одновременно выполняемых колебательных и возвратно-поступательных движениях инструмента и вращения заготовки (рисунок 2.1.10, в).

Строгально-долбежной обработкой (рис. 2.1.11) называется обработка с прямолинейным главным движением резания и движениями подачи в любом необходимом направлении.

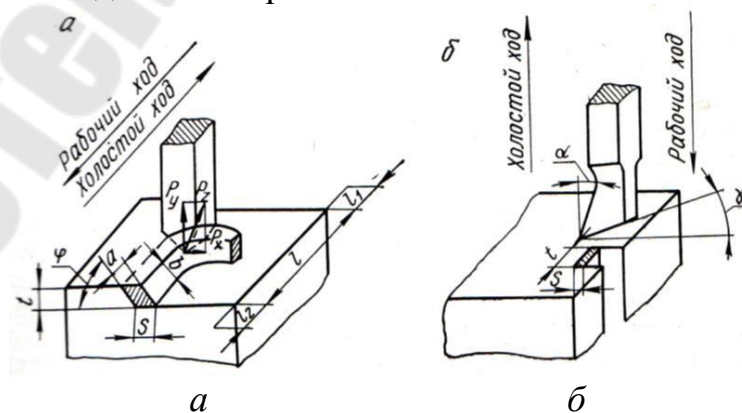


Рис. 2.1.11. Способы строгально-долбежной обработки:
а - строгание плоскости; б – долбление канавки

Главное движение может быть с равным успехом приложено как к инструменту, так и к заготовке, что обуславливается конструкцией применяемого станка. Использование остальных движений в любом их сочетании и количестве определяет различные способы строгания (долбления).

Поверхность, описываемая режущей кромкой инструмента в результирующем движении резания, называется *поверхностью обработки (резания) R* (рис. 2.1.12). Она обеспечивает контакт и взаимодействие лезвия режущего инструмента с заготовкой, обуславливает и определяет все механические, физические, химические и другие явления процесса резания, вызывает износ инструмента, формирует на заготовке требуемые поверхности с определённым качеством.

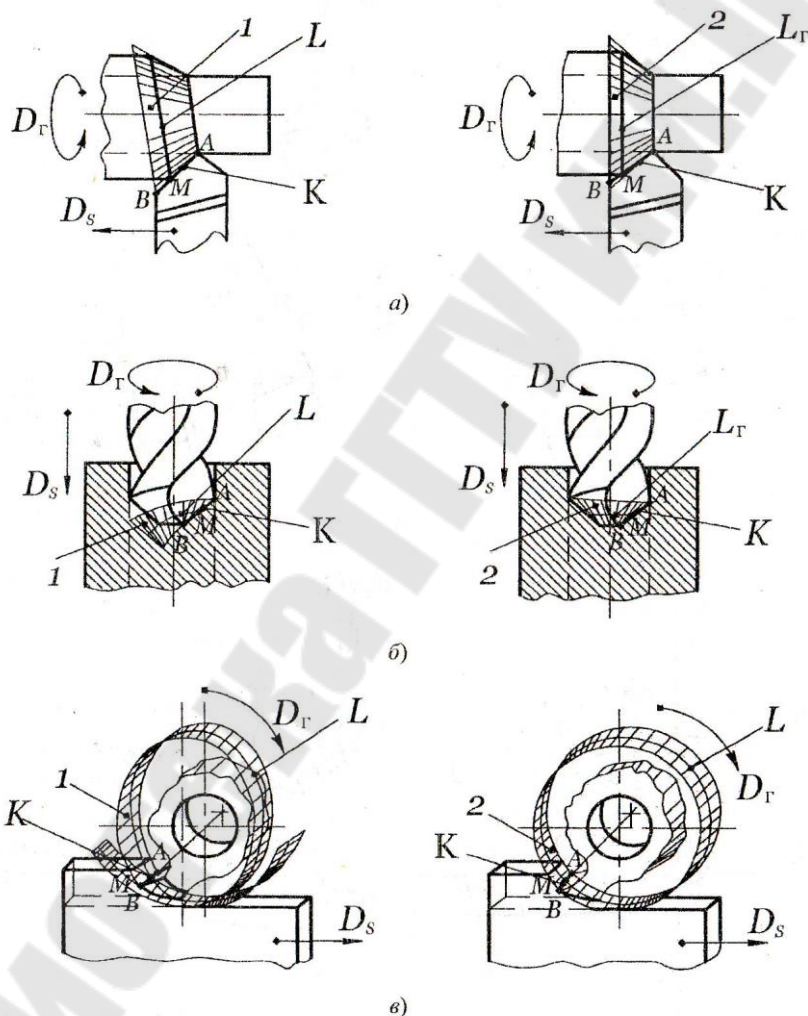


Рис. 2.1.12. Поверхность резания и поверхность главного движения при продольном обтачивании (а), сверлении (б) и периферийном фрезеровании (в): 1 – поверхность резания R ; 2 – поверхность главного движения R_r

Поверхность резания считается заданной, если известны форма режущей кромки (линия AB) и траектория движения резания (линия L) одной из её точек (точки M). Режущая кромка и траектория резания являются определяющими линиями поверхности резания в любой её точке. Будем называть эти две линии *характеристическими линиями поверхности резания*.

Формы поверхности резания и поверхности главного движения, а также их некоторое различие в конкретных разновидностях обработки резанием (обтачивание, сверление и периферийное фрезерование) приведены на рис. 2.1.12. Поверхность резания при продольном обтачивании (рис. 2.1.12, *а*) представляет собой винтовую поверхность, ось которой совпадает с осью заготовки. Поверхность резания при сверлении (рис. 2.1.12, *б*) есть также винтовая поверхность с той лишь разницей, что она тесно связана с осью сверла. При периферийном же фрезеровании (рис. 2.1.12, *в*) поверхностью резания является поверхность, созданная режущей кромкой при движении рассматриваемой её точки по циклоиде.

Направления и значения скоростей всех рассмотренных движений резания кроме касательного определяют понятия рабочей плоскости и ряда связанных с ней кинематических характеристик процесса резания: угла подачи μ , угла скорости резания η и кинематического коэффициента ξ .

Рабочей плоскостью P_S (рис. 2.1.13) называется плоскость, в которой расположены направления скоростей главного движения резания и движения подачи. В этой же плоскости располагается направление скорости результирующего движения резания. Следовательно, рабочая плоскость является плоскостью всех движений резания, кроме касательного движения.

Вектор скорости главного движения V_r строится из рассматриваемой точки M по касательной к траектории главного движения. *Вектор скорости движения подачи* V_s строится вдоль направления движения подачи.

Угол подачи μ есть угол в рабочей плоскости между направлениями скоростей движения подачи и главного движения резания (рис. 2.1.13).

Углом скорости резания η называется угол в рабочей плоскости между направлениями скоростей результирующего движения резания и главного движения резания.

Кинематическим коэффициентом ξ , будем называть отношение скорости движения подачи к скорости главного движения резания, т.е.

$$\xi = \frac{v_x}{v}$$

Рабочая плоскость P_S , угол подачи μ и угол скорости резания η изображены на рис. 2.1.13.

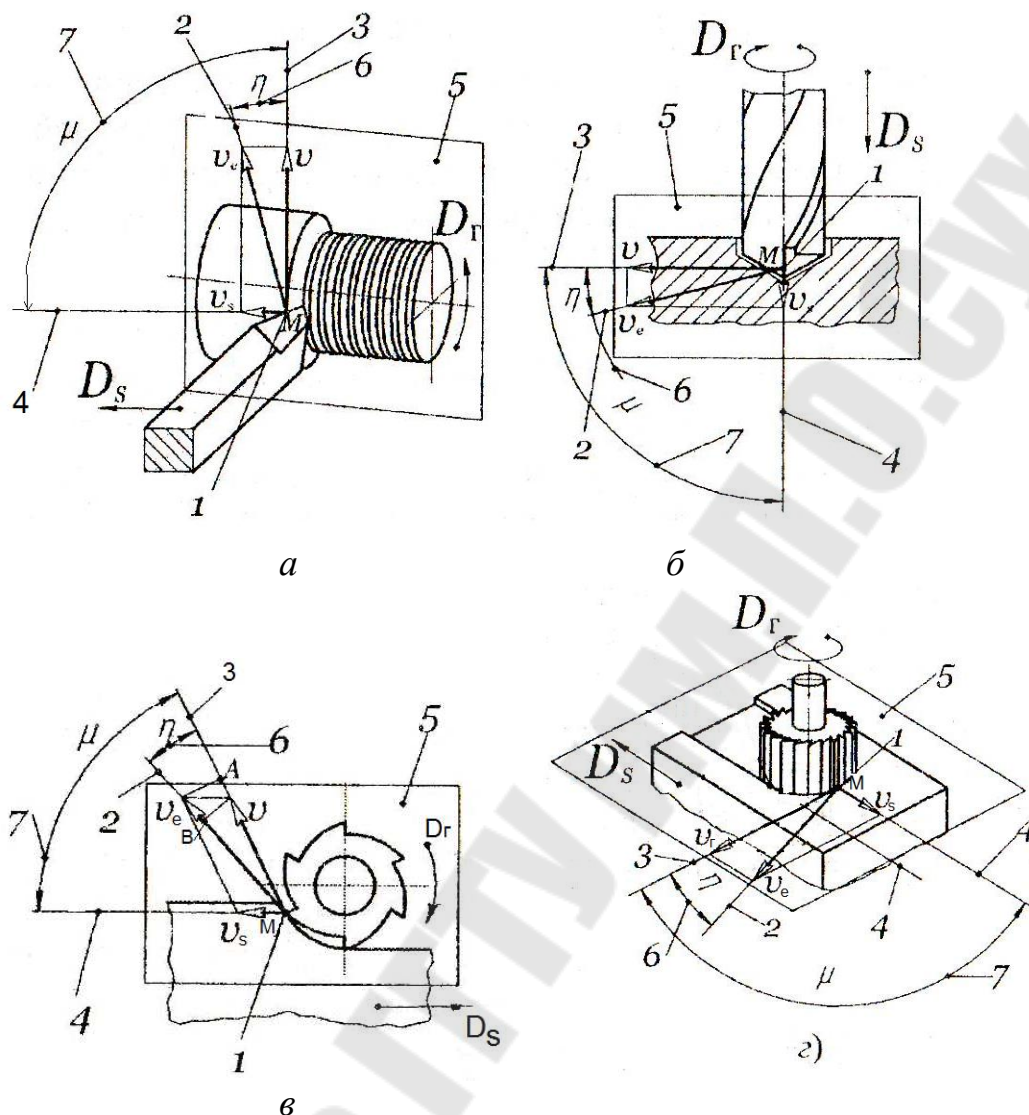


Рис. 2.1.13. Характеристики движений резания при обтачивании (а), сверлении (б), периферийном фрезеровании (в) и фрезеровании пазовой фрезой (г): 1 — рассматриваемая точка режущей кромки M ; 2 - направление скорости результирующего движения резания $\mathbf{v}_e$; 3 — направление скорости главного движения резания $\mathbf{v}_r$; 4- направление скорости движения подачи $\mathbf{v}_s$; 5 - рабочая плоскость $\mathbf{P}_s$; 6 — угол скорости резания η ; 7 — угол подачи μ .

Из приведенных на рис. 2.1.13 разновидностей обработки оба варианта фрезерования (в и г) отличаются менее благоприятным взаимным расположением направлений скоростей $\mathbf{v}$ и $\mathbf{v}_s$: угол подачи μ не равен 90° и постоянно изменяется от нуля до своего максимального значения.

На базе примера периферийного фрезерования (рис. 2.1.13, в) выведем единые расчётные кинематические соотношения, позволяющие определять скорость результирующего движения резания $\mathbf{v}_e$ и угол скорости резания η

по заданным значениям скоростей $\mathbf{v}$ и $\mathbf{v}_s$, в любых разновидностях обработки резанием. Для этого из конца каждого вектора скоростей $\mathbf{v}_e$ и $\mathbf{v}$ опустим перпендикуляры на направление другого из этих же векторов в точках соответственно A (на направление вектора $\mathbf{v}$ - из конца вектора $\mathbf{v}_e$) и B (на направление вектора $\mathbf{v}_e$ - из конца вектора $\mathbf{v}$).

Принимая в дальнейшем обозначения векторов $\mathbf{v}$ и $\mathbf{v}_s$ за обозначения их концевых точек, выразим вектор скорости результирующего движения резания $\mathbf{v}_e$ из прямоугольного треугольника $MA\mathbf{v}_e$ через его катеты MA и $A\mathbf{v}_e$ (рис. 2.1.13, в):

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_e &= \sqrt{(MA)^2 + (A\mathbf{v}_e)^2} = \sqrt{(M\mathbf{v} + \mathbf{v}\mathbf{v}_e \cos \mu)^2 + (\mathbf{v}\mathbf{v}_e \sin \mu)^2} = \\ &= \sqrt{(\mathbf{v} + \mathbf{v}_s \cos \mu)^2 + (\mathbf{v}_s \sin \mu)^2} = \mathbf{v} \sqrt{(1 + \mathbf{v}_s / \mathbf{v} \cdot \sin \mu)^2 + (\mathbf{v}_s / \mathbf{v} \cdot \cos \mu)^2} \end{aligned}$$

После преобразований и введения кинематического коэффициента получим

$$\mathbf{v}_e = \mathbf{v} \sqrt{1 + 2\xi \cos \mu + \xi^2} \quad (1)$$

Угол скорости резания η можно определить из прямоугольного треугольника $MB\mathbf{v}$

$$\sin \eta = \frac{B\mathbf{v}}{M\mathbf{v}} = \frac{\mathbf{v}\mathbf{v}_e \sin(\mu - \eta)}{M\mathbf{v}} = \frac{\mathbf{v}_s}{\mathbf{v}} \sin(\mu - \eta)$$

Раскрыв синус разности в правой части и поделив равенство на $\cos \eta$ учетом (1) получим

$\operatorname{tg} \mu = \xi(\sin \mu - \cos \mu \cdot \operatorname{tg} \eta)$ и далее

$$\operatorname{tg} \eta = \frac{\xi \sin \mu}{1 + \xi \cos \mu} \quad (2)$$

Полученные формулы (1) и 2) являются общими формулами для расчета скорости результирующего движения резания $\mathbf{v}_e$ и угла скорости резания η по известному значению скорости главного движения $\mathbf{v}$ с учетом кинематического коэффициента выражающего значимость скорости движения подачи $\mathbf{v}_s$ по сравнению со скоростью главного движения $\mathbf{v}$. Эта формула устанавливает связь между скоростями в рабочей плоскости, она применима для кинематического анализа любых случаев обработки резанием.

Так, например, для случая продольного точения ($\mu = 90^\circ$) быстрорежущим резцом ($\mathbf{v} = 50$ м/мин) с подачей $S_0 = 0,2$ мм/об при частоте вращения шпинделя главного движения (заготовки) $n = 100$ об/мин кинематический коэффициент ξ , будет:

$$\xi = \frac{\mathbf{v}_s}{\mathbf{v}} = \frac{S_0 n \cdot 10^{-3}}{\mathbf{v}} = \frac{0,2 \cdot 100 \cdot 10^{-3}}{50} = 0,0004,$$

т.е. близок к 0, что при расчете по формулам 1 и 2 приведет к следующим результатам

$$\mathbf{v}_e \cong \mathbf{v}, \eta \cong 0.$$

Это означает, что для условий обычного резания за скорость

результатирующего движения резания v_e (за скорость резания) вполне можно принимать скорость главного движения v . Следовательно, подача в данном случае почти никак не влияет на характер самого процесса резания.

Для анализа процесса резания и его графического изображения независимо от конкретных отличительных особенностей его разновидностей вводится в рассмотрение специальная *система координат XYZ*. Эта система, которая связана с главным движением резания, называется технологической системой координат. Для определения геометрических параметров режущего инструмента, систему координатных плоскостей: основной плоскости, плоскости резания и главной секущей плоскости. Существует три системы координатных плоскостей: инструментальную, статическую и кинематическую. В инструментальной системе координат инструмент рассматривается как геометрическое тело. В данной теме мы рассмотрим статическую систему координатных плоскостей, привязанную к скорости главного движения резания.

Технологическая система координат располагается следующим образом. Начало координат O совмещается с рассматриваемой точкой режущей кромки M . Координатная ось OZ проводится вдоль направления скорости главного движения резания в рассматриваемой точке режущей кромки, ось OY - в направлении радиуса траектории этой точки в главном движении, а ось OX - параллельно оси этого движения. За положительные направления всех трех осей следует принять их направления в сторону лезвия инструмента (рис. 2.1.14).

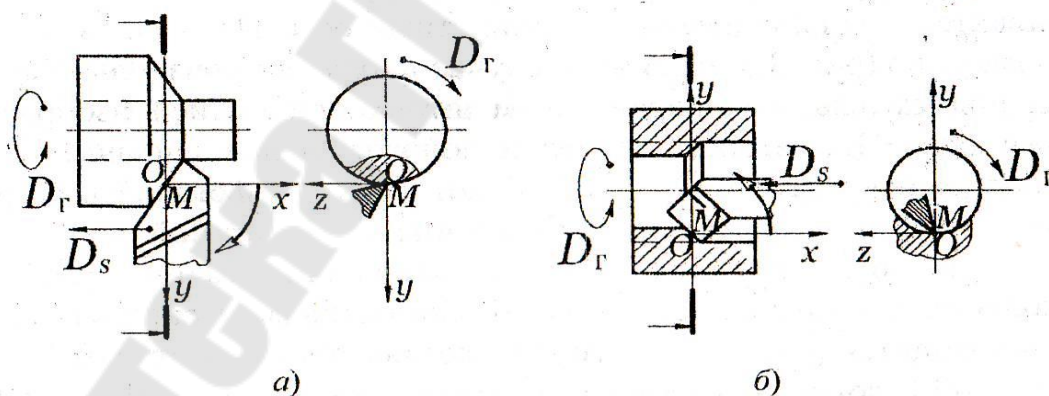


Рис. 2.1.14. Расположение осей технологической системы координат *XYZ* в разновидностях обработки с вращательным главным движением резания: при обтачивании (а), растачивании (б).

Расположение осей технологической системы координат в некоторых разновидностях обработки резанием с вращательным главным движением приведено на рисунке 2.1.14, где кроме основных их проекций с видом на передние поверхности инструментов для полноты представления даны также сечения плоскостями, перпендикулярными оси главного

вращательного движения. В этих сечениях можно увидеть расположение и направление координатной оси **OZ**.

С направляющими векторами поверхности резания (поверхности главного движения) связана система взаимно перпендикулярных плоскостей (рис. 2.15), называемых *координатными плоскостями*. Каждая из этих плоскостей, проходящая через два из трех векторов сопровождающего трехгранника поверхности резания (поверхности главного движения), имеет определенное название, наилучшим образом отражающее её главный смысл, своё буквенное обозначение и особую роль в изучении процесса резания. К координатным плоскостям относятся: основная плоскость P_v , плоскость резания P_n и главная секущая плоскость P_r . Индексы в их буквенных обозначениях проставляются по обозначениям тех направляющих векторов, к которым плоскости перпендикулярны (например, обозначение координатной плоскости P_v свидетельствует о том, что эта плоскость перпендикулярна направлению скорости и). Это облегчает процесс исследования зоны резания с использованием математических методов.

Координатные плоскости играют исключительно важную роль в изучении и исследовании процесса резания, в установлении наиболее общих для всех разновидностей обработки резанием закономерностей. В этих плоскостях располагаются почти все важнейшие характеристики зоны резания (рис. 2.1.15).

Основной плоскостью P_v называется координатная плоскость, проходящая через рассматриваемую точку режущей кромки перпендикулярно направлению скорости результирующего движения резания. Изображение лезвия инструмента и заготовки в основной плоскости является основным видом на зону резания, своеобразным планом процесса резания (видом сверху), в котором можно изобразить наибольшее количество важнейших характеристик и элементов процесса резания. Эта плоскость пересекает поверхность резания (поверхность главного движения) по кривой называемой основным профилем поверхности резания (поверхности главного движения).

Плоскостью резания P_n называется координатная плоскость, касательная к режущей кромке в рассматриваемой точке и содержащая направление скорости результирующего движения резания. Можно представлять плоскость резания также как плоскость, касательную к поверхности резания в рассматриваемой точке режущей кромки. Эта плоскость даёт вид на лезвие инструмента с задней его стороны (по стороны задней поверхности), т. е. образует как бы вид с тыла. Плоскость резания является пограничной плоскостью между инструментом и заготовкой, плоскостью всякого рода взаимодействия лезвия с поверхностью резания в рассматриваемой точке режущей кромки.

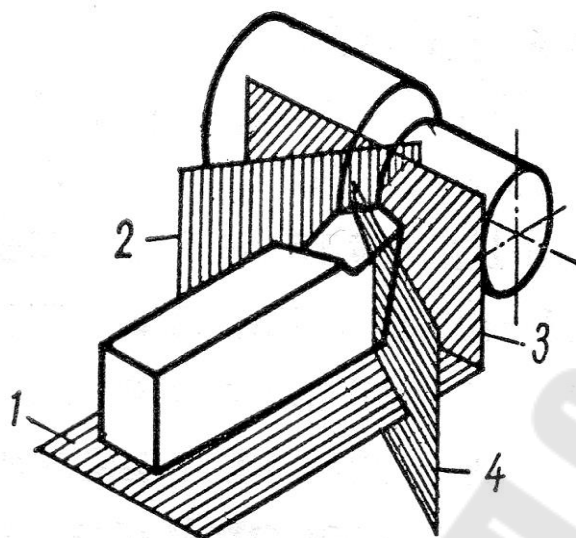


Рис. 2.1.15. Система координатных плоскостей статическая: 1 - P_v - основная плоскость; 2 - P_n - плоскость резания; 3 - P_s - рабочая плоскость; 4 - P_t - главная секущая плоскость

Главной секущей плоскостью P_t называется координатная плоскость, проходящая через направления скорости результирующего движения резания и нормали к поверхности резания в рассматриваемой точке режущей кромки. Эту плоскость можно также представлять как плоскость, перпендикулярную проекции режущей кромки на основную плоскость в рассматриваемой её точке. Значение главной секущей плоскости состоит в том, что она, рассекая лезвие по координатным направлениям, определяет его форму и рабочие параметры в условиях результирующего движения резания.

Тема 2.2. Геометрия режущего инструмента.

Поверхностью резания называется поверхность, образуемая на обрабатываемой детали непосредственно режущей кромкой резца. Для определения углов резца установлены понятия: плоскость резания, главная секущая и основная плоскость.

Поверхность резания обеспечивает контакт и взаимодействие лезвия режущего инструмента с заготовкой, обуславливает и определяет все механические, физические, химические и другие явления процесса резания, вызывает износ инструмента, формирует на заготовке требуемые поверхности с определённым качеством.

Режущая кромка и траектория резания являются определяющими линиями поверхности резания в любой её точке они называются *характеристическими линиями поверхности резания*.

С поверхностью резания в рассматриваемой точке режущей кромки

связана специальная система направляющих векторов, предназначенная для наблюдения за зоной резания в пространстве и обеспечения возможности исследования процесса резания в любой момент обработки. В эту систему входят вектор, касательный к режущей кромке $\bar{\tau}_k$, и трёхгранник (сопровождающий трёхгранник поверхности резания) взаимно перпендикулярных векторов: скорости результирующего движения резания $\bar{v}_e$, нормали к поверхности резания $\bar{n}$ и касательной (бинормали) к поверхности резания $\bar{\tau}$. Положительным направлением вектора $\bar{\tau}_k$, касательного к режущей кромке, будем считать такое его направление, которое обеспечивает поворот рассматриваемой точки режущей кромки относительно любой точки передней поверхности, не лежащей на режущей кромке, по часовой стрелке (рис. 2.2.1, а) для леворежущего инструмента и против часовой стрелки - для праворежущего. Праворежущим называется такой инструмент, вектор скорости резания в рассматриваемой точке режущей кромки которого, если смотреть со стороны осевого базового элемента крепежной части, может осуществлять вращение (поворот) инструмента по часовой стрелке, леворежущим же - наоборот. Осевым базовым элементом является базовая поверхность, плоскость или линия на крепёжной части инструмента, воспринимающая осевое (вдоль оси OX) воздействие заготовки на инструмент.

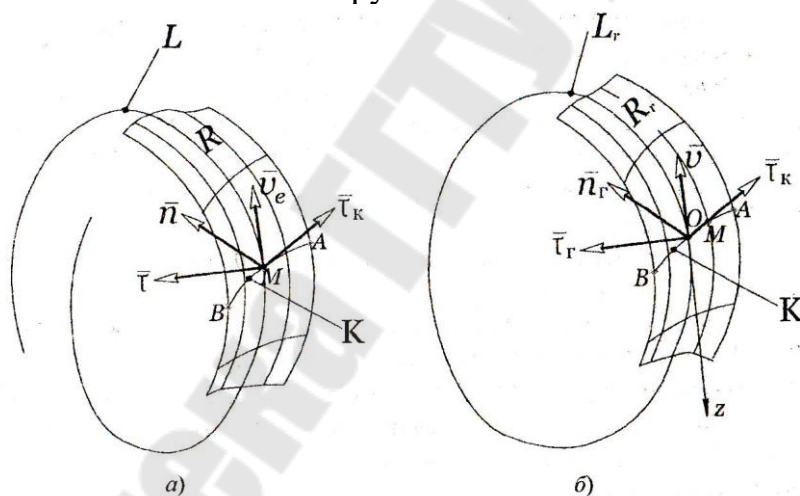


Рис. 2.2.1. Схема формирования поверхности резания (а) и поверхности главного движения (б), а также расположения связанных с ними направляющих векторов

При отсутствии движений подачи, при их не большого значении по сравнению со скоростью главного движения, а также с целью упрощения рассмотрения процесса резания вместо понятия поверхности резания используется понятие поверхности главного движения R_r , под которой понимается поверхность, описываемая режущей кромкой инструмента в главном движении резания (рис. 2.2.1, б). С поверхностью главного движения связан сопровождающий трёхгранник несколько иных

направляющих векторов: скорости главного движения резания (скорости резания) $\mathbf{v}$, нормали к поверхности главного движения $\mathbf{n}_r$ и касательной (бинормали) к поверхности главного движения $\mathbf{\tau}_r$ (рис. 2.2.1, б). Степень отклонения этих векторов от векторов, определяющих поверхность резания ($\mathbf{v}_e$, $\mathbf{n}$ и $\mathbf{\tau}$), может быть оценена кинематическим коэффициентом ξ , и определена с использованием угла скорости резания η .

Как видно из рис. 2.2.1, б, положительное направление вектора и противоположно положительному направлению координатной оси **OZ**.

Для изображения на схемах направляющих векторов поверхностей главного движения и поверхности резания необходимо соблюдать следующие правила:

- инструмент располагается на чертеже в двух проекциях;
- главный вид на инструмент совпадает с рабочей плоскостью;
- рассматриваемое лезвие инструмента располагается слева передней поверхностью вверх;
- вектор скорости главного движения резания в рассматриваемой точке режущей кромки проходит вертикально;
- видом сверху на инструмент является вид на него в направлении вектора скорости соответственно главного движения резания и или результирующего движения резания $\mathbf{v}_e$;
- по отношению к виду сверху строится вид на инструмент в направлении, перпендикулярном проекции режущей кромки на плоскость вида сверху;
- во всех проекциях инструмента проводятся четыре упомянутые направляющие вектора, если они проектируются на этих проекциях в истинную величину.

Примеры изображения направляющих векторов с соблюдением всех перечисленных требований представлены на рис. 2.2.2 для токарного проходного резца и периферийной цилиндрической фрезы со спиральным зубом.

Как видно из приведенных на рис. 2.2.2 примеров, совокупность направляющих векторов поверхности резания и поверхности главного движения на всех эскизах является своеобразным векторным отображением как самого инструмента (даже при его отсутствии), так и процесса резания им, которого нет на эскизах.

С направляющими векторами поверхности резания (поверхности главного движения) связана система взаимно перпендикулярных плоскостей (рис. 2.2.3), называемых *координатными плоскостями*. Каждая из этих плоскостей, проходящая через два из трех векторов сопровождающего трехгранника поверхности резания (поверхности главного движения), имеет определенное название, наилучшим образом отражающее её главный смысл, своё буквенное обозначение и особую роль

в изучении процесса резания.

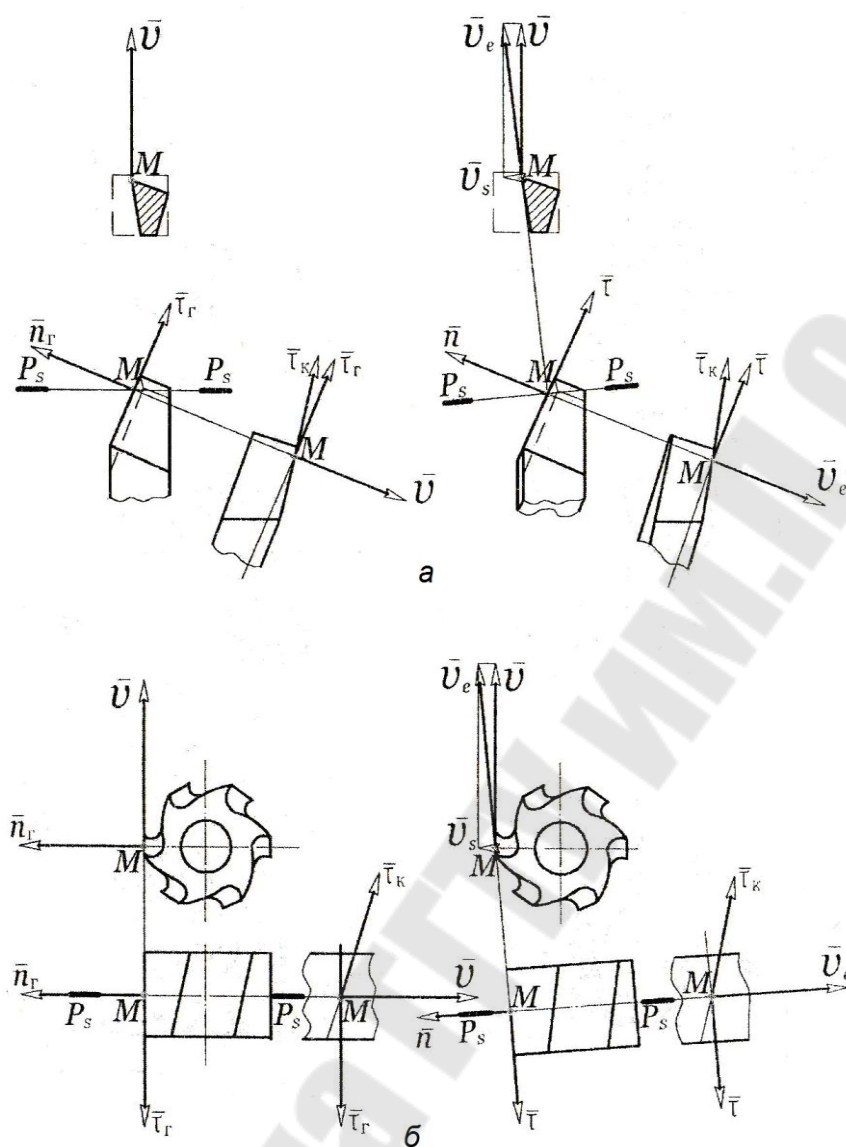


Рис. 2.2.2. Расположение направляющих векторов относительно поверхности главного движения и поверхности резания для токарного проходного резца (а) и периферийной цилиндрической фрезы (б)

К координатным плоскостям относятся: основная плоскость P_v , плоскость резания P_n и главная секущая плоскость P_r . Индексы в их буквенных обозначениях проставляются по обозначениям тех направляющих векторов, к которым плоскости перпендикулярны (например, обозначение координатной плоскости P_v свидетельствует о том, что эта плоскость перпендикулярна направлению скорости и).

Координатные плоскости играют исключительно важную роль в

изучении и исследовании процесса резания, в установлении наиболее общих для всех разновидностей обработки резанием закономерностей. В этих плоскостях располагаются почти все важнейшие характеристики зоны резания (см. тема 2.1).

К координатным плоскостям относятся: основная плоскость P_v , плоскость резания P_n и главная секущая плоскость P_τ . Индексы в их буквенных обозначениях проставляются по обозначениям тех направляющих векторов, к которым плоскости перпендикулярны (например, обозначение координатной плоскости P_v свидетельствует о том, что эта плоскость перпендикулярна направлению скорости и).

Для анализа расположения лезвия режущего инструмента относительно обрабатываемой детали и с целью лучшего восприятия объемности лезвия различают три системы координат: статическая, кинематическая и инструментальная (рис. 2.2.4)

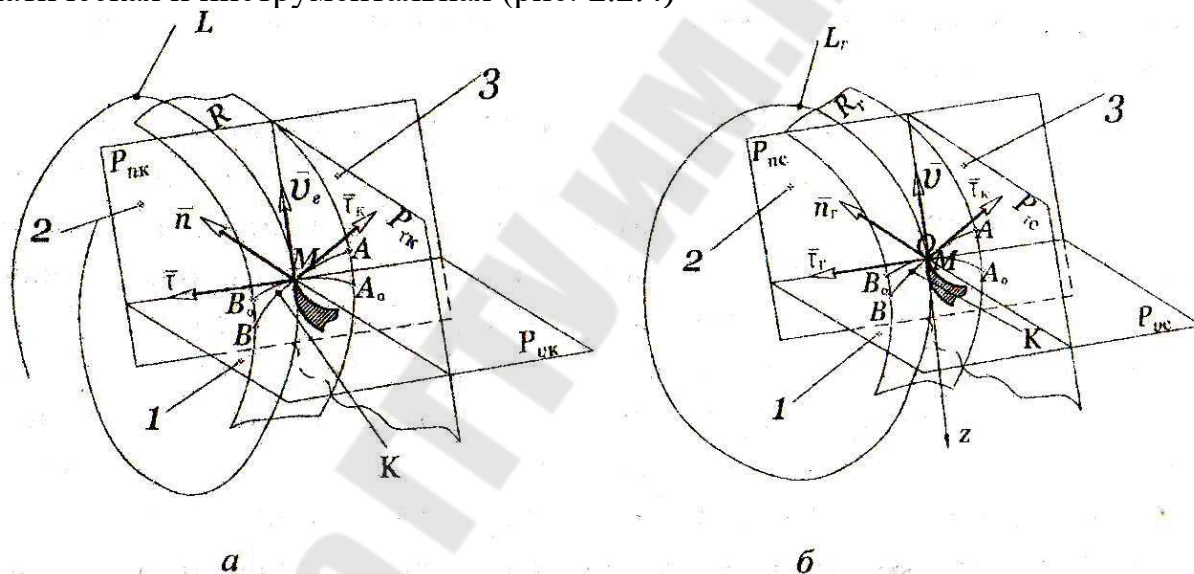


Рис. 2.2.3. Расположение координатных плоскостей кинематической (а) и статической (б) систем координат: 1-основная плоскость P_v (т. е. P_{vk} и P_{vc}); 2 - плоскость резания P_n (т. е. P_{nk} и P_{nc}); 3 - главная секущая плоскость P_τ (т. е. $P_{\tau k}$ и $P_{\tau c}$)

Кинематической системой координат (КСК) называется система координатных плоскостей, привязанная к траектории резания и поверхности резания (рис. 2.2.3, а).

Кинематическая система используется для определения углов лезвия и других параметров в процессе резания с учетом реальной формы траектории точки режущей кромки. Эта система определяет именно те значения параметров процесса резания, которые характеризуют его непосредственно в условиях самого процесса. Она применяется для проведения точных исследований.

Статической (установочной) системой координат (ССК) называется

система координатных плоскостей, привязанная к траектории главного движения резания и поверхности главного движения (рис. 2.2.4, б, 2.2.5). Эта система является как бы упрощенным вариантом кинематической, она учитывает только главное движение резания. Зачастую статическую систему координатных плоскостей привязывают к вершине лезвия.

Определения координатных плоскостей статической системы (основной плоскости, плоскости резания и главной секущей плоскости) в основе те же, что и определения плоскостей кинематической системы. Различие состоит только в том, что в определениях кинематических координатных плоскостей термины «скорость результирующего движения резания» и «поверхность резания» необходимо заменить соответственно терминами «скорость главного движения резания» и «поверхность главного движения».

Статическая система координат (ССК) применяется для оценки параметров резания в состоянии взаимной установки инструмента и заготовки на станке с учетом направления скорости главного движения резания, а также для упрощенного анализа процесса резания без учета движений подачи и касательного движения.

Инструментальная система координат (ИСК) - это также прямоугольная система координатных плоскостей с началом в рассматриваемой точке режущей кромки, привязанная к осям, базовым поверхностям или другим индивидуальным геометрическим элементам того или иного инструмента.

Координатные плоскости инструментальной системы координат имеют до некоторой степени индивидуальное расположение по отношению к конкретным конструктивным разновидностям режущих инструментов. В связи с этим при тех же принятых названиях координатных плоскостей плоскости инструментальной системы имеют отличающиеся определения, но в них содержится основной смысл аналогичных плоскостей других координатных систем, т. е. их направленность обусловлена вероятным расположением вектора скорости главного движения резания относительно положения инструмента, заданного чертежом.

Инструментальной основной плоскостью $P_{ви}$ называется одна из плоскостей проекций, проходящая через рассматриваемую точку режущей кромки параллельно тому базовому геометрическому элементу инструмента (плоскости, поверхности, оси), который воспринимает действие главной составляющей силы резания и передает это действие через упор на инструментальное приспособление. Эта плоскость оказывается перпендикулярной вероятному направлению скорости главного движения резания в предположении, что инструмент относительно заготовки будет установлен на станке также, как он расположен на чертеже.

Инструментальной плоскостью резания $P_{ни}$ называется плоскость,

касательная к режущей кромке в рассматриваемой её точке и перпендикулярная инструментальной основной плоскости. Эта плоскость оказывается параллельной вероятному направлению скорости главного движения резания в предположении, что инструмент относительно заготовки будет установлен на станке так же, как он расположен на чертеже.

Инструментальной главной секущей плоскостью $P_{ти}$ называется плоскость, перпендикулярная к линии пересечения инструментальной основной плоскости и инструментальной плоскости резания в рассматриваемой точке режущей кромки.

Инструментальная система координат предназначена для задания общей формы и размеров режущей части инструмента и необходима при его изготовлении и контроле, т. е. в инструментальном производстве. Углы и размеры лезвия инструмента, определяемые инструментальной системой, относятся, как правило, к данному инструменту и характеризуют его только как геометрическое тело без связи с процессом резания.

Расположение координатных плоскостей инструментальной, статической и кинематической систем для двух наиболее характерных видов обработки (врезного точения призматическим фасонным резцом и ротационного обтачивания) приведены на рис. 2.2.4. Заметим, что координатные плоскости на схемах изображаются лишь в том случае, когда они либо перпендикулярны плоскости чертежа, либо ей параллельны. В первом случае координатные плоскости изображаются следами, во втором – тонкой обрывистой линией, соединяющей следы других плоскостей, перпендикулярных данной (рис. 2.2.5).

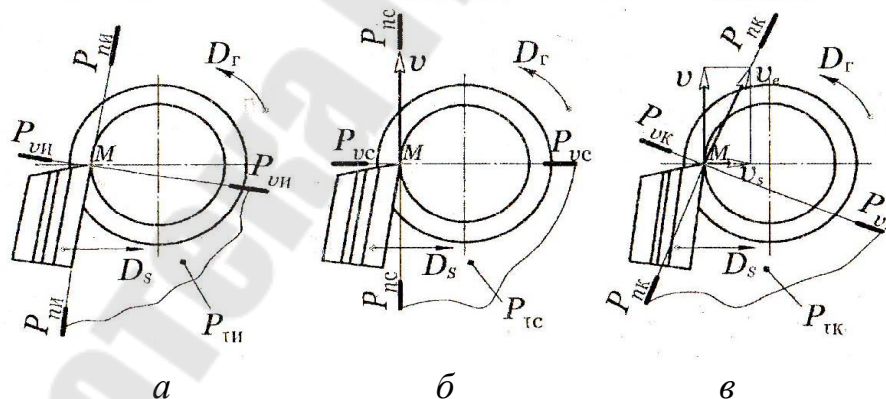


Рис. 2.2.4. Координатные плоскости инструментальной, статической и кинематической систем координат при врезном точении призматическим фасонным резцом: *а* – инструментальная система; *б* – статическая система; *в* – кинематическая система

Кроме трёх координатных плоскостей (P_v , P_n и P_r) введено также понятие *нормальной секущей плоскости*, т. е. плоскости, перпендикулярной к режущей кромке в рассматриваемой её точке (перпендикулярной вектору

τ_k). Все эти четыре плоскости дают полное представление о процессе резания и геометрии лезвия инструмента.

Координатные плоскости играют исключительно важную роль в изучении и исследовании процесса резания, в установлении наиболее общих для всех разновидностей обработки резанием закономерностей. В этих плоскостях располагаются почти все важнейшие характеристики зоны резания.

Для исследования координатных плоскостей в различных системах координат к их установленным названиям добавляются определяющие названия рассматриваемых систем, т. е. существуют три системы координатных плоскостей это: инструментальная, статическая, кинематическая.

Статическая система координат - прямоугольная система координат (рис. 2.2.5) с началом в рассматриваемой точке режущей кромки, ориентированная относительно направления скорости главного движения резания (рис. 2.2.4,б и 2.2.6, б).

Применяется для приближенных расчетов углов лезвия в процессе резания или учета изменения этих углов после установки инструмента на станке. Она является переходной от инструментальной системы координат к системе кинематической.

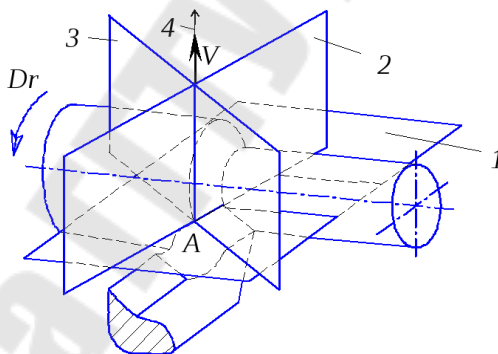


Рис. 2.2.5. Статическая система координат: **1**-основная плоскость P_v , **2** - плоскость резания P_n ; **3** - главная секущая плоскость P_t ; **4** - направление скорости главного движения резания

Инструментальная система координат (ИСК) - прямоугольная система координат с началом в вершине лезвия, ориентированная относительно геометрических элементов режущего инструмента, принятых за базу. Инструментальная система координат предназначена для задания общей формы и размеров режущей части инструмента и необходима при его изготовлении и контроле, т. е. в инструментальном производстве. Углы и размеры лезвия инструмента, определяемые инструментальной системой, относятся, как правило, к данному инструменту и характеризуют его только как геометрическое тело без связи с процессом резания.

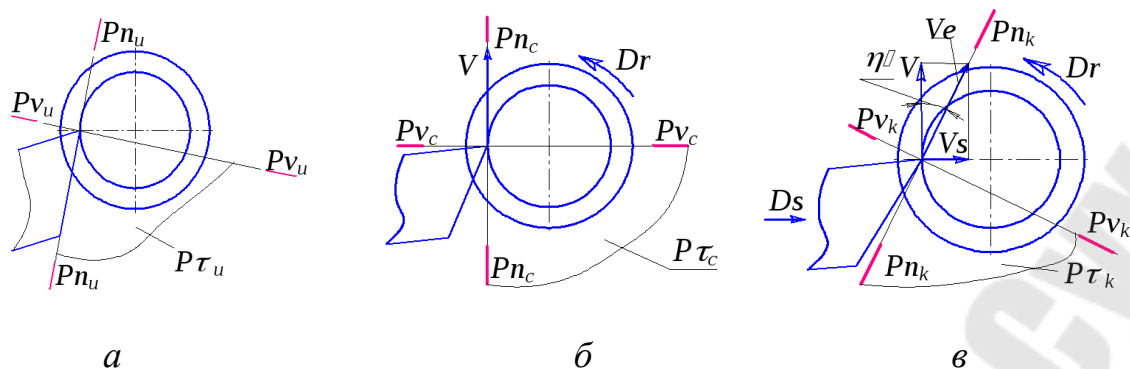


Рис. 2.2.6. Системы координат и координатные плоскости при точении с поперечной подачей (отрезание): а) инструментальная система координат; б) статическая система координат; в) кинематическая система координат

Кинематическая система координат (КСК) - прямоугольная система координат с началом в рассматриваемой точке режущей кромки, ориентированная относительно направления скорости результирующего движения резания (рис. 2.2.4, в, 2.2.6, в и 2.2.7, в). Очевидно, что кинематическая система координат повернута относительно статической системы координат на величину угла скорости резания. Применяется для определения действительных (кинематических) углов лезвия, образующихся в процессе резания.

Кинематическая система используется для определения углов лезвия и других параметров в процессе резания с учетом реальной формы траектории точки режущей кромки.

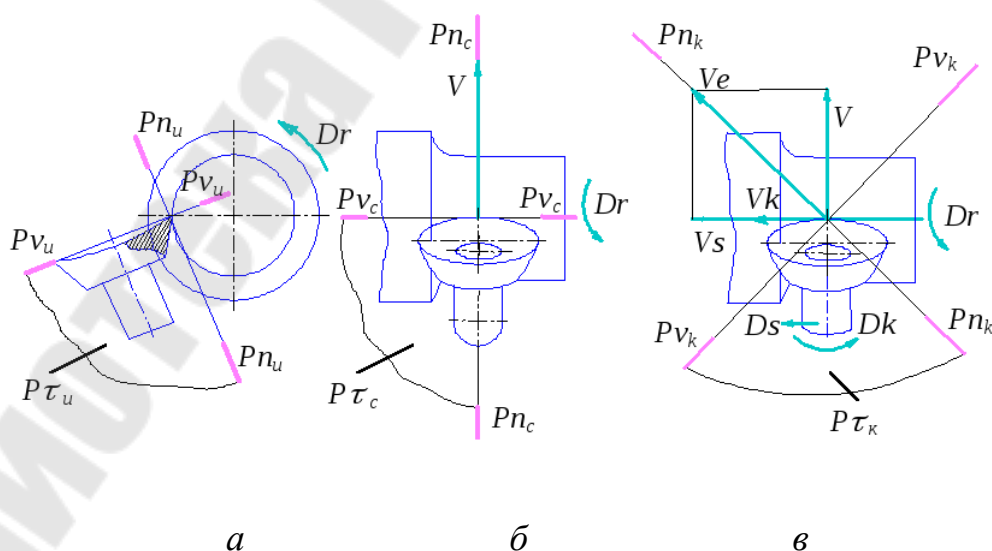


Рис. 2.2.7. Системы координат и координатные плоскости при ротационном точении: а- инструментальная система координат; б - статическая система координат; в- кинематическая система координат

Режущие инструменты, геометрические параметры режущих инструментов. Углы лезвия. Изменяемость и пересчет углов. Причины изменяемости углов в процессе резания.

Режущий инструмент - инструмент для обработки резанием. Режущий инструмент состоит из корпуса, крепежной и рабочей частей.

Корпус режущего инструмента - часть режущего инструмента, несущая на себе все его элементы.

Крепежная часть режущего инструмента - часть режущего инструмента для его установки и крепления в технологическом оборудовании или приспособлении.

Рабочая часть режущего инструмента - часть режущего инструмента, содержащая лезвия.

Лезвие инструмента - клинообразный элемент режущего инструмента для проникновения в материал заготовки и отделения стружки. *Лезвийный инструмент* - режущий инструмент с заданным числом лезвий установленной формы. Режущий инструмент может быть цельным, составным и сборным; насадным и хвостовым; однолезвийным и многолезвийным; периферийным и торцовым. *Цельный режущий инструмент* – режущий инструмент, изготовленный из одной заготовки (рис. 2.2.8, а). *Составной режущий инструмент* - режущий инструмент с неразъемным соединением его частей и элементов (рис. 2.2.8, б и 2.2.8, г). Он может быть сварным, клееным, паяным. *Сборный режущий инструмент* - режущий инструмент с разъемным соединением его частей и элементов.

Насадной режущий инструмент - режущий инструмент с посадочным отверстием (рис. 2.2.8, в). *Хвостовой режущий инструмент* - режущий инструмент с хвостовиком (рис. 2.2.8, б и 2.2.8, г).

Однолезвийный инструмент – инструмент для обработки одним лезвием (рис. 2.8.9, а). *Многолезвийный инструмент* – лезвийный инструмент, лезвия которого расположены в направлении главного движения резания последовательно (рис. 2.2.8, б-г). Выступ на многолезвийном инструменте, содержащий лезвие, называют *зубом лезвийного инструмента*. *Периферийный зуб лезвийного инструмента* – зуб лезвийного инструмента, выступающий из корпуса в радиальном направлении. *Торцовый зуб лезвийного инструмента* – зуб лезвийного инструмента, выступающий из корпуса в осевом направлении. Зуб лезвийного инструмента, изготовленный отдельно и образующий с корпусом разъемное соединение, называют *ножом лезвийного инструмента*. К лезвийным инструментам относят резцы, фрезы, осевые режущие инструменты (сверла, зенкеры, развертки), протяжки и др.

Резец (рис. 2.2.8, а) - однолезвийный инструмент для обработки с поступательным или вращательным главным движением резания и возможностью движения подачи в любом направлении. Некоторые резцы,

например, отрезной, предназначаются для обработки с движением подачи в одном направлении, однако не исключают возможности движения подачи, например, прерывистой в другом направлении.

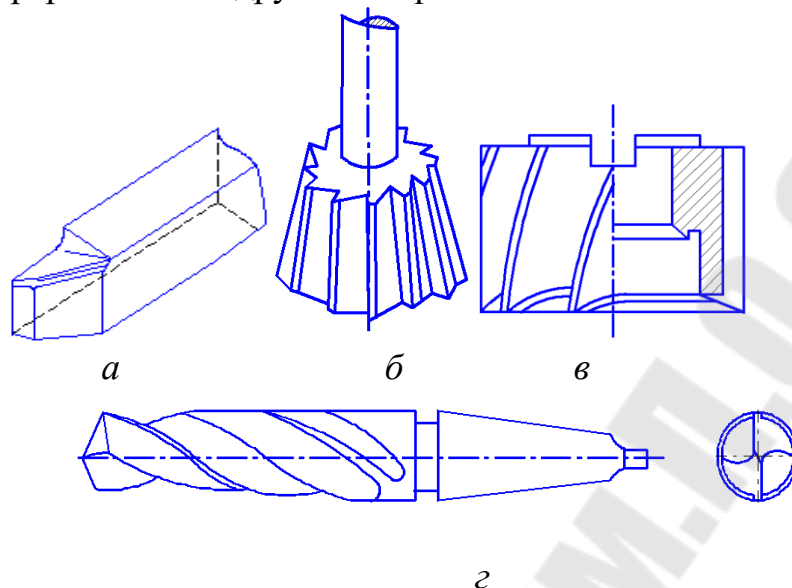


Рис. 2.2.8. Лезвийные инструменты:

а – резец токарный проходной; *б* – фреза торцовая угловая; *в* – фреза торцовая цилиндрическая; *г* – сверло спиральное

Фреза (рис. 2.2.8, *б* и 2.2.8, *в*) - лезвийный инструмент для обработки с вращательным главным движением резания без возможности изменения радиуса траектории этого движения и хотя бы с одним движением подачи, направление которого не совпадает с осью вращения. Невозможность изменения радиуса траектории главного движения резания позволяет отличить однолезвийную фрезу от вращающегося резца.

Осевой режущий инструмент (осевой инструмент) - лезвийный инструмент для обработки с вращательным главным движением резания и движением подачи вдоль оси главного движения резания. *Сверло* (рис. 2.2.8, *г*) – осевой режущий инструмент для образования отверстия в сплошном материале и (или) увеличения диаметра имеющегося отверстия. *Зенкер* – осевой режущий инструмент для повышения точности формы отверстия и увеличения его диаметра. *Развертка* - осевой режущий инструмент для повышения точности формы и размеров отверстия и снижения шероховатости поверхности.

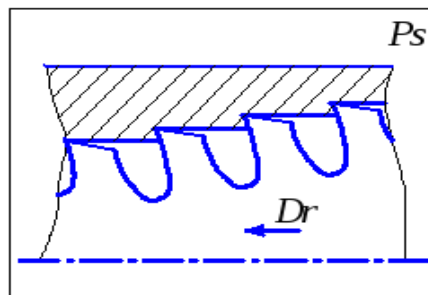


Рис. 2.2.9. Схема протягивания

Протяжка - многолезвийный инструмент с рядом последовательно выступающих одно над другим лезвий в направлении, перпендикулярном к направлению скорости главного движения, предназначенный для обработки при поступательном или вращательном главном движении резания и отсутствии движения подачи (рис. 2.2.9).

На режущей части лезвийного инструмента рассматривают следующие поверхности и кромки (рис. 2.2.10).

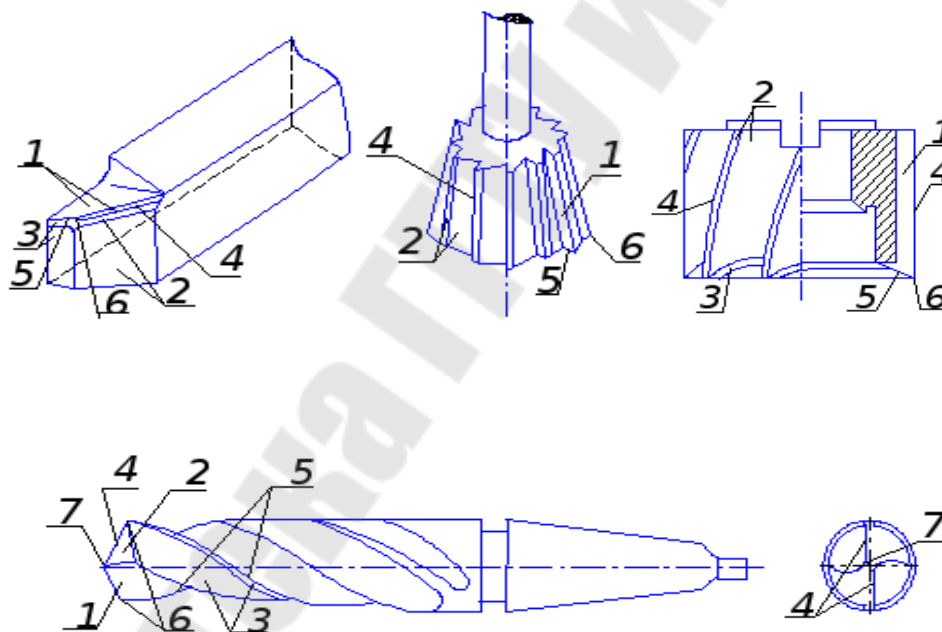


Рис. 2.2.10. Поверхности и кромки на рабочей части лезвийных инструментов: 1 – передние поверхности; 2 – главные задние поверхности; 3 – вспомогательные задние поверхности; 4 – главные режущие кромки; 5 – вспомогательные режущие кромки; 6 – вершины; 7 – поперечная кромка (перемычка)

Передняя поверхность A_γ - поверхность лезвия инструмента, контактирующая в процессе резания со срезаемым слоем и стружкой.

Задняя поверхность A_α - поверхность инструмента, контактирующая в процессе резания с поверхностями

Режущая кромка K - кромка лезвия инструмента, образуемая пересечением передней и задней поверхностей лезвия.

Главная режущая кромка K (режущая кромка) - часть режущей кромки, формирующая большую сторону сечения срезаемого слоя.

Вспомогательная режущая кромка K' - часть режущей кромки, формирующая меньшую сторону сечения срезаемого слоя.

Главная задняя поверхность A_α (задняя поверхность) - задняя поверхность лезвия инструмента, примыкающая к главной режущей кромке.

Главная задняя поверхность A_α контактирует в процессе резания с поверхностью резания R_r .

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

Угол при вершине ε - угол в основной плоскости между плоскостью резания и проекцией вспомогательной режущей кромки на основную плоскость.

Поэтапный кинематический анализ обработки резанием и построение углов лезвия резца в статической системе координат представлено на рисунках 2.2.11- 2.2.16.

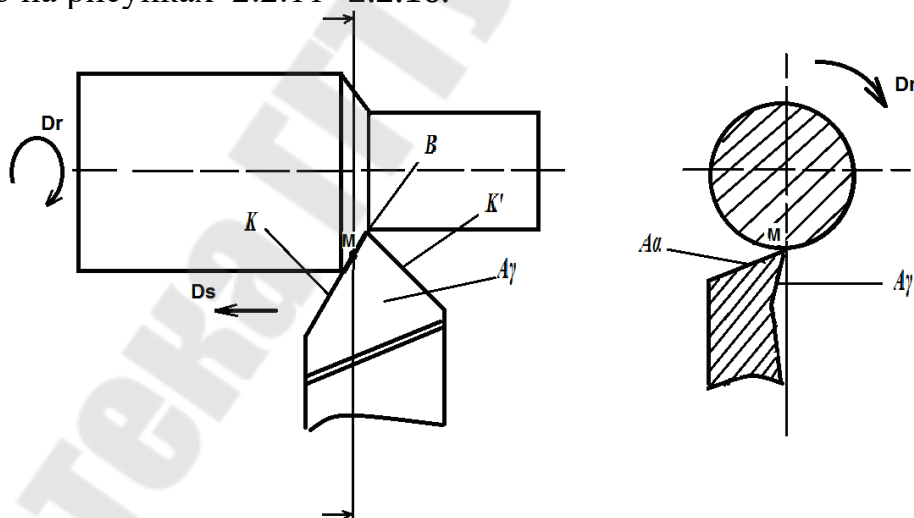


Рис. 2.2.11. Схема резания токарной обработки резания: движения резания и рабочие поверхности режущего инструмента

Главное движение резания Dr — элементарное движение с наибольшей скоростью. Без него процесс резания, как правило, невозможен (рис. 2.2.11).

Движение подачи Ds - элементарное движение для распространения зоны резания на всю протяжённость обработки (рис.2.2.11).

Режущая часть инструмента состоит (рис.2.2.11):

- *передняя поверхность $A\gamma$* инструмента это поверхность лезвия, контактирующая в процессе резания со стружкой; - *задняя поверхность $A\alpha$* – поверхность лезвия, контактирующая с поверхностями заготовки;
- *режущая кромка K* – кромка, образуемая пересечением передней и задней поверхностей. Различают главную режущую и вспомогательную режущие кромки;
- *главной режущей кромкой K* принято называть режущую кромку или её часть, осуществляющие удаление слоя заготовки (припуска);
- *вспомогательной же кромкой K'* – часть режущей кромки, обеспечивающую зачистку обработанной поверхности
- *рабочая плоскость Ps* – плоскость, в которой расположены направления скоростей главного движения резания и движения подачи (рис. 2.2.12).

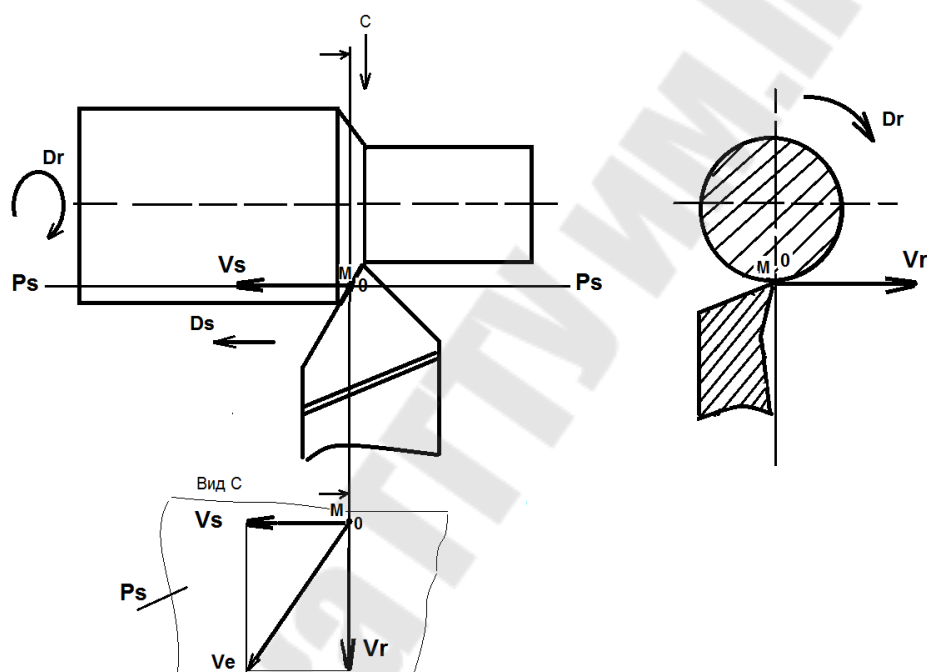


Рис. 2.2.12. Схема резания токарной обработки: построение векторов скоростей резания и рабочей плоскости Ps

Система координат XZY (рис. 2.2.13), связанная с главным движением резания и ориентирующая процесс резания в пространстве относительно технологической системы обработки, называется *технологической системой координат*.

Правила построения системы координат (рис. 2.2.13): координатная ось OZ проводится вдоль направления скорости главного движения резания в рассматриваемой точке режущей кромки, ось OY – в направлении радиуса траектории этой точки в главном движении, а ось OX – параллельно оси этого движения. За положительные направления всех трех осей следует принять их направления в сторону лезвия инструмента.

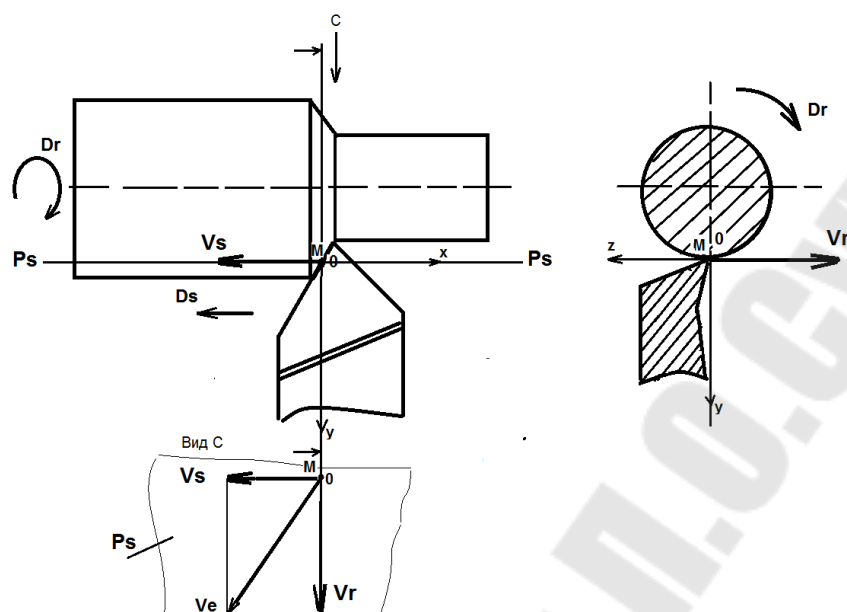


Рис. 2.2.13. Схема резания токарной обработки: построение осей системы координат XZY

Построение координатных плоскостей (рис. 2.2.14):

Основная плоскость P_v - координатная плоскость, проходящая через рассматриваемую точку режущей кромки перпендикулярно направлению скорости результирующего движения резания.

Плоскость резания P_n - координатная плоскость, касательная к режущей кромке в рассматриваемой точке и содержащая направление скорости результирующего движения резания.

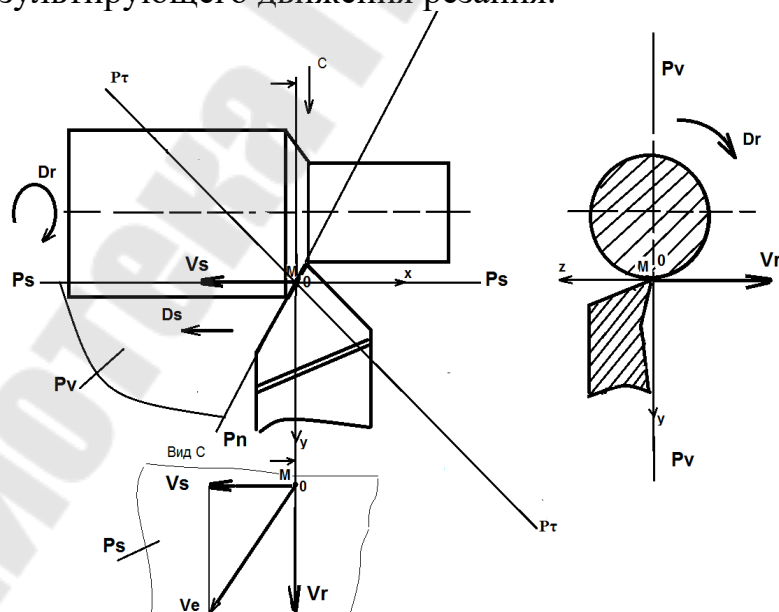


Рис. 2.2.14. Схема резания токарной обработки: построение координатных плоскостей

Главная секущая плоскость P_τ - называется координатная плоскость, проходящая через направления скорости результирующего движения резания и нормали к поверхности резания в рассматриваемой точке режущей кромки.

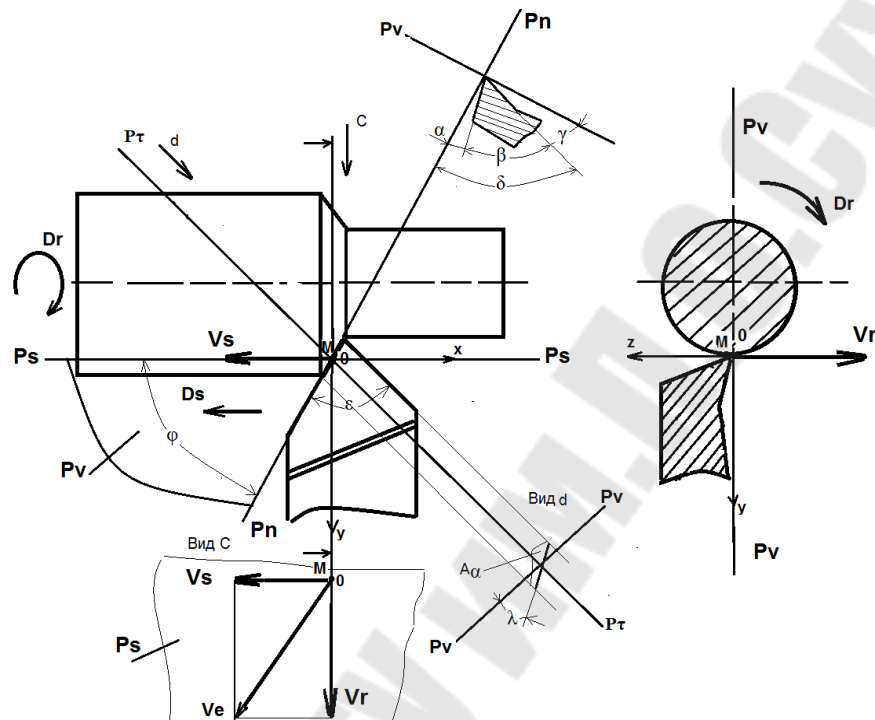


Рис. 2.2.15. Построение углов лезвия токарного резца в статической системе координат

Углы лезвия рассматриваются в координатных плоскостях (рис. 2.2.15):

- передний угол γ - это угол в секущей плоскости между передней поверхностью и основной плоскостью;

Передние углы в секущих плоскостях P_τ и P_n (рис. 2.2.16)

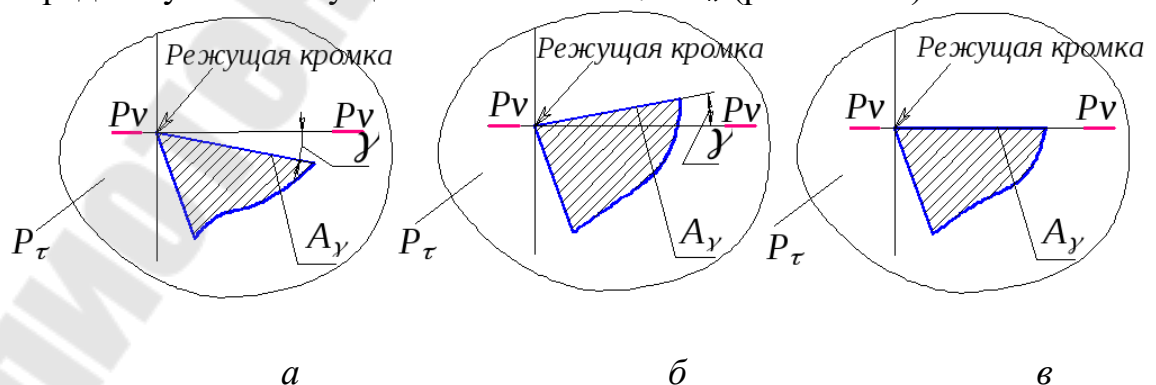


Рис. 2.2.16. Возможные варианты значений передних углов лезвий режущих инструментов: а) $\gamma > 0$; б) $\gamma < 0$; в) $\gamma = 0$

- задний угол α - это угол в секущей плоскости между задней поверхностью и плоскостью резания
- угол заострения β - это угол в секущей плоскости между передней и задней поверхностями;
- угол резания δ - это угол в секущей плоскости между передней поверхностью и плоскостью резания;
- угол в плане φ - это угол в основной плоскости между плоскостью резания и осью OX технологической системы координат (рис. 2.2.17).

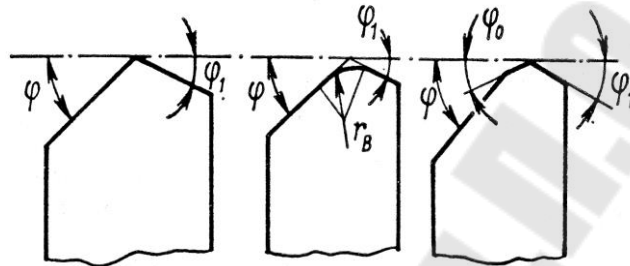


Рис. 2.2.17. Углы в плане: главный и вспомогательные

- угол при вершине ε - это угол в основной плоскости между плоскостями резания двух сопрягающихся в вершине режущих кромок;
- угол наклона кромки λ - это угол в плоскости резания между режущей кромкой и основной плоскостью.

Угол наклона кромки λ может быть отрицательным, равным 0 или положительным, что определяет направление схода стружки (рис. 2.2.18).

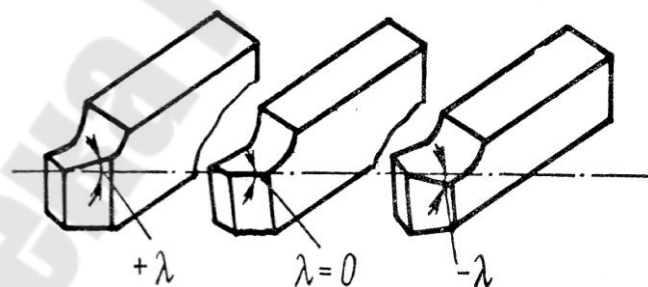


Рис. 2.2.18. Угол наклона главной режущей кромки.

Между углами в основной и в главной секущей плоскостях имеют место вполне очевидные соотношения:

$$\gamma + \alpha + \beta = 90^\circ,$$

$$\varphi + \varphi' + \varepsilon = 180^\circ,$$

$$\gamma + \delta = 90^\circ,$$

$$\beta + \alpha = \delta.$$

Изменяемость и пересчет углов. Причины изменяемости углов в процессе резания (рис. 2.2.19).

Геометрические параметры резца α , γ , α_1 и γ_1 измеряются в сечениях, перпендикулярных к проекциям режущих кромок на основную плоскость. Однако обеспечить на заточных станках положение затачиваемого инструмента относительно шлифовального круга, при котором получают требуемые геометрические параметры в таких сечениях, в большинстве случаев невозможно. Заточные станки позволяют воспроизвести геометрию резания перпендикулярных к основной плоскости (рис. 2.2.19). Углы в этих сечениях связаны между собой соотношениями

- при положительном значении угла наклона кромки λ :

$$\operatorname{tg} \gamma_{np} = \operatorname{tg} \gamma \cos \varphi - \operatorname{tg} \lambda \sin \varphi;$$

$$\operatorname{tg} \gamma_n = \operatorname{tg} \gamma \sin \varphi + \operatorname{tg} \lambda \cos \varphi;$$

- при отрицательном значении угла наклона кромки λ :

$$\operatorname{tg} \gamma_{np} = \operatorname{tg} \gamma \cos \varphi + \operatorname{tg} \lambda \sin \varphi;$$

$$\operatorname{tg} \gamma_n = \operatorname{tg} \gamma \sin \varphi - \operatorname{tg} \lambda \cos \varphi;$$

где γ_{np} - продольный передний угол, γ_n - поперечный.

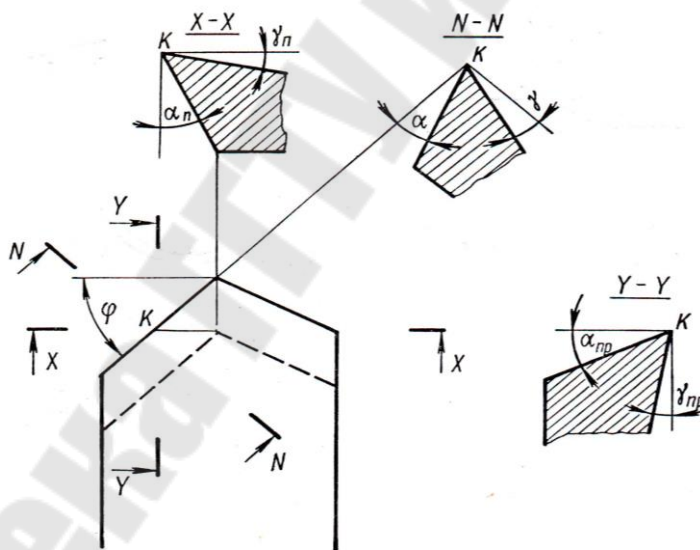


Рис. 2.2.19. Схема зависимости между передними и задними углами в главной, продольной и поперечной секущих плоскостях

Так как λ угол небольшой и изменяется в пределах от $0 \pm 5^\circ$, второе слагаемое очень мало и им можно пренебречь. Тогда

$$\operatorname{tg} \gamma_{np} = \operatorname{tg} \gamma \cos \varphi;$$

$$\operatorname{tg} \gamma_n = \operatorname{tg} \gamma \sin \varphi.$$

Аналогичным образом можно получить значения для продольного и поперечного задних углов.

$$\operatorname{tg} \alpha_{np} = \operatorname{tg} \alpha / \cos \varphi;$$

$$\operatorname{tg} \alpha_n = \operatorname{tg} \alpha / \sin \varphi.$$

Тема 2.3. Контактные процессы в зоне резания.

Процессу резания присущи контактные явления, такие как трение, напряжения на передней поверхности лезвия, изменения температуры в зоне контакта, скорость деформации. В этих условиях резко меняются физико-механические свойства материала: возрастает число возможных плоскостей скольжения и т.д. Необходимым же условием существования процесса резания является наличие *стружки* при образовании поверхности, т.е. иными словами, без стружки нет резания. Элементами процесса резания являются геометрия срезаемого слоя, т.е. его толщина и ширина. Форма и размеры срезаемого слоя (рис. 2.3.1) зависят от *глубины резания, подачи на оборот, геометрии режущего инструмента* (углов ϕ и ϕ_1) и формы режущей кромки инструмента. При перемещении инструмента вдоль оси заготовки его вершина описывает винтовую линию с шагом, равным S_0 .

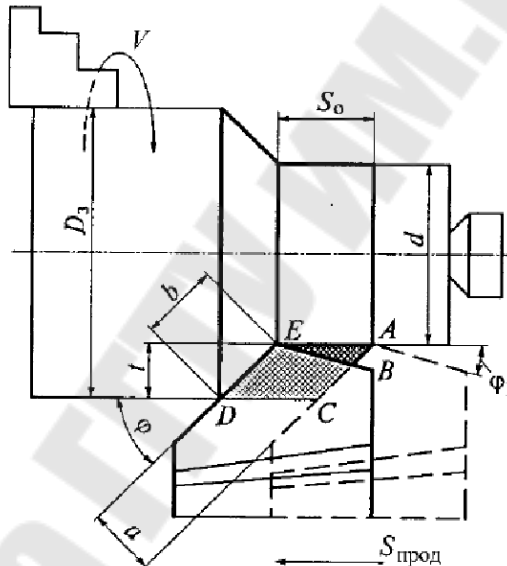


Рис. 2.3.1. Элементы процесса резания и геометрия снимаемого слоя:
 $D_з$ – диаметр заготовки; d – диаметр обработанной поверхности; V – движение резания; $S_{прод}$ – движение продольной подачи; S_0 – подача на оборот; t – глубина резания; a , b – толщина и ширина срезаемого слоя; ϕ , ϕ_1 – углы в плане; CDE – сечение срезаемого слоя; ABE – не срезанный гребешок

Следовательно, не вся площадь поперечного сечения материала $ACDE$ будет срезана с заготовки. Действительное сечение срезаемого слоя $BCDE = ACDE - ABE$. Остаточное сечение ABE в виде винтовой линии останется на заготовке. Однако фактическая шероховатость обработанной поверхности определяется не только остаточным сечением ABE , но и физико-механическими свойствами материала заготовки, вибрациями технологической системы «станок – приспособление – инструмент – деталь».

Но при одной и той же подаче и глубине резания в зависимости от формы режущей кромки и ее расположения (углов в плане) изменяются *ширина* и *толщина* поперечного сечения срезаемого слоя, от которых зависят процессы пластической и упругой деформации, сопротивление металла деформированию, количество выделившейся теплоты и условия теплоотвода.

Толщина среза a измеряется в направлении, перпендикулярном к режущей кромке, ширина b среза – вдоль режущей кромки (в мм).

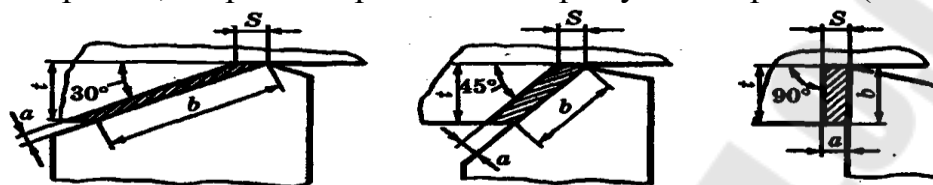


Рис. 2.3.2. Зависимость толщины, ширины от угла в плане и глубины.

Между толщиной снимаемого слоя и подачей, так и между глубиной резания и шириной снимаемого слоя существуют определенные соотношения (рис. 2.3.2):

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

Из приведенных формул и рис. (выше) видно, что при постоянных S и глубине резания t с увеличением главного угла в плане φ толщина среза увеличивается, а ширина уменьшается.

При фрезеровании для прямозубой фрезы $b = B$, для цилиндрической фрезы с винтовыми зубьями b является переменной величиной (рис. 2.3.3).

Для торцовых фрез $b = t / (\sin \varphi \cos \lambda)$. Где λ – угол наклона режущей кромки.

$$\sin \frac{\delta}{2} = \frac{B/2}{D/2} = \frac{B}{D}$$

Площадь поперечного сечения среза: $f = tS = ab$ (мм²) (S – подача).

При фрезеровании иногда рассматривается понятие средней и срединной толщин среза. Средняя толщина среза равна (рис. 2.3.3):

Срединная толщина среза соответствующая углу контакта $\delta/2$ равна

$$a_{cp} = S_z \sin \left(\frac{\delta}{2} \right) = S_z \sqrt{\frac{t}{D}}$$

Угол контакт δ – центральный угол, соответствующий дуге контакта фрезы с заготовкой.

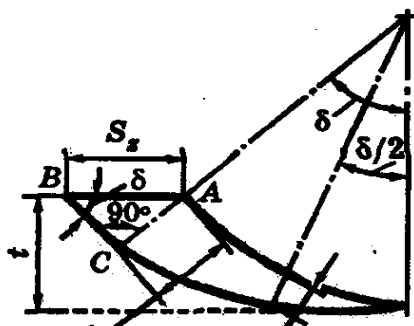


Рис. 2.3.3. Толщина срезаемого слоя при фрезеровании

Воздействие лезвий инструмента на обрабатываемую заготовку вызывает *упругую и пластическую деформацию* материала. Особенностью упругой деформации является восстановление размеров и формы деформируемого объема материала после снятия нагрузки за счет обратимого изменения межатомных расстояний в кристаллической решетке. При пластической деформации происходит необратимое, т.е. остаточное изменение формы и размеров деформируемого объема без нарушения его сплошности путем необратимого перемещения отдельных атомов, кристаллитов, зерен. В ряде случаев наблюдается разрушение срезаемого слоя.

При пластической деформации происходит переход материала из равновесного состояния с минимальной внутренней (потенциальной) энергией в неравновесное, характеризующееся повышенным содержанием запасенной энергии. В результате при пластической деформации изменяются не только размеры и форма деформируемого материала, но и физико-механические свойства (твердость, тепло- и электропроводность и др.), так как последние обусловлены энергетическим состоянием материала.



Рис. 2.3.4. Виды деформации кристаллов: а – скольжение (сдвиг); б – двойникование.

Поэтому в общем случае пластическая деформация – это сложная совокупность механо-физико-химических явлений. К

внутрикристаллическим явлениям в монокристаллах следует отнести скольжение (сдвиг) и двойникование (рис. 2.3.4).

Двойникование характеризуется поворотом деформированной части кристалла вокруг некоторой оси в зеркальное положение по отношению к недеформированному состоянию за счет одновременного скольжения по системам атомных плоскостей (рис. 2.3.4, б).

Явление Двойникование внешне сопровождается скачкообразным изменением сдвигающихся напряжений; в наибольшей мере эти явления наблюдаются при высоких скоростях деформирования и предшествуют моменту разрушения.

Различают три основных вида деформированного состояния тела.

1. Растяжение, при котором вдоль одной из трех главных осей деформации x , y , z наблюдается удлинение, а вдоль остальных двух – укорочение деформируемого тела (рис. 2.3.5, а).

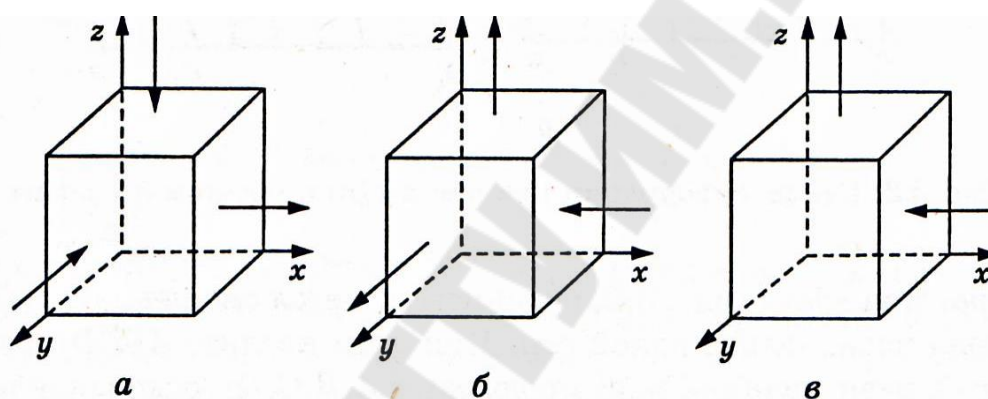


Рис. 2.3.5. Три основных вида деформированного состояния тела.

2. Сжатие, при котором вдоль одной из главных осей деформации наблюдается укорочение тела, а вдоль остальных двух – его удлинение (рис. 2.3.5, б). Если деформации удлинения равны между собой, сжатие называется простым.

3. Сдвиг, при котором деформация тела вдоль одной из главных осей отсутствует, вдоль второй оси происходит укорочение, а вдоль третьей главной оси – равное ему удлинение (рис. 2.3.5, в).

Различают чистый и простой сдвиги. При чистом сдвиге (рис. 2.3.6, а) происходит равномерное укорочение тела вдоль одной оси и равномерное его удлинение вдоль другой, перпендикулярной к первой. Квадрат $ABCD$ превращается в равновеликий ромб $AB_1C_1D_1$ при неизменном объеме тела.

Простой сдвиг (рис. 2.3.6, б) сопровождается смещением всех точек тела параллельно одной оси. При этом квадрат $ABCD$ превращается в равновеликий параллелограмм $AB_1C_1D_1$, основание и высота которого такие же, как и у исходного квадрата.

Растяжение и сжатие тела относятся к объемному, а его сдвиг – к плоскому деформированному состоянию.

Рассмотрим более подробно деформацию простого сдвига на примере перехода срезаемого слоя в стружку при металлообработке, так как при $b \gg a$ практически все перемещения срезаемого слоя происходит в одной плоскости.

Частица срезаемого слоя, находящаяся далеко от режущего инструмента, свободна от напряжений и движется по направлению к инструменту с постоянной скоростью. По мере приближения к режущему инструменту напряжения в рассматриваемой частице возрастают. Когда они превзойдут предел упругости обрабатываемого материала, частица получит пластическое смещение и изменит направление своего движения. Эти изменения происходят за время пребывания частицы в некоторой переходной пластически деформированной зоне $ABCD$ (рис. 2.3.7, а).

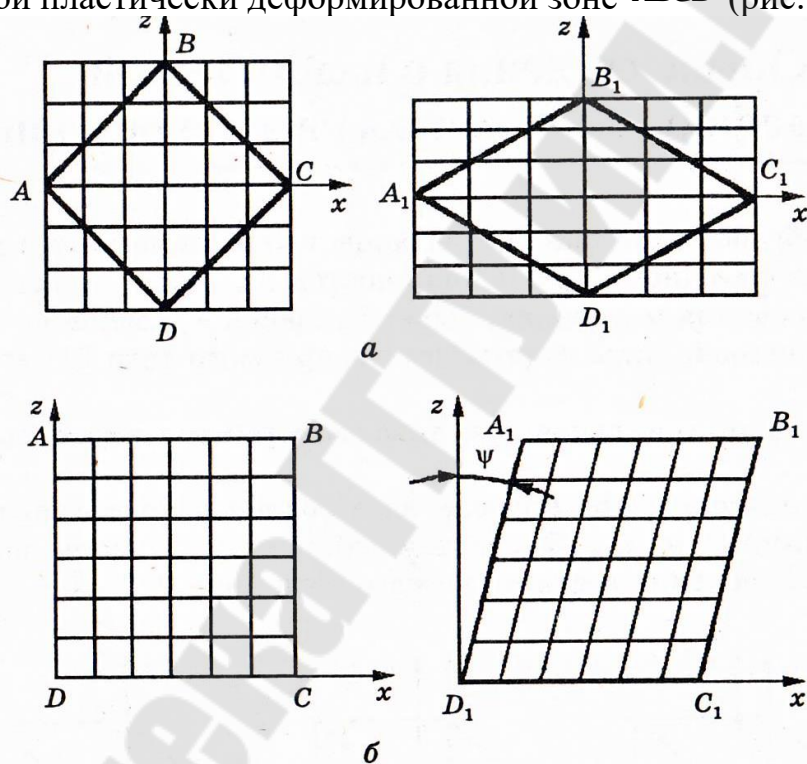


Рис. 2.3.6. Схемы деформации при чистом (а) и простом (б) сдвиге

Поскольку в результате отделения слоя металла толщиной a и превращения его в стружку часть единого тела движется параллельно передней поверхности лезвия инструмента, а оставшаяся часть продолжает движение в прежнем направлении, то в точке, соответствующей сопряжению передней и задней поверхности инструмента, под углом Φ к направлению движения, называемого углом сдвига, произойдет разделение тела на стружку и обрабатываемую деталь.

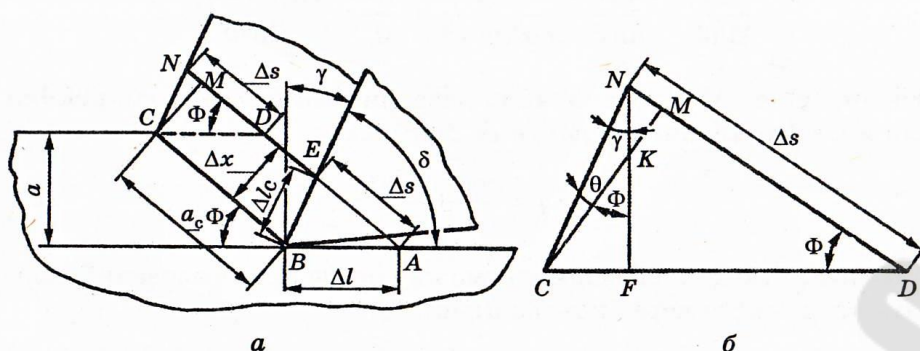


Рис. 2.3.7. Схема к расчету относительного сдвига.

Представим переходную пластическую деформируемую зону в виде параллелограмма $ABCD$ (рис. 2.3.7, а), а линии скольжения в ней примем за прямые. Толщину этой зоны обозначим через Δx , а ее сдвиг – через Δs . Значение Δs соответствует расстоянию (см. рис. 2.3.7, б), на которое сдвинулась верхняя сторона квадрата относительно нижней, и называется абсолютным сдвигом. В теории пластических деформаций для характеристики интенсивности сдвига пользуется величиной ε , называемой относительным сдвигом. Он равен отношению абсолютного сдвига Δs к толщине слоя Δx , претерпевшего этот сдвиг, т.е. $\varepsilon = \Delta s / \Delta x$. Геометрически ε равен тангенсу угла ψ наклона стороны квадрата к оси l , т.е. $\varepsilon = \operatorname{tg} \psi$ (см.рис. 2.3.7, б).

Элемент срезаемого слоя $ABCD$ под действием режущего клина инструмента деформируется и принимает форму параллелограмма $EBCN$. В треугольнике CDN (рис. 5, б)

$$MC = \Delta x; \angle CMD = 90^\circ; \angle RNC = \gamma; \angle NDC = \Phi;$$

$$ND = \Delta s; \angle FKC = \Phi; \angle NCK = \theta;$$

$$\varepsilon = \Delta s / \Delta x = ND / MC = MD / MC + MN / MC = \operatorname{ctg} \Phi + \operatorname{tg}(\Phi - \gamma). \quad (1)$$

$$2\Phi + \theta - \gamma = 2\Phi + \omega = c$$

Анализ формулы (1) показывает, что для расчета относительного сдвига при определенном угле γ необходимо знать угол сдвига. Его можно определить по длине стружки. При перемещении инструмента на длину Δl длина стружки равна Δl_c . Их треугольника ABE (рис. 2.3.13, а) получим:

$$\frac{\Delta l_c}{\sin \Phi} = \frac{\Delta l}{\sin \delta} = \frac{\Delta l}{\cos(\Phi - \gamma)}; \quad \frac{\Delta l}{\Delta l_c} = \frac{\cos(\Phi - \gamma)}{\sin \Phi}.$$

Отношение $\Delta l / \Delta l_c = K_l$ получило название коэффициента усадки или коэффициента укорочения стружки:

$$K_l = \frac{\cos(\Phi - \gamma)}{\sin \Phi}. \quad (2)$$

С помощью данной формулы можно после преобразований выразить угол сдвига через коэффициент K_l :

$$\operatorname{tg} \Phi = \frac{\cos \gamma}{K_l - \sin \gamma}.$$

Несмотря на принятые допущения о замене зоны первичной деформации единственной плоскостью сдвига и идеализации процесса превращения срезаемого слоя в стружку, формула 2 совершенно точно выражает связь между K_l и углом сдвига Φ , так как отражает условие сплошности материала стружки.

Таким образом, относительный сдвиг при резании зависит от угла сдвига Φ и переднего угла γ . Угол Φ можно определить, зная толщину среза a и толщину стружки a_c , а γ всегда известен. Практически $\varepsilon = 2..5$. определим, при каком угле Φ относительный сдвиг будет минимальным. Для этого возьмем первую производную уравнения (1), приравняем ее нулю и решим уравнение относительно Φ :

$$d\varepsilon/d\Phi = -\operatorname{cosec}^2 \Phi + \sec^2 (\Phi - \gamma) = 0.$$

Это условие справедливо при $\Phi = 90^\circ - (\Phi - \gamma)$. Тогда $\Phi_{\varepsilon \rightarrow \min} = 45^\circ + \gamma/2$.

Зная относительный сдвиг, можно определить скорость деформации ($\dot{\varepsilon}$), которая представляет собой отношение максимальной главной деформации $\varepsilon_{\max}$ к ее продолжительности $\tau_{\text{деф}}$, т.е. $\dot{\varepsilon} = \varepsilon_{\max} / \tau_{\text{деф}}$.

В настоящее время механизм скольжения в металлах объясняется с точки зрения теории дислокаций, представляющих собой несовершенства пространственной решетки кристаллита, обусловленные наличием в решетке чужеродных атомов внедрения, вакансий, а также смещений некоторых атомов в атомной плоскости от их нормального положения под действием различного рода напряжений, прежде всего термических. Дислокации образуются при кристаллизации металлов, пластическом деформировании в зоне высоких напряжений и при механической обработке. Дислокации оказывают двойное влияние на сопротивление сдвигу металла при резании. Увеличение их числа до определенного предела, например, при отжиге, резко снижает прочность. Однако при определенной их концентрации дислокации взаимодействуют между собой, «залечивают» дефекты и повышают прочность материала (при наклепе).

При пластической деформации технических металлов, имеющих поликристаллическое строение, помимо внутрикристаллической деформации, имеет место межкуристаллическая деформация, при которой происходят перемещения зерен относительно друг друга, сопровождающиеся нарушением границ между ними.

Механизма пластической деформации поликристаллов приближенно можно представить следующим образом. При приложении внешней нагрузки сначала деформируются те зерна, плоскости, скольжения которых

наиболее благоприятно расположены по отношению к действующей силе. Но деформация этих зерен затруднена соседними, в которых плоскости скольжения расположены иначе, поэтому каждое зерно будет находиться в сложном напряженном состоянии. Происходит внутрикристаллическая деформация, и отдельные зерна упрочняются. Для дальнейшего деформирования тела необходимо увеличить внешнюю нагрузку, что приведет к внутрикристаллической деформации уже в соседних зернах, вызовет разрушение зерен, перемещение и поворот их в определенном направлении по отношению к действующей силе (образование текстуры). В этом случае происходит изменение структуры и физико-механических свойств тела – возникновение внутренних напряжений, повышение твердости, снижение пластичности и теплопроводности.

Процессу резания так же присущи контактные явления, такие как трение, напряжения на передней поверхности лезвия, изменения температуры в зоне контакта, скорость деформации. В этих условиях резко меняются физико-механические свойства материала: возрастает число возможных плоскостей скольжения, изменяется соотношение его предела текучести и временного сопротивления, возрастает химическая активность материала и т.д.

Экспериментальные данные показывают, что только за счет образования новой поверхности в пределах площадки контакта стружки с передней поверхностью лезвия в секунду возникает около 1015 свободных связей. И хотя продолжительность их существования в несвязанном состоянии 10-12 с, на передней поверхности лезвия успевает образоваться так называемый граничный слой. Этот чрезвычайно тонкий слой возникает благодаря мгновенному процессу схватывания двух разнородных материалов и сопровождающих его явлений адгезии и диффузии. В условиях действия внешней среды к этим явлениям присоединяются также адсорбция (поглощение вещества из газовой или жидкой среды поверхностным слоем твердого тела) и химические реакции вновь возникающих при резании поверхностей с внешней средой. В связи с тем, что поверхности лезвия и стружки не идеально гладкие, а имеют микро- и субмикронеровности, трещины, они контактируют не по плоскости, а лишь в локальных точках фактического и физического контактов. Эти точки являются активными центрами взаимодействия инструментального и обрабатываемого материалов с наиболее высокой свободной энергией, и именно здесь начинается образование граничного слоя.

Граничный слой в свою очередь состоит из нескольких слоев — переходного между поверхностями инструмента и обрабатываемого материала и последующих. В пределах переходного слоя наблюдается большое количество пор, образовавшихся между выступающими зернами инструментального материала и внутри сильно деформированного

обрабатываемого металла. Граничный слой формируется в результате действия явления переноса — перенесения одного материала на поверхность другого в результате твердофазных взаимодействий между ними. Перенос — явление чрезвычайно сложное и проявляется на макро- (налипы, обволакивание, намазывание), микро- и субмикроскопическом уровнях. Для него характерны неоднородность рельефа контактной поверхности вследствие различных скоростей схватывания и разрушения пары инструментальный — обрабатываемый материалы на различных участках контакта; фазовые превращения, обусловленные взаимодействием данной пары между собой и внешней средой; наличие текстуры; образование различных микро- и субмикроструктур и др.

Граничный слой служит своего рода основой, влияющей на другие контактные процессы. Например, он может сохранять свою малую толщину или служить первоосновой для образования наростов значительной высоты; защищать площадки контакта от изнашивания или, наоборот, способствовать ему; изменять условия трения и т. д.

Площадка трения на передней поверхности инструмента шириной C (рис. 2.3.8) состоит из участков пластического контакта шириной C_n и упругого.

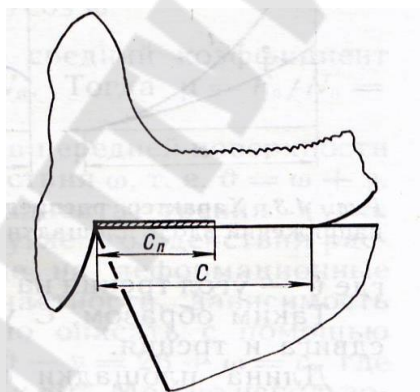


Рис. 2.3. Зоны трения на передней поверхности инструмента

На участке C_n стружка движется по заторможенному слою, и сопротивление, оказываемое движению стружки, определяется сопротивлением сдвигу в контактном слое стружки. При этом внешнее трение скольжения отсутствует и заменяется внутренним трением между отдельными слоями стружки. На участке за пределами C_n внешнее трение скольжения и сопротивление движению стружки определяются силой трения между стружкой и передней поверхностью инструмента. Ширина площадки контакта зависит от переднего угла γ , толщины срезаемого слоя, коэффициента утолщения стружки K_a , скорости резания и других факторов. Для ее определения используется следующая формула.

$$C = aK_a^{0.1} [K_a(1 - \operatorname{tg} \gamma) + \sec \gamma].$$

Из формулы, видно, что C растет при увеличении K_a и a , и уменьшается при увеличении угла γ . При увеличении λ ширина пластического контакта также уменьшается. Отношение C_n/C при обработке обычных конструкционных материалов чаще всего составляет 0,5 и не превышает 0,7 (рис. 2.3.9).

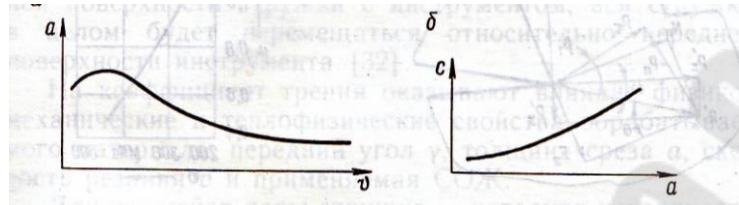


Рис. 2.3.9. Зависимость ширины площадки контакта от скорости резания (а) и толщины среза (б)

Для трущейся пары стружка — передняя поверхность инструмента средний коэффициент трения обуславливается склонностью к адгезионному взаимодействию инструментального и обрабатываемого материалов. Возникновение связей между стружкой и инструментом определяется их способностью образовывать между собой химические соединения и твердые растворы. Чем сильнее эти связи, возникающие в результате сил адгезии между стружкой и инструментом, тем больше средний коэффициент трения. С повышением механических свойств обрабатываемого материала средний коэффициент трения уменьшается, однако при этом возрастают средние нормальные и касательные напряжения. Если температура резания изменяется мало, средний коэффициент трения остается практически неизменным.

Характерными особенностями контакта стружки с передней поверхностью инструмента являются:

- 1) неравномерное распределение контактных напряжений на передней поверхности. У режущей кромки они достигают высоких значений и падают до нуля в точке отрыва стружки от передней поверхности;
- 2) изменение температуры контакта в широких пределах — от комнатной до температуры плавления обрабатываемого материала;
- 3) различная химическая чистота поверхностей контакта, которые могут быть химически чистыми или покрыты пленками различных химических соединений, исключающими металлический контакт.

Основные особенности трения при резании — различное физико-механическое состояния контактирующих поверхностей; интенсивное схватывание обрабатываемого и инструментального материалов; сложный характер распределения нормальных напряжений на контактных площадках малая продолжительность контакта инструмента со стружкой и деталью при постоянном обновлении зоны контакта и т.д.

При обработке резанием превращение срезаемого слоя в стружку является одной из разновидностей процесса пластического деформирования

материала, выражающейся в изменении под действием внешней силы формы деформируемого тела без его разрушения.

Процесс резания металлов складывается из трех стадий:

- упругой (обратимой) деформации срезаемого слоя
- пластической (необратимой) деформации
- разрушения по линии среза, в результате чего отделяется стружка.

При этом в процессе резания впереди лезвия инструмента всегда будет находиться определенная упругопластическая деформируемая зона обрабатываемого материала – зона опережающих деформаций. Эта зона, непрерывно распространяясь, охватывает как срезаемый слой, так и часть материала заготовки за линией среза.

Впервые процесс образования стружки при резании металлов исследовал И.А. Тиме (рис. 2.3.10).

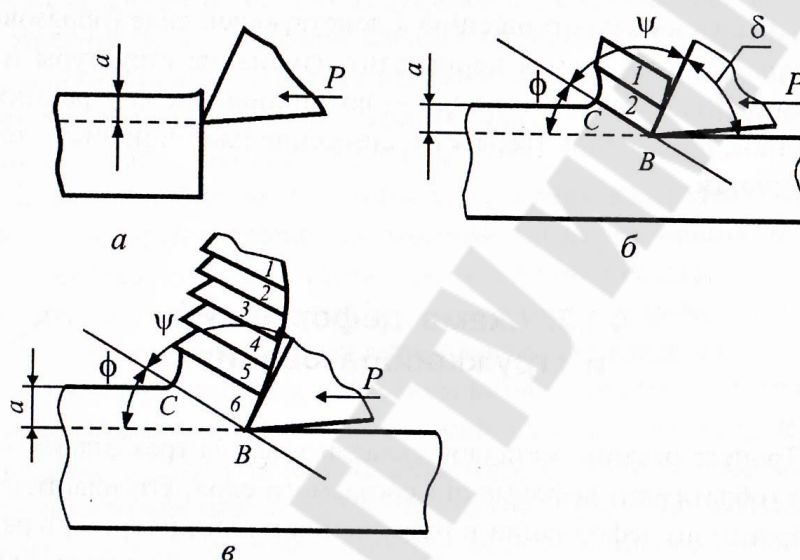


Рис. 2.3.10. Схема стружкообразования (по И.А.Тимме)

При перемещении резца частицы металла под действием силы P сначала упруго сжимаются (рисунок 2.3.10, а) и пластически деформируются до тех пор, пока напряжения в материале не достигнут предела текучести. В этот момент происходит скалывание элементов стружки, дальнейший их сдвиг по плоскости BC (рис. 2.3.10, б). Такое же изменение претерпевает каждый из элементов $1-6$ (рис. 2.3.10, в).

По наблюдениям И.А. Тиме, пластическая деформация распространяется в зоне, ограниченной углом Φ , который он называл сдвигом действий; угол Φ назван углом скалывания или углом сдвига, а плоскость BC - плоскостью скалывания (сдвига). Таков процесс образования стружки относится к пластичным материалам, обрабатываемым с большой толщиной среза при малом угле резания $\delta = 90^\circ - \gamma$.

И.А. Тиме установил, что пластическая деформационная зона в реальных условиях резания имеет небольшую толщину по сравнению с

толщиной среза (рис. 2.3.10, в), в результате у него появились основания считать, что процесс образования стружки при резании осуществляется по единственной плоскости сдвига.

Поскольку полное описание механизма стружкообразования сложно на практике используется упрощенная модель с использованием шлифа корня стружки, который получается с помощью специальных устройств для мгновенной остановки процесса резания. Анализ шлифов позволяет предположить следующий механизм стружкообразования.

Режущий клин (рис. 2.3.11) действует на срезаемый слой толщиной a на контактной площадке шириной b (рис. 2.3.11, б). Сила R' , с которой инструмент передней поверхностью давит на срезаемый слой, получила название силы стружкообразования. Линия OK разграничивает области сжимающих (слева от OK) и растягивающих (справа от OK) напряжений в обрабатываемом материале ниже поверхности резания.

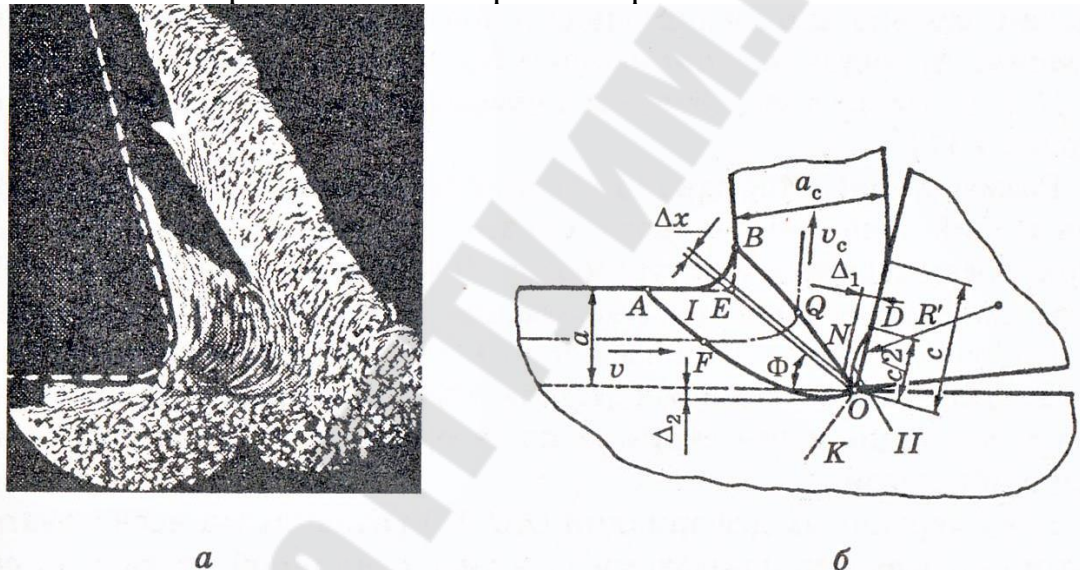


Рис. 2.3.11. Корень сливной стружки (а) и зоны первичной и вторичной деформации при превращении срезаемого слоя в сливную стружку (б).

Зона I , обозначенная $OABNO$ и расположенная перед передней поверхностью инструмента, является зоной первичной деформации. Она имеет форму клина с вершиной, совпадающей с вершиной инструмента. Нижняя граница OA зоны I вогнута и пересекает продолжение поверхности резания. По длине она в 2-4 раза больше выпуклой верхней границы OB зоны I . Обрабатываемая поверхность плавно сопрягается со свободной стороной стружки по линии AB . Правее линии OB находятся зерна стружки, а левее линии OA - недеформированные зерна материала срезаемого слоя. Зерно материала срезаемого слоя, перемещаясь относительно инструмента со скоростью v , проходит по траектории своего движения (кривая FQ) и

сильно деформируется. Деформация зерна заканчивается в точке Q , и оно приобретает скорость v_e , т.е. скорость стружки.

Многочисленными исследованиями установлено, что при резании с большими сечениями среза уширение стружки незначительно, поэтому можно считать, что деформационное состояние в зоне стружкообразования является плоским и срезаемый слой в процессе резания претерпевает деформацию сдвига. Линией OA показана поверхность сдвига (скольжения), на которой сдвигающие напряжения равны пределу текучести τ_c материала на сдвиг, т.е. $\tau = \tau_c$. Вся зона $OABNO$ делится на подобные поверхности, на каждой из которых сдвигающие напряжения равны пределу текучести материала, уже получившего упрочнение в результате предшествующей деформации. Граница последней сдвиговой деформации обозначена на рисунке линией OB . На ней сдвигающие напряжения τ равны пределу текучести τ'_c на сдвиг материала, окончательно упрочненного в результате превращения срезаемого слоя в стружку.

Деформирование срезаемого материала на этом было бы закончено, если бы отсутствовало трение между контактной поверхностью стружки и поверхностью инструмента. Поскольку трение между указанными поверхностями имеется всегда, зерна стружки находящиеся в непосредственной близости от контактной поверхности стружки, продолжают деформироваться и после выхода их из зоны первичной деформации. Так возникает зона II вторичной деформации стружки, ограниченная передней поверхностью инструмента и линией OND . Ширина OD этой зоны приблизительно равна половине ширины площадки контакта C , а максимальная ее толщина Δ_1 составляет примерно $0,1a_c$. Степень деформации зерен в II зоне может в 20 и более раз превышать среднюю деформацию стружки.

Размеры зоны вторичной деформации и степень деформации зерен в этой зоне определяются силами трения на контактных поверхностях стружки и инструмента. Чем меньше силы трения, тем меньше размеры зоны II и деформация в ней зерен. При уменьшении a , увеличении γ и применении СОЖ (смазывающе-охлаждающей жидкости) с сильно выраженными смазочными свойствами зона II практически исчезает. В этом случае деформация зерен стружки по ее толщине остается практически одинаковой.

Зерна первичных деформаций $OABNO$ различными исследователями описывались по-разному – в виде единичной плоскости, семейства плоскостей, семейства кривых линий скольжения и т.д. Но толщина зоны первичной деформации соизмерима с толщиной срезаемого слоя только при малых значениях γ , низких скоростях резания и больших толщинах срезаемого слоя. При значениях γ , a , v , используемых в производственных

условиях, протяженность FQ зоны первичной деформации резко сокращается, а ее границы OA и OB сдвигаются, приближаясь к линии OE , наклонной к плоскости резания под углом Φ . Это позволяет считать, что сдвиговые деформации локализуются в тонком слое толщиной Δx , а семейство плоскостей скольжения можно заменить единственной плоскостью OE , называемой плоскостью сдвига. При этом превращение срезаемого слоя в стружку можно представить как последовательные сдвиги тонких слоев обрабатываемого материала вдоль условной плоскости сдвига. Процесс образования стружки в этом случае должен подчиняться закономерностям простого сдвига.

Деформация стружки осуществляется в следующей последовательности.

При резании металлов пластическая деформация внешне проявляется в том, что толщина стружки a_c становится больше толщины среза a (рис. 2.3.10), а ее ширина больше ширины срезаемого слоя, т.е. $b_c > b$. Но так как объем стружки остается прежним, оказывается, что длина стружки l_c обычно становится короче пути l , пройденного инструментом.

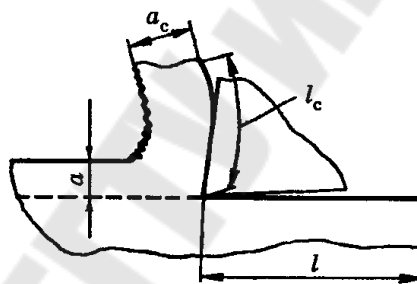


Рис. 2.3.12. Схема определения коэффициента укорочения стружки

Указанное изменение размеров срезаемого слоя называется усадкой стружки и характеризуется коэффициентами

$$K_l = \frac{l}{l_c}; K_a = \frac{a_c}{a}; K_b = \frac{b_c}{b},$$

где K_l , K_a , K_b — коэффициенты соответственно укорочения, утолщения и уширения стружки. Эти коэффициенты, как правило, больше единицы и являются косвенными показателями интенсивности пластической деформации при резании металлов. Они показывают, во сколько раз размеры стружки по длине, толщине и ширине меньше или больше соответствующих размеров срезаемого слоя. Так как объем стружки равен объему срезаемого слоя, то $lab = l_c a_c b_c$, поэтому $K_l = K_a K_b$.

Обычно уширение стружки даже при свободном резании невелико и составляет 5... 15 % от ширины срезаемого слоя, в то время как укорочение и утолщение стружки оцениваются в 250...600 % и более. Поэтому при черновой обработке уширением стружки можно пренебречь и считать, что

$K_t \approx K_a$. При резании же с малыми сечениями среза, K_b достаточно велик и достигает 1,5 и более. В этих случаях даже поперечное сечение стружки не соответствует сечению среза, а приобретает форму треугольника. Поэтому при исследовании чистовых процессов отдельно рассматривают K_t , K_a и K_b .

Иногда на стружке наблюдаются значительные выступы и впадины, т.е. она имеет сегментированную форму (рис. 2.3.13). В этом случае для расчетов можно пользоваться формулой.

$$K_t = K_a K_b e_0 \quad (3)$$

где $K_a = a_c/a$ — коэффициент утолщения; $K_b = b_c/b$ — коэффициент уширения; e_0 — коэффициент сплошности стружки: $e_0 = (a_1 + a_2)/(2a_1)$; для непрерывной сливной стружки $e_0 = 1$, для элементной $e_0 < 1$.

На основании экспериментальных данных установлено, что для $\gamma + 0...10^\circ$ и $\Phi > 36...40^\circ$ $K_t < 1$, что характерно для сверхскоростной обработки и резания титановых сплавов. В данном случае длина стружки за счет пустот на стороне, противоположной прирезцово́й зоне, становится больше длины срезаемого слоя, а K_t будет меньше единицы (0,75...0,9). Такое явление называют отрицательной усадкой.

Коэффициент K_t легко определить расчетным путем по формуле (3). Анализируя формулу (3), можно заметить, что скорость перемещения стружки относительно передней поверхности лезвия в K_t раз меньше скорости резания, т.е. $v_c = v/K_t$.

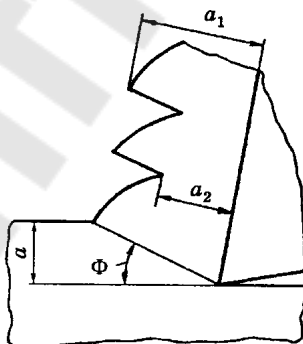


Рис. 2.3.13. Схема определения коэффициента укорочения сегментной стружки.

В зависимости от физико-механических свойств обрабатываемого материала режимов резания и геометрии инструмента определены виды стружки: - стружка сливная (рис. 2.3.14, а), скалывания (рис. 2.3.14, б), - элементная (рисунок 2.3.14, в), - надлома (рис. 2.3.14, г).

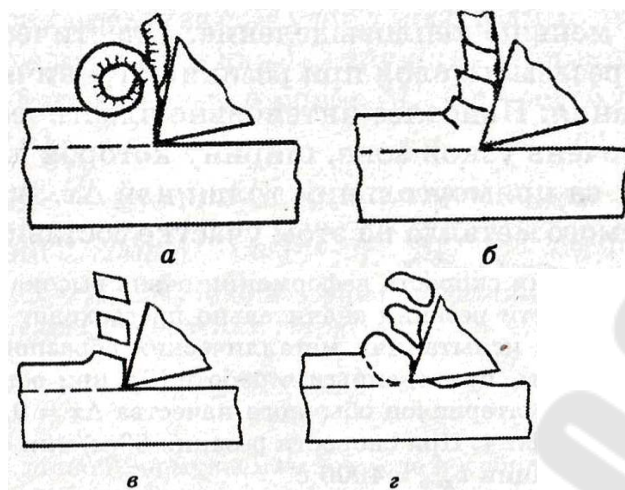


Рис. 2.3.14. Виды стружки

Стружка скалывания (б) состоит из отдельных элементов. Поверхность стружки, контактирующая с передней поверхностью резца, гладкая. Она образуется в результате обработки сталей и других пластичных материалов при большой толщине срезаемого слоя, и относительно низкой скорости резания и небольшом переднем угле γ лезвия. При уменьшении толщины среза, повышении скорости резания и увеличении переднего угла отдельные элементы стружки становятся менее отчетливыми и сходят без зазубрин на ее внешней стороне (*сливная стружка а*). Если увеличить толщину среза, уменьшить скорость резания и передний угол γ , отдельные элементы стружки будут менее связанными, т.е. образуется *элементная стружка (в)*. Эти три вида стружки образуются при обработке пластичных металлов.

В случае обработки хрупких материалов при больших толщинах среза и больших передних углах происходит вырывание или откалывание крупных частиц металла неправильной формы. Получаемая при этом стружка называется *стружкой надлома (г)*. Она образуется, например, при обработке чугуна, который плохо сопротивляется растяжению. При больших передних углах в срезаемом слое появляются напряжения отрыва, которые способствуют выламыванию кусков металла. Если увеличить скорость резания, при обработке чугуна образуется элементная стружка, а при очень высоких скоростях чугун даст сливную стружку, хотя по сравнению со стальной стружкой прочность ее низка.

В последние годы развитие технологий механической обработки деталей и усовершенствования оборудования привело к дальнейшему развитию и совершенствованию классификации стружек. Установлено, что при сверхвысоких скоростях резания возникают настолько большие градиенты температур и скорости деформирования, что происходит резкое снижение предела пластичности (материал становится хрупким). Это наблюдается в чрезвычайно узких зонах срезаемого слоя (толщиной 200-400

мкм), которые отделены друг от друга сильно деформированными слоями толщиной 2-4 мкм, в которых успевает произойти упрочнение обрабатываемого материала. В результате формируется стружка, которая получила название сегментированной (пилообразной). явление, называемое наростообразованием. Под наростом понимают клиновидную относительно неподвижную область материала, расположенную на передней поверхности лезвия вдоль его режущей кромки (рис. 2.3.15). Нарост — сложное по химическому составу агрегатное состояние металла из продуктов взаимодействия обрабатываемого и инструментального материалов и окружающей среды. Представляет собой слои сильно деформированного обрабатываемого материала с включениями оксидов и карбидов обрабатываемого и инструментального материалов, а также кобальта, входящего в состав твердого сплава.



Рис. 2.3.15. Нарост на резце из быстрорежущей стали после обработки алюминия

Строение нароста сложное: основная его часть — это «третье тело», прочно соединенное с поверхностью инструмента, на которое наращиваются последующие слои сходящей стружки; остальные части нароста расположены на основной, имеют иное происхождение и являются частью застойной зоны. («Третье тело» — частицы, образующиеся в зоне контактирования двух трущихся тел, отличающиеся от них составом и свойствами.)

Основная часть нароста после формирования выполняет функции передней поверхности инструмента. Вследствие этого уменьшается длина контакта стружки с передней поверхностью, т.е. происходит «укорочение» последней. При воздействии укороченной передней поверхности инструмента на срезаемый слой в переходной пластически деформируемой зоне возникает объемная пластическая деформация. Металл деформируется не только в плоскости стружкообразования, но и вдоль режущих кромок инструмента. При металлографическом анализе застойная зона имеет вид

эквидистантных полос, приближающихся по форме к эллиптическим, причем каждая из них замыкается на давящей поверхности инструмента, роль которого выполняет основная часть нароста. При интенсивном схватывании обрабатываемого и инструментального материалов и высоком пределе прочности на сдвиг сформированных в застойной зоне вторичных структур может происходить трансформация застойной зоны или ее части в нарост.

Процесс образования нароста схематично можно представить следующим образом. При определенных температурах и высоких давлениях в зоне резания химически чистые (ювенильные) поверхности стружки и инструмента подвергаются адгезионному схватыванию: происходит прочное присоединение контактного слоя стружки к передней поверхности инструмента и образование заторможенного слоя. Обтекание этого слоя стружкой способствует возникновению новых заторможенных слоев металла, которые наращиваются друг на друга, пока нарост не достигнет размеров, максимально возможных при данных условиях. Шероховатая поверхность каждого вновь образованного заторможенного слоя создает благоприятные условия для проникновения кислорода воздуха и его диффундирования в поверхностные слои металла. Оксидные пленки уменьшают трение между стружкой и поверхностью нароста, и каждый последующий заторможенный слой становится короче предыдущего, что приводит к образованию нароста клиновидной формы. При достижении определенной высоты прочность нароста оказывается недостаточной и он разрушается. Разрушению нароста способствует и то, что он не полностью охватывается стружкой, т.е. между наростом, стружкой и поверхностью резания появляются зазоры, в результате чего он перестает находиться в условиях всестороннего сжатия.

Разрушенный нарост частично уносится стружкой, частично — поверхностью детали. Так как сходящая стружка скользит не по вершине резца, а по передней поверхности нароста, действительный передний угол лезвия $\gamma_d = \gamma_n$ увеличивается, что способствует облегчению процесса резания. Вследствие высокой твердости нарост, выполняя функции режущего лезвия, отчасти предохраняет переднюю и заднюю поверхности инструмента от истирания сходящей стружкой и обработанной поверхностью и уменьшает нагревание. Это приводит к уменьшению износа инструмента, т.е. к повышению периода его стойкости. Наличие нароста увеличивает шероховатость обработанной поверхности, поскольку при разрушении нароста часть его уносится стружкой, а часть остается на обработанной поверхности детали.

Размеры нароста зависят от соотношения сил трения между образующейся стружкой и передней поверхностью лезвия инструмента и сил сцепления (сопротивления сдвигу) обрабатываемого и инструментального материалов; чем больше сила трения превышает силу сцепления, тем больше размеры нароста.

С помощью скоростной киносъемки установлено, что в большинстве случаев нарост — образование нестабильное. В каждой точке режущей кромки он возникает, увеличивается до максимальной высоты, затем частично или полностью разрушается, причем частота срывов может достигать 1000 или даже 2000 Гц.

Нарост не следует путать с *налипами*. Налипы появляются на передней поверхности при резании практически всегда. Они представляют собой вытянутые вдоль направления схода стружки наслоения длиной до 10 мкм, высотой 3...5 мкм, шириной 5... 10 мкм. При резании с наростом вблизи него возникают налипы, размеры которых в 2-3 раза больше указанных. Отличительная особенность налипов — соответствие их структуры структуре обрабатываемого материала.

С учетом встречающихся форм наростов и особенностей их контакта с передней и задней поверхностями лезвия предложена следующая их классификация.

При относительно низких скоростях резания образуется нарост *первого* вида (рис. 2.3.16, *а*). Он имеет форму, близкую к треугольной, небольшой радиус округления вершины, мало развит по высоте. Задний угол нароста близок к нулю, поэтому он практически не выступает за заднюю поверхность инструмента. Передний угол нароста велик. Как следствие, сходящая стружка контактирует с передней поверхностью инструмента за наростом. Структура нароста имеет вид слоев, почти параллельных передней поверхности (с замыканием концов этих слоев на передней поверхности).

При более высоких скоростях образуется нарост *второго* вида (рис. 2.3.16, *б*). Он имеет значительную высоту, большой передний угол и задний угол, достигающий 5...12°. Стружка постоянно контактирует с передней поверхностью нароста, примыкающей к его вершине, а с остальной частью контакт прерывистый. Основание нароста, примыкающее к передней поверхности, достаточно стабильно, а его верхняя часть часто разрушается и уносится стружкой или поверхностью резания. На прирезцовой стороне стружки заметна зона вторичных деформаций.

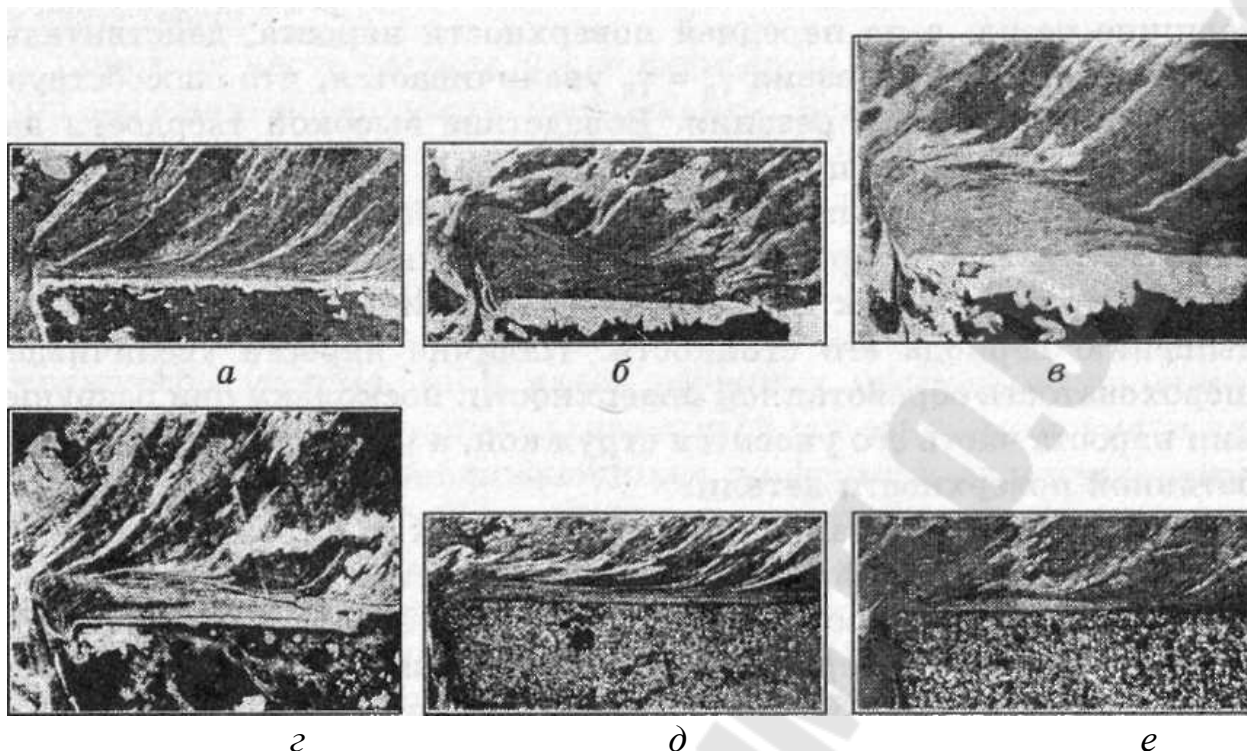


Рис. 2.3.16. Динамика наростообразования при точении стали 40 с различными скоростями резания: *а* - $v = 2$ м/мин; *б* - $v = 9$ м/мин; *в* - $v = 30$ м/мин; *г* - $v = 40$ м/мин; *д* - $v = 100$ м/мин; *е* - $v = 150$ м/мин; $a = 0,265$ мм; $\gamma = 10^\circ$.

С дальнейшим возрастанием скорости резания этот нарост преобразуется в нарост *третьего* вида (рис. 2.3.16, *в*, *г*). Его форма становится прямоугольной или близкой к трапецеидальной, он имеет значительную высоту. Действительный передний угол режущего клина чаще всего небольшой, иногда меньше нуля ($\gamma_d = -5...15^\circ$). Нарост значительно выступает за заднюю поверхность и защищает ее от непосредственного контакта с поверхностью резания. Фактически — это инструмент с укороченной передней поверхностью. Над вершиной нароста развивается застойная зона, а на стружке заметна вторичная деформация. Наросты такого вида наиболее стабильны, их срыв происходит крупными частицами или полностью.

Наконец, при еще более высоких скоростях резания возникает нарост *четвертого* вида (рис. 2.3.16, *д*), по форме и расположению близкий к первому. За счет малой высоты и большого действительного переднего угла сходящая стружка входит на некотором расстоянии от режущей кромки в плотный контакт с передней поверхностью. Текстура такого нароста выражена слабо. Это — нестабильное образование, постоянно изменяющееся во всем объеме. Разрушение его происходит не за счет срыва, а путем постоянного «стекания» с лезвия. При этом нарост размазывается по

поверхности резания и прирезцовой стороне стружки. При дальнейшем возрастании скорости резания нарост исчезает (рис. 2.3.16, е).

Возникновение наростов описанных разновидностей характерно для обработки сталей и чугунов; они встречаются при различных сочетаниях режимов резания, что обусловлено разными условиями трения на площадке контакта. Сила трения зависит от температуры в зоне образования стружки, т.е. температуры, которая определяется скоростью резания. Поэтому основной причиной изменения условий наростообразования при изменении скорости резания является температура резания. От нее в значительной степени зависит коэффициент трения стружки о переднюю поверхность инструмента. При низких скоростях, когда температура в зоне резания невелика, коэффициент трения относительно небольшой, поэтому нароста еще нет или он очень мал (рис. 2.3.17).

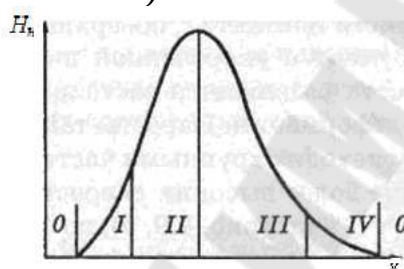


Рис. 2.3.17. Зависимость высоты нароста H_n от скорости резания: 0 — нарост отсутствует, I...IV — образуются наросты различных видов

При повышении скорости резания растет температура, а следовательно, и коэффициент трения стружки о переднюю поверхность инструмента, который становится максимальным при достижении какой-то определенной температуры. В этот момент нарост наибольший. При дальнейшем повышении скорости и температуры резания наступает размягчение пограничных слоев металла; уменьшаются коэффициент трения и размеры нароста.

Высота нароста зависит также от физико-механических свойств обрабатываемого металла (пластичности, прочности), толщины среза, величины переднего угла инструмента, условий охлаждения и смазывания в зоне резания и т.д. (рис. 2.3.18). Из рисунка видно, что чем менее пластичен материал ($HB_1 < HB_2$, рис. 2.3.18, а), меньше толщина срезаемого слоя ($a_1 > a_2 > a_3$, рисунок 2.3.18, б), больше передний угол ($\gamma_1 < \gamma_2 < \gamma_3$, рис. 2.3.18, в), тем меньше высота нароста.

Характер рассмотренных зависимостей объясняется условиями трения стружки о переднюю поверхность инструмента и температурой в зоне резания. Чем выше скорость резания v , тем выше и температура θ в зоне резания. Факторы, способствующие повышению температуры резания, вызывают сдвиг кривой влево. Факторы, способствующие уменьшению

трения, приводят к уменьшению θ , а следовательно, и нароста, и кривая смещается вправо (рис. 2.3.18, в, г).

С применением СОЖ кривая зависимости $H_n = f(v)$ переходит из положения 1 в положение 2 (рис. 2.3.18, г). Таким образом, при данном обрабатываемом металле и постоянных условиях смазывания размеры и форма нароста определяются только температурой на передней поверхности лезвия инструмента. Скорость резания, толщина среза, передний угол влияют постольку, поскольку они влияют на температуру резания.

Характер рассмотренных зависимостей объясняется условиями трения стружки о переднюю поверхность инструмента и температурой в зоне резания. Чем выше скорость резания v , тем выше и температура θ в зоне резания. Факторы, способствующие повышению температуры резания, вызывают сдвиг кривой влево. Факторы, способствующие уменьшению трения, приводят к уменьшению θ , а следовательно, и нароста, и кривая смещается вправо (рис. 2.3.18, в, г).

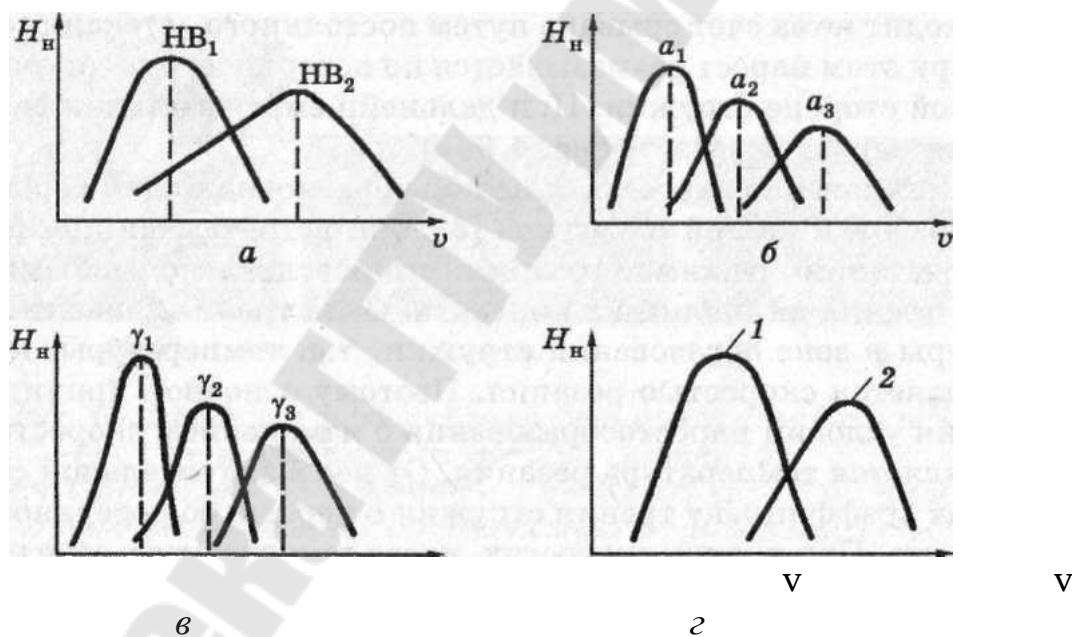


Рис. 2.3.18. Влияние условий резания на высоту нароста

Закономерности изменения размеров нароста аналогичны закономерностям изменения высоты неровностей на обработанной поверхности в зависимости от скорости резания. Это объясняется тем, что при разрушении частицы нароста остаются на обработанной поверхности, резко ухудшая ее шероховатость (рис. 2.3.19).

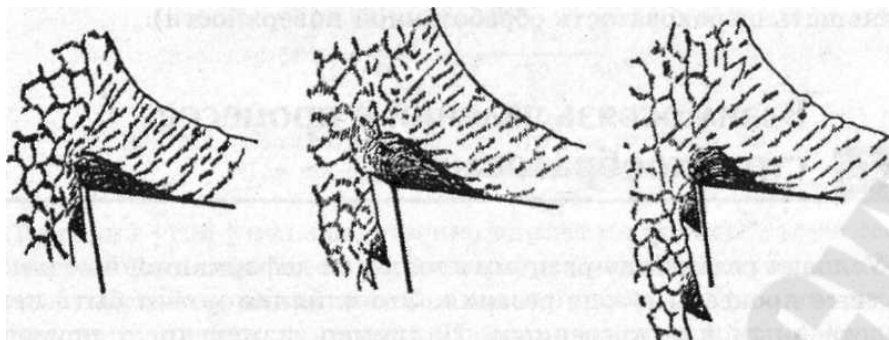


Рис. 2.3.19. Влияние нароста на формирование микрорельефа обработанной поверхности

Все материалы, подвергаемые обработке резанием, можно разделить на две группы: не склонные и склонные к наростообразованию. К первой группе относятся медь и ее сплавы, большинство титановых сплавов, белый чугун, закаленные стали, стали с большим содержанием хрома и никеля, ко второй — углеродистые и большинство легированных сталей, серый чугун, алюминиевые сплавы. При обработке этих материалов для снижения шероховатости обработанной поверхности необходимо:

- работать в зоне таких скоростей, при которых нарост не образуется, например, в зоне очень низких скоростей резания; однако это влечет за собой снижение производительности обработки, поэтому выгоднее работать в зоне высоких скоростей, при которых образовавшийся нарост не задерживается на лезвии инструмента;
- снижать шероховатость передней поверхности режущего инструмента, применяя доводку при его заточке;
- изменять физико-химические свойства поверхностных слоев контактных площадок инструмента путем нанесения тонкопленочных покрытий или микролегирования;
- по возможности увеличивать передний угол лезвия (например, при $\gamma = 45^\circ$ нарост почти не образуется);
- применять СОЖ, уменьшающие трение на передней поверхности лезвия инструмента;
- уменьшать пластичность обрабатываемого материала путем применения специальной термической обработки или использовать стали с присадками (например, применение автоматной стали с пониженным содержанием марганца и повышенным содержанием серы, а также нормализация обрабатываемых сталей позволяют уменьшать шероховатость обработанной поверхности).

При обработке деталей под действием сил резания в поверхностном слое металла происходит его упруго-пластическое деформирование. Пластическая деформация распространяется на определенную глубину металла, расположенного под обработанной поверхностью, и

сопровождается скольжением, т.е. перемещением отдельных частей кристаллов по определенным кристаллографическим плоскостям. Процесс скольжения начинается тогда, когда возникает критические напряжения, достаточные для его начала. Пластической деформации предшествует упругая, распространяющаяся со скоростью, близкой скорости звука. На пластическое деформирование, при котором происходит перемещение частей кристаллитов, требуется определенное время. Поэтому при больших скоростях деформирования частично наблюдается так же межкристаллическая пластическая деформация.

В процессе резания металлов зерна в поверхностном слое вытягиваются в направлении действия силы резания. Кристаллиты в основном ориентируются по кристаллографическим направлениям. Подобная ориентировка мелких зерен, вытянутых по направления деформации, называется текстурой.

При пластической деформации происходит возникновение и концентрация дислокаций (нарушение в отдельных местах правильного строения кристаллической решетки) около линии сдвига. Поскольку дислокации окружены полями упругих напряжений, для последующих деформаций потребуется значительно более усилие, чем в недеформированном металле. Это связано с необходимостью преодоления сопротивления полей напряжений. Следовательно, при резании пластическая деформация вызывает *наклеп* поверхности, за счет чего последняя упрочняется, повышается ее микротвердость и снижается пластичность. При наклепе наблюдается снижение электропроводности, теплопроводности и плотности металла, что объясняется увеличением дислокаций и вакансий в наклепанном металле, а следовательно, увеличивается степень его упрочнения N и глубина распространения наклепа h . Например, с увеличением подачи степень упрочнения N и глубина наклепа h возрастают, и уменьшаются с ростом скорости резания.

Для приближенного расчета глубины наклепа можно пользоваться методом, основанном на решении задач теории пластичности. При несвободном резании острым резцом

$$h = S(1 - \sin \beta) \sin 2\varphi / 2 \sin \beta, \quad (4)$$

где β - угол сдвига, φ - главный угол резца в плане.

Угол сдвига

$$\operatorname{tg} \beta = \cos \gamma / (K_a - \sin \gamma),$$

Где K_a - коэффициент утолщения стружки; γ - передний угол резца.

Формула (4) справедлива, когда отношения $S/t^{0,3}$.

Уставлено, что возможности упрочнения металла за счет его наклепа ограничены, и при чрезмерном пластическом может образоваться «перенаклеп», что приводит к его разупрочнению. Разупрочнение металла происходит при исчерпании зернами металла, возможности упрочнятся. При этом наблюдается его разрыхление, появление трещин, расслаивания.

Наклеп в поверхностном слое приводит металл к в структурно-неустойчивое состояние, вызванное неодинаковым распределением внутренних напряжений между отдельными зернами и даже целыми участками металла. В этих условиях возникает явление отбоя, т.е. стремление металла к возвращению в первоначальное, ненаклепанное состояние, чему способствует упругая деформация наклепанного металла, а также повышенная температура в зоне резания. При комнатной температуре отбой наклепанного металла протекает довольно медленно, однако уже при небольшом нагреве процесс ускоряется. При этом даже незначительное перемещение атомов могут снять искажения кристаллической решетки. Например, для снятия искажений атомной кристаллической решетки железа достаточно нагреть его до 200...300° С, после чего механические свойства железа частично восстанавливаются.

Тема 2.4. Силы резания

Система сил, действующих на контактных поверхностях в процессе резания. Уравнения механики резания. Равнодействующая сила. Составляющие силы резания. Измерение сил резания. Факторы, влияющие на силу резания. Зависимость сил резания от свойств обрабатываемого материала. Работа и мощность резания при точении, фрезеровании, осевой обработки, протягивании, фрезеровании.

Для того чтобы происходило резание, к резцу должна быть приложена некоторая сила, действующая в направлении главного движения. Эта сила должна преодолеть сопротивление металла разрушению (образованию стружки). Это сопротивление может быть выражено силами, действующими на инструмент со стороны, обрабатываемой заготовки.

Рассмотрим систему сил, возникающих при свободном резании (рис. 2.4.1, а). На переднюю поверхность резца давит стружка с силой $\mathbf{R}_П$, которая является равнодействующей нормальной силы $\mathbf{N}_П$ и силы трения стружки о переднюю поверхность $\mathbf{F}_П$, т.е.

$$\vec{R}_П = \vec{N}_П + \vec{F}_П.$$

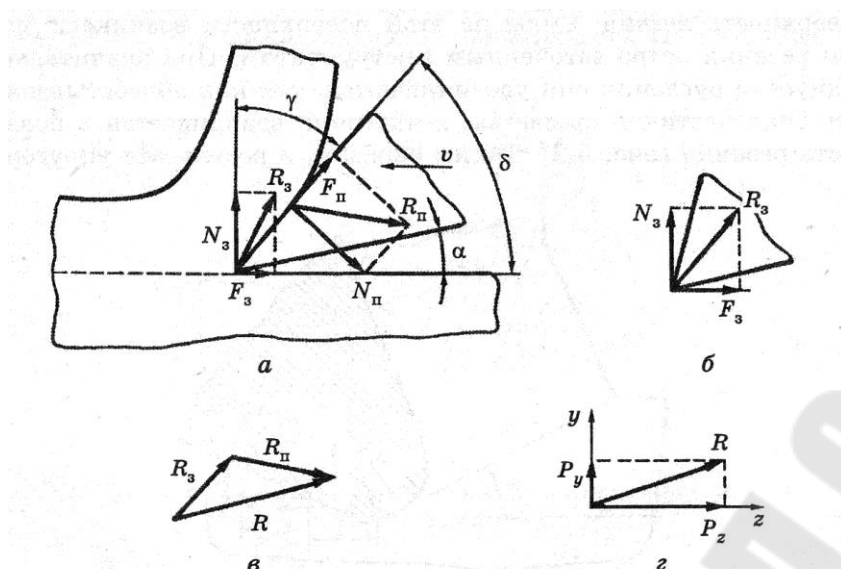


Рис. 2.4.1. Силы, действующие на переднюю и заднюю поверхности режущего инструмента

В то же время на заднюю поверхность резца вблизи режущей кромки действует нормальная сила упругого противодействия обрабатываемого материала N_3 и сила трения о заднюю поверхность инструмента F_3 . Они дают результирующую силу R_3 . Так как задний угол α мал, а при наличии площадки износа на некотором участке задней поверхности он равен нулю, в расчетной схеме принимаем направление сил F_3 и N_3 , как показано на рис. 2.4.1, б, т.е. направление F_3 противоположно вектору скорости резания v . Для осуществления процесса резания или сохранения равновесия резца к нему извне должна быть приложена сила, равная по величине и противоположная по направлению силе

$$\vec{R} = \vec{R}_n + \vec{R}_3$$

Разложим силу R , приложенную к резцу, на две составляющие: P_z в направлении главного движения резания (она является главной силой резания) и P_y в направлении, совпадающем с осью резца (радиальная сила). Спроецируем действующие силы на оси y и z (рис. 2.4.2, з):

$$P_z = N_n \cos \gamma + F_n \sin \gamma + F_3; \quad P_y = -N_n \sin \gamma + F_n \cos \gamma + N_3.$$

В условиях несвободного резания при точении равнодействующую силу сопротивления резанию F раскладывают на три составляющие (рис. 2.4.2): P_z — главную силу резания, которая действует в направлении скорости главного движения; P_y — радиальную силу, направленную по радиусу главного вращательного движения резания в вершине лезвия; P_x — осевую силу, действующую параллельно оси главного вращательного движения резания, т.е. силу подачи. По P_z производят расчеты прочности и жесткости резца, а также мощности, необходимой на осуществление резания. Однако правильнее было бы точные расчеты резца производить на деформацию косоугольного изгиба от действия силы

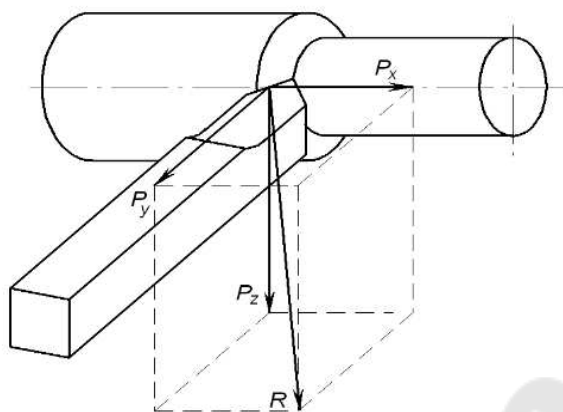


Рис.2.4. Разложение сил резания при точении на три составляющие (по осям координат X, Y, Z)

Равнодействующая R является диагональю параллелепипеда. Следовательно,

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

$$R = (1,1...1,2)P_z.$$

Угол α между силами R и P_z равен $25...40^\circ$.

Экспериментальными исследованиями установлено, что для всех составляющих сил резания P_z , P_y и P_x влияние глубины резания и подачи может быть выражено общей зависимостью

$$P = C_p t^{x_p} S^{y_p}.$$

С уменьшением отношения t/S степень влияния глубины резания на силу P_z уменьшается, а подачи — увеличивается.

Значения постоянных коэффициентов C_p и показателей степеней x_p и y_p зависят от свойств обрабатываемого металла, геометрических параметров режущей части резцов, условий смазывания, охлаждения зоны резания и т.д. В качестве примера приведем эмпирические формулы для определения составляющих сил резания при точении стали проходными твердосплавными резцами:

$$P_z = C_{pz} t^{0,75} S^{-0,15}; \quad P_y = C_{py} t^{0,9} S^{0,6} v^{-0,03}; \quad P_x = C_{px} t^{0,5} S^{0,5} v^{-0,4}.$$

При фасонном точении твердосплавными резцами $P_z = C_{pz} B S^{0,75}$; отрезными и прорезными — $P_z = C_{pz} B S$ (B — длина кромки резца, находящейся непосредственно в работе).

Влияние свойств обрабатываемого материала на силы резания было следующее, чем выше твердость и прочность обрабатываемого материала, тем больше силы резания. Приведем их соотношения. Если HB' соответствует P' , а HB'' — P'' , то

$$\frac{P'}{P''} = \left(\frac{HB'}{HB''} \right)^q; \quad P'' = P' \left(\frac{HB''}{HB'} \right)^q$$

По этим формулам можно определить любую силу резания при

обработке стали с HB'' , если известна сила резания P' для стали с HB' . Например, при обработке серого чугуна твердостью 190HB сила $P'_z = 925\text{Н}$. Требуется определить P'' при обработке чугуна твердостью 241HB. Тогда $P_z'' = 925(241/190)^{0,4} = 1018\text{ Н}$.

Что касается влияния на силы резания свойств материала инструмента, скорости резания, СОЖ, переднего и заднего углов, то выводы, сделанные для случая свободного резания, целиком применимы к точению различными резцами.

Рассмотрим влияние главного угла в плане φ на силу резания. По мере увеличения угла φ при обработке чугуна сила P_z уменьшается, а при обработке стали сначала уменьшается, а затем (при $\varphi = 50^\circ$). Такой характер зависимости $P_z = f(\varphi)$ объясняется тем, что увеличение угла φ приводит к уменьшению ширины b и увеличению толщины a среза, хотя при этом глубина резания и подача остаются неизменными.

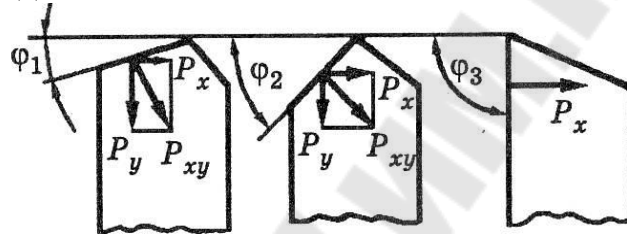


Рис. 2.4.3. Влияние главного угла в плане на составляющие силы резания P_x и P_y при $\varphi_1 < \varphi_2 < \varphi_3$

Влияние угла φ на силы P_y и P_x легко объясняется изменением соотношения сил, действующих в горизонтальной плоскости. Как видно из рис. 2.4.3, с увеличением угла φ сила P_x возрастает, а P_y уменьшается. При $\varphi = 90^\circ$ сила P_y незначительна.

Влияние вспомогательного угла в плане φ_1 и угла наклона главной режущей кромки λ на силы резания незначительно, поэтому оно практически не учитывается.

Увеличение радиуса вершины r_b , как и уменьшение главного угла в плане φ , изменяет условия резания, поскольку при неизменных t и S растёт ширина и уменьшается толщина среза. Кроме того, это приводит к увеличению деформации срезаемого металла и уменьшению вспомогательного переднего угла γ_1 .

Рассмотрев влияние различных факторов на силы резания, приведем обобщенные формулы для их расчета при точении:

$$P_z = C_{Pz} t^{x_{Pz}} S^{y_{Pz}} v^{z_{Pz}} K_{Pz};$$

$$P_y = C_{Py} t^{x_{Py}} S^{y_{Py}} v^{z_{Py}} K_{Py};$$

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

где C_P — постоянная, характеризующая определенные условия резания для конкретной марки обрабатываемого материала, принятого за

основу (эталон). Например, для точения твердосплавными резцами стали с $\sigma_B = 650$ МПа (180 НВ) $C_{Pz} = 2700$; для фасонных резцов из быстрорежущей стали $C_{Pz} = 1900$; для отрезных резцов $C_{Pz} = 2200$; для серого чугуна твердостью 190 НВ $C_{Pz} = 900$; $K_P = K_M K_{HB} K_\phi K_\gamma K_{сож} K_h$ — поправочные коэффициенты, характеризующие влияние: K_M — группы обрабатываемого материала (сталь углеродистая, легированная и т.д.); $K_{HB}(K\sigma_B)$ — твердости (прочности) обрабатываемого материала; K_ϕ — главного угла в плане ϕ ; $K_{сож}$ — смазочно-охлаждающей жидкости; K_h — износа резца и т.д.

Значения постоянных C_P , поправочных коэффициентов K и показателей степени x , y и z приводятся в специальных справочниках по режимам резания. Там же помещены таблицы, позволяющие определять силы резания при различных значениях глубины резания и подачи.

Измерение сил резания определяют путем непосредственного измерения с помощью специальных приборов, называемых *динамометрами*. Деформации упругих элементов динамометра непосредственно или с использованием связанных с ними явлений служат основой для измерения сил резания. Независимо от конструкции динамометры состоят из следующих основных частей: датчика, воспринимающего нагрузку; регистрирующего устройства; вспомогательных звеньев, связывающих их друг с другом.

Динамометры подразделяются на гидравлические, механические, электрические.

Гидравлические динамометры в настоящее время не находят применения по причине большой инерционности рычажно-поршневой системы, из-за чего показания отстают от быстропротекающих процессов и искажают картину изменения сил резания во времени и по величине, а также из-за малой чувствительности.

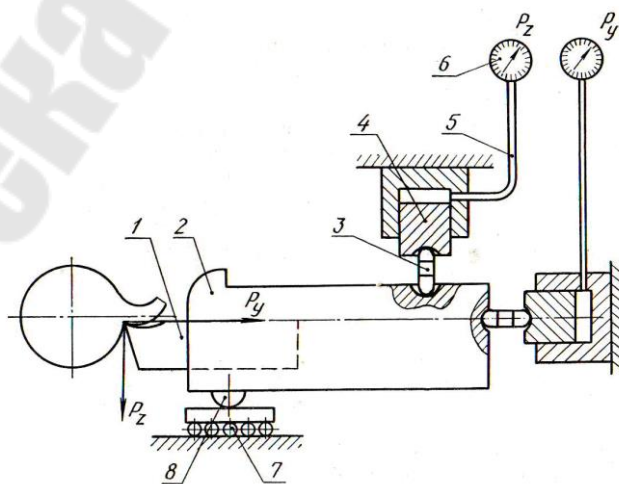


Рис. 2.4.4. Гидравлический двухкомпонентный динамометр.

Принцип работы механический динамометр (рис. 2.4.4) основан на том, что под действием сил резания на резец 9 резцедержатель 8 вследствие

деформации упругих стенок **1** корпуса **6** перемещается. Эти перемещения через сухари **2** и ножки **4, 7** фиксируются индикаторами **3** и **5**.

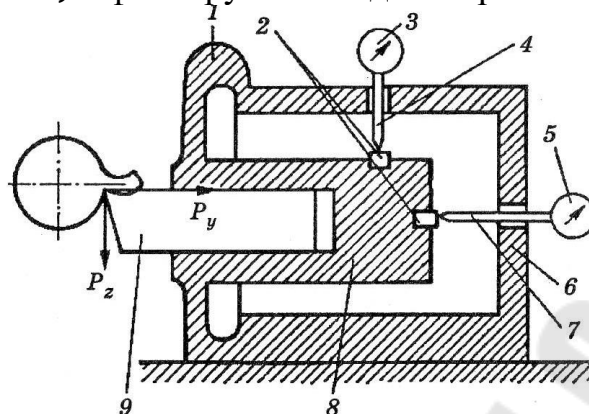


Рис. 2.4.5. Механический динамометр

Принцип работы механических динамометров (рис. 2.4.5) основан на том, что под действием сил резания на резец **9** резцедержатель **8** вследствие деформации упругих стенок **1** корпуса **6** перемещается. Эти перемещения через сухари **2** и ножки **7** фиксируются индикаторами **3** и **5**. Механические динамометры просты по конструкции, но имеют те же недостатки, что и гидравлические, и поэтому получили ограниченное распространение.

Электрические динамометры являются наиболее чувствительными приборами, так как они мало инерционны и позволяют с помощью осциллографа производить запись быстропротекающих процессов за тысячные и стотысячные доли секунды. Такие динамометры преобразуют механическое воздействие сил резания в легко измеряемые электрические величины.

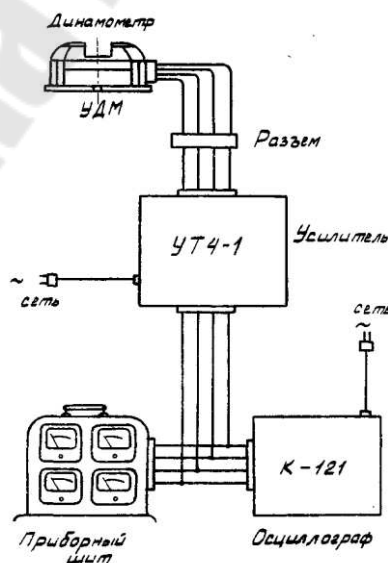


Рис. 2.4.6 Схема соединения приборов динамометрической установки

Электрические датчики подразделяются на емкостные, или конденсаторные, индуктивные, тензометрические, пьезоэлектрические и др.

В емкостных датчиках упругая пластина конденсатора перемещается под действием силы резания, изменяя воздушный зазор, а следовательно, и емкость конденсатора. Изменение емкости с помощью высокочастотного устройства приводит к колебанию силы тока, регистрируемой с помощью гальванометра или осциллографа.

Действие индуктивных датчиков основано на изменении индуктивности токонесущего контура, а следовательно, и силы тока в обмотке в зависимости от воздушного зазора между ферромагнитными телами. Изменение силы резания влияет на регистрируемый ток.

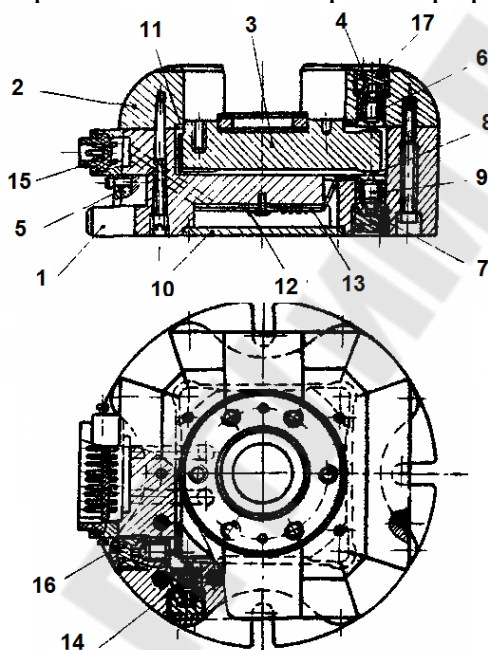


Рис. 2.4.7. Конструкция универсального трёхкомпонентного динамометра УДМ (автор Б.И.Мухин)

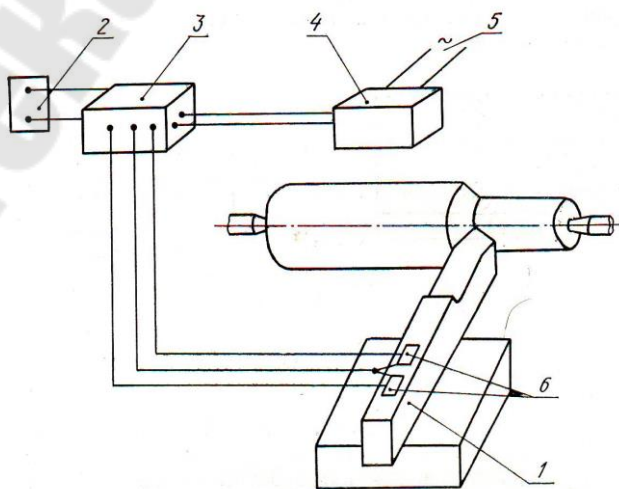


Рис. 2.4.8. Схема измерения сил резания с использованием тензодатчиков

Тензометрические датчики представляют собой несколько витков очень тонкой проволоки, изготавливаемой из специального сплава, которая изменяет электрическое сопротивление при деформации датчика. Витки или решетку из такой проволоки помещают между двумя полосками, склеенными из бумаги или диэлектрической фольги, и наклеивают на исследуемый объект, например державку резца. Под влиянием сил резания державка и приклеенная к ней проволока упруго деформируются. Это вызывает в электрической цепи изменение силы тока, которая увеличивается усилителем и измеряется регистрирующим прибором. Чтобы в показаниях приборов не было искажений при измерении сил резания из-за непостоянства напряжения в сети, в электрическую цепь между регистрирующим прибором и источником питания необходимо включать стабилизатор напряжения.

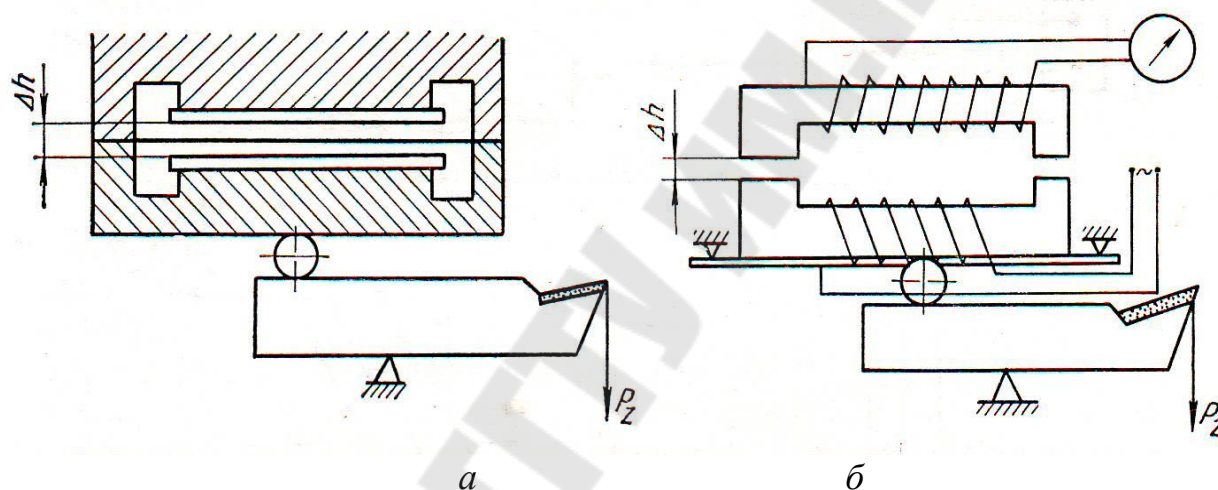


Рис. 2.4.9. Схемы емкостного датчика (а), и индуктивного датчика (б)

Принцип действия пьезоэлектрических датчиков основан на способности некоторых кристаллов, например кварца, генерировать электрический ток под действием механической нагрузки.

В зависимости от того, сколько составляющих сил резания можно измерить динамометром, они бывают одно-, двух- или трехкомпонентными. Динамометры укомплектованы усилителями и регистрирующими устройствами; в настоящее время для регистрации сигнала широко используются компьютеры.

Примеры некоторых современных динамометров приведены на рис. 2.4.10.

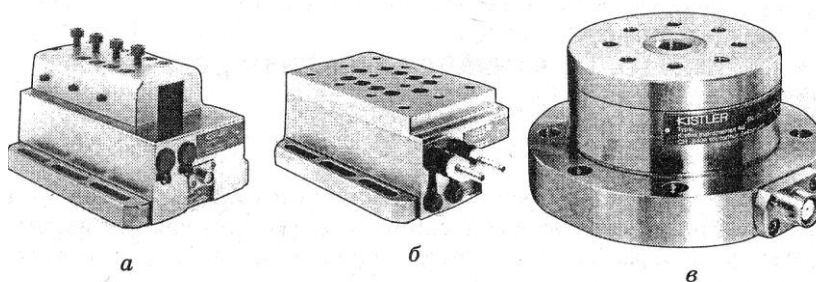


Рис. 2.4.10. Пьезоэлектрические многокомпонентные динамометры: *а*- токарный, *б* – фрезерный, шлифовальный, *в* – сверлильный.

Динамометры не позволяют определять непосредственно силы резания; их показания соответствуют деформациям, пропорциональным действующей силе. Поэтому перед работой динамометр необходимо протарировать. Тарирование заключается в том, что динамометр нагружают в направлении действия сил резания сначала возрастающими, а затем убывающими силами, которые известны. Показания динамометра, соответствующие определенным силам, регистрируются. На основании этих данных по средней линии нагрузки и разгрузки строят тарировочный график (рис. 2.4.11), которым в дальнейшем пользуются при расшифровке показаний динамометра. Данные тарировки могут быть занесены в память компьютера и непосредственно использоваться для расшифровки показаний динамометра.

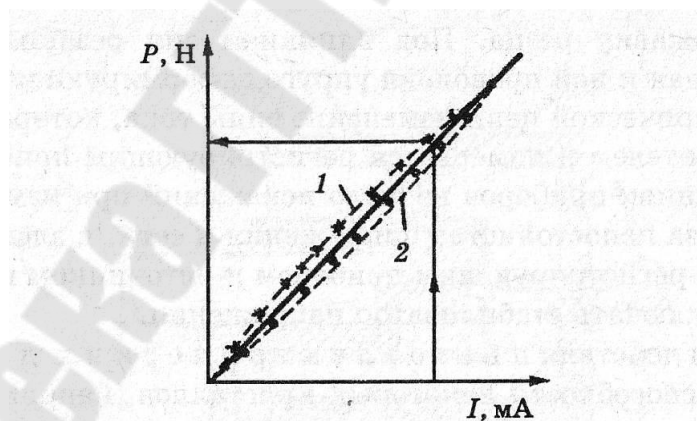


Рис. 2.4.11. Тарировочный график силы резания: 1 – нагружение; 2 – разгружение.

На силу резания в том или ином виде оказывают влияние целый ряд факторов: ширина и толщина срезаемого, свойства обрабатываемого материала, характеристики режущего инструмента, каждый из этих факторов влияют на силы резания по разному.

Толщина a и ширина b среза не в одинаковой степени влияют на силу резания. Сила резания возрастает пропорционально b , но отстает от увеличения a .

На рис. 2.4.12 показаны различные условия резания при одинаковой площади среза. Найденная закономерность $P_z = f(a, b)$ имеет вид

$$P_z = C_{Pz} b^{x_{Pz}} a^{y_{Pz}}.$$

При обработке различных материалов (стали, чугуна, бронзы) в среднем $x_{Pz} = 1,0$; $y_{Pz} = 0,75$; $C_{Pz} = 1500 \dots 2000$.

Отставание роста силы резания от увеличения толщины среза можно объяснить следующим: с увеличением толщины среза нагрузка на единицу длины режущего лезвия возрастает. В связи с этим увеличивается температура резания Θ , что приводит к снижению сопротивления обрабатываемого материала пластическому деформированию. Пластические деформации и напряжения распределяются по толщине стружки неравномерно. Они значительно больше в слоях, прилегающих к передней поверхности лезвия инструмента. Поэтому увеличение толщины среза приводит к относительному уменьшению слоя с максимальными деформациями. Кроме того, сила трения F_z , действующая по задней поверхности лезвия как одна из слагаемых силы резания, с изменением толщины среза остается неизменной или изменяется очень мало.

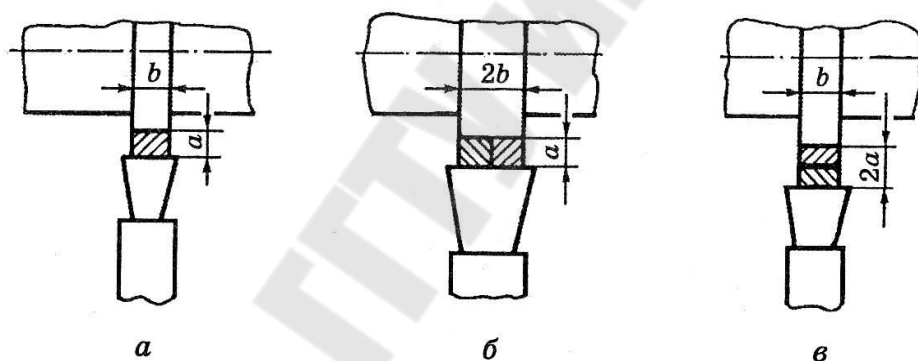


Рис. 2.4.12. Схемы для определения влияния параметров поперечного сечения среза на силу резания при исходном значении ширины и толщины среза (а), увеличенных значениях ширины (б) и толщины (в) среза

Таким образом, при сохранении площади поперечного сечения среза постоянной силы резания уменьшаются по мере уменьшения ширины и одновременно увеличения толщины среза.

Для весьма приблизительного определения силы резания P_z исходя из площади поперечного сечения среза иногда используют удельную силу резания k_c , т.е. силу, приходящуюся на 1 мм^2 поперечного сечения среза:

$$P_z = abk_c$$

где a, b — толщина и ширина срезаемого слоя.

Уровень удельной силы резания зависит от толщины среза:

$$k_c = Ca^{-m}$$

В данном уравнении C — постоянная, которую можно найти, приняв

$a = 1$ мм. Тогда

$$P_z = b a^{1-m} k_{cl.1},$$

где $k_{cl.1}$ — удельная сила резания при $b \times a = 1 \times 1$ мм².

Характер зависимости удельной силы резания от толщины среза различен для разных уровней последней (рис. 2.4.13). Исследования показали, что в широком диапазоне толщин среза можно выделить три диапазона, в которых наблюдается три различные закономерности изменения k_c (рис. 2.4.13): при $a < 0,01$ мм показатель степени $m = 0,15$; при $a < 0,1$ мм $m = 0,44$; при $a > 0,1$ мм $m = 0,764$.

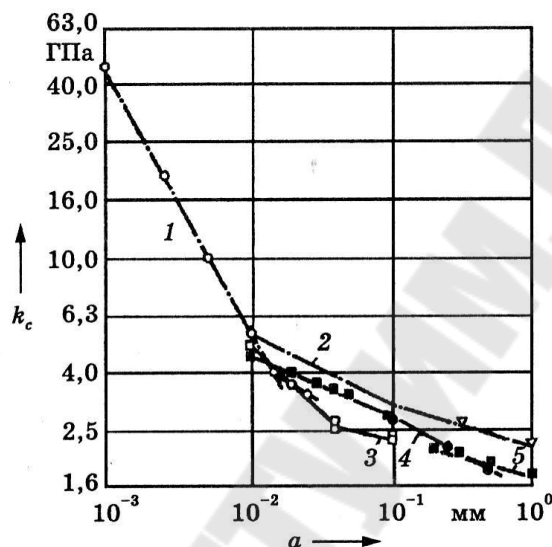


Рис. 2.4.13. Зависимость удельной силы резания от толщины среза при разных способах обработки: **1** — сталь Ск45 — быстрорежущая сталь S6-5-2, протягивание; **2** — сталь Ск45 — твердый сплав, точение; **3** — сталь С45V — быстрорежущая сталь S2-9-2-8, протягивание; **4** — сталь Ск45 — быстрорежущая сталь S12-1-4-5, протягивание; **5** — сталь С45 — быстрорежущая сталь, точении

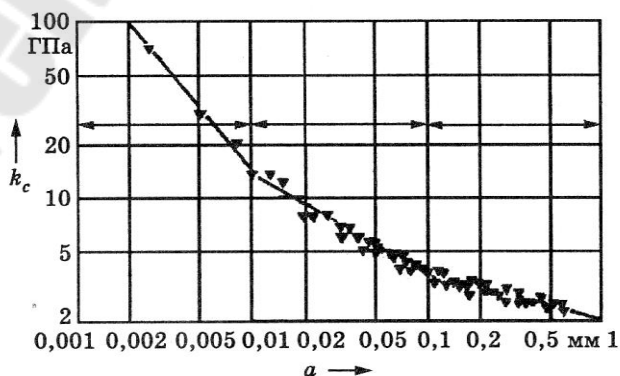


Рис. 2.4.14. Зависимость удельной силы резания от толщины среза при фрезеровании

В справочной литературе и каталогах зарубежных фирм обычно

приводятся значения $k_{с0,4}$ и $k_{с1,0}$, где числа обозначают толщину среза. Некоторые значения удельных сил приведены в таблице 2.4.1.

Зависимость сил резания от свойств обрабатываемого металла. При снятии стружки металл не только срезается, но и претерпевает сильную пластическую деформацию. Большое влияние на силы резания оказывают силы трения стружки и обрабатываемого материала соответственно о переднюю и заднюю поверхности лезвия инструмента. Однако необходимо учитывать, что в процессе обработки металл в зоне резания сильно разогревается.

Таблица 2.4.1 Удельные силы резания ряда обрабатываемых материалов, Мпа

Обрабатываемый материал	Толщина среза, мм	
	0,4	1,0
Углеродистые стали	2000...2180	1500...1700
Низколегированные стали: - в состоянии поставки - после улучшения	2100 2775	1700 2000...2300
Высоколегированные стали в состоянии поставки	2500	1950
Инструментальные стали после закалки	3750	3100
Стальное литье	1800...2500*	1400...1950*
Серый чугун	1100...1400	900...1100
Ковкий чугун	950...1100	800...900
Титановые сплавы	1530...1690	1300...1400
Алюминиевые сплавы	500...950**	400...700**
Латуни, оловянистые бронзы	700	550
Безоловянистые бронзы	1750	1350

*Возрастает с ростом содержания углерода.

**В зависимости от химического состава и микроструктуры.

Следовательно, его свойства могут отличаться от свойств, которые характерны для него при статических испытаниях. Поэтому нет точной и однозначной зависимости между силой P_z и временным сопротивлением обрабатываемого материала, а также его твердостью и другими механическими характеристиками. Установлено, что силы резания растут при увеличении σ_s , твердости, пластичности и вязкости обрабатываемого материала. На практике для сталей и чугунов при расчете силы P_z в зависимости от σ_s и HB используются следующие эмпирические формулы:

$$P_z = C_M \sigma_B^q; \quad P_z = C_M HB^q$$

где $q \approx 0,5$ (этот показатель степени для всех металлов всегда меньше единицы).

Влияние свойств *инструментального материала* на силу резания может быть вызвано только различием в силах трения (коэффициентах трения) между обрабатываемым и инструментальными материалами. Внутри групп быстрорежущих сталей и вольфрамокобальтовых твердых сплавов коэффициенты трения и укорочения стружки не различаются, а следовательно, сила P_z не изменяется.

При обработке инструментами, оснащенными вольфрамотитановыми твердыми сплавами, P_z уменьшается с увеличением содержания карбидов титана TiC. Для сравнения отметим, что если при обработке инструментом из быстрорежущей стали принять $P_z = 1$, для тех же условий работы инструмента, оснащенного твердыми сплавами группы ВК, $P_z = 1$, а группы ТК — $P_z = 0,90 \dots 0,95$.

В связи с изменением сил резания в широком диапазоне скоростей, то соответственно и изменение скорости влияет на силу резания, то есть изменение скорости резания влияет на силу резания. Определяли данную зависимость на примере опытов для условий свободного резания стали 40Х, которые проводились при изучении деформации стружки. Прежде всего необходимо отметить полную идентичность зависимостей $P_z = f(v)$ и $K_I = f(v)$. В тех областях скоростей резания, где уменьшается коэффициент укорочения стружки, снижается сила резания, и наоборот (рис. 2.4.15). Однако это не случайное совпадение, а закономерность. Возрастание значения K_I свидетельствует об уменьшении угла сдвига Φ и соответственно увеличении площади поверхности, по которой происходит сдвиг. При этом повышается степень деформации металла, т.е. происходит его упрочнение, а значит, возрастают напряжения, при которых происходит сдвиг. Увеличение напряжения и площади сдвига приведет к росту силы резания. Кроме того, сила резания и коэффициент укорочения зависят от коэффициента трения при деформировании срезаемого слоя.

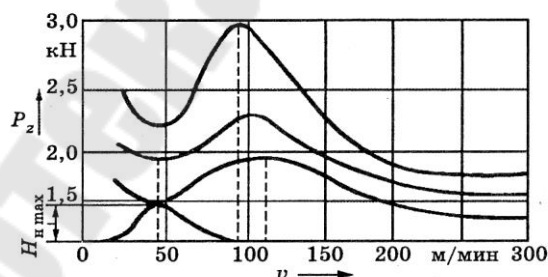


Рис. 2.4.15.- Зависимость сил резания от скорости резания и переднего угла при обработке стали 40Х с $a = 0,2$ мм, $b = 4$ мм

Сложный характер кривых $P_z = f(v)$ объясняется появлением нароста на передней поверхности лезвия инструмента. Минимальные значения силы на кривых $P_z = f(v)$ соответствуют максимально возможному наросту. При малой скорости резания, когда нарост не образуется, сила резания велика. В

диапазоне скоростей, при которых наблюдается максимальное наростообразование, сила резания и укорочение стружки уменьшаются, так как с увеличением размеров нароста возрастает действительный передний угол инструмента. По мере дальнейшего повышения скорости резания высота нароста, а следовательно, и действительный передний угол уменьшаются. Одновременно с этим возрастают коэффициент укорочения стружки и силы резания.

Как уже отмечалось, работа на очень высоких скоростях резания приводит к значительному повышению температуры резания, в результате чего уменьшается коэффициент трения, а следовательно, и P_z .

Минимумы и максимумы кривых $P_z = f(v)$ тем рельефнее, чем меньше передний угол. Объясняется это тем, что больший нарост может образоваться (и образование его интенсивнее) при меньших передних углах инструмента. При обработке чугуна образуется меньший нарост, поэтому зависимость $P_z = f(v)$ имеет вид плавной кривой (рис. 2.4.16). Аналогично выглядят зависимости $P_z = f(v)$ для материалов, не склонных к наростообразованию, — меди, жаропрочных и нержавеющей сталей и сплавов, титановых сплавов.

На силу резания оказывают так же и геометрические параметры режущего инструмента. При увеличении переднего угла γ облегчается врезание зубьев инструмента в деталь, улучшается сход стружки, уменьшается деформация обрабатываемого металла и снижается коэффициент укорочения стружки, а следовательно, уменьшается P_z .

Влияние заднего угла на силу резания устанавливают исходя из способности металла упруго восстанавливаться. С уменьшением угла α увеличивается контакт задней поверхности инструмента с обрабатываемой деталью, что приводит к росту сил трения и резания. Этому способствует то обстоятельство, что после прохождения режущего лезвия металл упруго восстанавливается, образуя дополнительную площадку контакта инструмент — деталь на длине l . Чем больше α , тем меньше длина контакта l , а следовательно, и P_z .

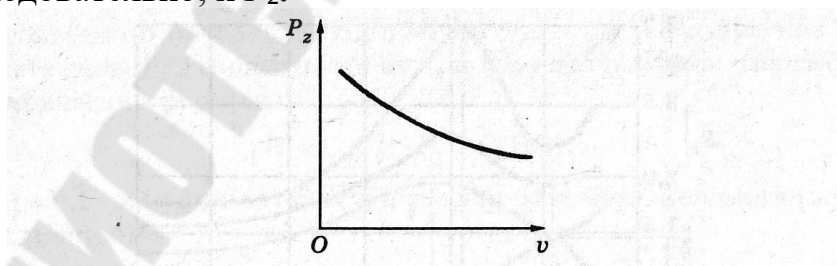


Рис. 2.4.16. Характер зависимости $P_z = f(v)$ при обработке чугуна.

Таким образом, интенсивность влияния заднего угла α на силы резания невелика. С увеличением α от 2 до 10° P_z уменьшается на 6 %, а P_y — на 17 %. При дальнейшем увеличении угла α силы резания остаются

почти постоянными.

Работа резания в общем случае определяется по формуле (в джоулях)

$$W = P_z L,$$

где P_z — сила резания, действующая в направлении скорости резания, Н; L — путь, проходимый режущим инструментом, м.

В общей работе резания на долю деформации, трения по передней и задней поверхностям приходится соответственно 55, 35 и 10 %. Если известен путь, пройденный инструментом за 1 мин, получим работу, выполненную за это время:

$$W = P_z L = P_c v_c + F_n v_n + F_3 v_3$$

где v — скорость резания, м/мин; P_c — сила сдвига, или сила в плоскости сдвига, Н; v_c — скорость сдвига, м/мин; F_n — сила трения по передней поверхности лезвия инструмента, Н; v_n — скорость движения стружки по передней поверхности лезвия, м/мин: $v_n = v/K_f$; F_3 — сила трения по задней поверхности лезвия инструмента, Н; v_3 — скорость движения обработанной поверхности относительно задней поверхности лезвия инструмента, м/мин: $v_3 = v$.

Зная силы резания, можно также определить мощность (в киловаттах), необходимую для резания. Ее называют *эффективной*, так как она не включает затраты мощности на преодоление сил трения в механизмах станка.

При точении

$$N_p = N_z = N_y = N_x \quad \text{или} \\ N_p = \frac{P_z v_z}{60 \cdot 10^3} + \frac{P_y v_y}{60 \cdot 10^3} + \frac{P_x v_x}{60 \cdot 10^3}$$

где P_z, P_y, P_x — силы резания, Н; v_z — скорость резания, м/мин: $v_z = v$, $v_y = 0$ — скорость перемещения резца в радиальном направлении, м/мин; v_x — скорость подачи, м/мин.

Так как v_x очень мала по сравнению со скоростью резания, третьим слагаемым при подсчете N_p можно пренебречь. Например, при точении с $v = 30$ м/мин, $S = 0,3$ мм/об и $n = 800$ об/мин $v_x = 0,24$ м/мин. Тогда $N_p = N_z v / (60 \cdot 10^3)$.

Определив эффективную мощность N_p , можно найти потребную мощность электродвигателя станка:

$$N_{\text{дв}} = \frac{P_z v}{60 \cdot 10^3 \eta_{\text{ст}} K_{\text{п}}}$$

где $\eta_{\text{ст}}$ — КПД станка; $K_{\text{п}}$ — коэффициент допустимой кратковременной перегрузки. В большинстве случаев $K_{\text{п}} = 1,3 \dots 1,5$, а иногда $K_{\text{п}} = 2$.

При сверлении, зная крутящий момент и осевую силу, можно определить мощность, потребную на процесс сверления:

$$N_p = N_{кр} + N_s = \frac{v_{кр} n}{9750} + \frac{P_o S n}{60 \cdot 10^6},$$

где $N_{кр}$, N_s , — мощность, потребная соответственно на вращение сверла и подачу.

Так как $N_s = (0,5...1,5) \%$ от $N_{кр}$, можно записать: $N_p = M_{кр} n / 9750$.

С учетом КПД станка $\eta_{ст}$ и коэффициента допустимой перегрузки, равного примерно 1,3, окончательно $N_p / (1,3 \eta_{ст})$.

При фрезеровании, зная значения P_z и v , можно рассчитать мощность, затрачиваемую на фрезерование:

$$N_p = P v = C_N t^{x_p} z_p S_z^{y_p} B z n D^{q_N}.$$

Мощность, затрачиваемая на подачу, составляет не более 15 % от мощности резания. Поэтому полная расчетная мощность

$$N_{дв} = 1,15 N_p / (\eta_{ст} K_{п}),$$

Где $\eta_{ст}$ — КПД станка; $K_{п}$ — коэффициент допустимой кратковременной перегрузки: $K_{п} = 1,3... 1,5$.

Для цилиндрических, концевых, дисковых, прорезных фрез из быстрорежущей стали при обработке конструкционной стали 215 НВ

$$N_p = 3,5 \cdot 10^{-5} t^{0,86} S_z^{0,72} B z n D^{0,14}.$$

Для торцовых твердосплавных фрез при фрезеровании серого чугуна твердостью 190 НВ

$$N_p = 2,8 \cdot 10^{-5} t^{0,9} S_z^{0,74} B z n D^{0,17}$$

Одним из показателей рационального осуществления обработки является также *удельная работа резания a_p* (отношение работы резания W к объему снятого металла). Удельная работа резания зависит от режимов резания и геометрии инструмента: чем больше скорость резания, толщина среза и передний угол, тем меньше a_p .

В зависимости от способа обработки удельная работа резания колеблется в широких пределах (табл. 2.4.2).

Таблица 2.4.2. Основные технические показатели различных видов обработки

Способ обработки	Площадь сечения срезаемого слоя, мм ²	Удельная работа резания, кДж/см ³	Скорость резания, м/с	Производительность, см ³ /с
Точение	1,0	0,05...0,7	1,5...7,5	0,05...50
Протягивание	0,5	2,5...3,7	0,01...10,	0,004...0,1
Фрезерование	0,3	5,0...7,5	2...6	0,002...1,0
Развертывание	0,1	12...30	0,15...1,6	0,005...0,5
Шлифование	0,00005	55...70	25...50	0,005...0,02

Тема 2.5. Тепловые явления при резании материалов.

В процессе механической обработки возникают тепловые источники как результат перехода в теплоту энергии деформации обрабатываемого материала и работы трения на контактных поверхностях инструмента.

Широкая номенклатура технологических операций и разнообразие условий механической обработки приводят к многообразию форм и других характеристик источников и стоков теплоты, возникающих в реальных процессах. Однако все источники и стоки могут быть расклассифицированы по некоторым основным признакам, что позволяет систематизировать и в некоторой мере унифицировать решение задач технологической теплофизики.

К основным признакам, по которым классифицируются источники (стоки) теплоты, относятся: 1) расположение по отношению к телам, участвующим в процессе обработки; 2) форма; 4) закон распределения интенсивности; 4) скорость перемещения; 5) время функционирования; 6) стабильность основных характеристик источника во времени.

По расположению источники теплоты можно разделить на внешние, действующие на поверхностях тел и внутренние, функционирующие в их массе. Источники, возникающие в зоне обработки, и принципе являются внутренними, так как и энергия деформации, и энергия трения выделяются в некоторых объемах.

В реальных технологических условиях источники и стоки теплоты возникают в объемах и областях, форму и размеры которых не всегда можно точно обрисовать. При теплофизическом анализе реальные источники заменяют идеализированными, форма которых в той или иной степени приближена к фактической форме. Такие идеализированные источники могут быть трехмерными, двухмерными, одномерными и точечными.

В технологических системах, как правило, встречаются одновременно все три вида теплообмена, однако в конкретных условиях каждый из них может играть большую или меньшую роль. В частности, при обработке резанием наибольшее значение имеет теплопроводность. В твердых телах энергию частиц вещества характеризует такой параметр, как температура. Следовательно, процесс распространения теплоты и его направление неразрывно связаны с распределением температуры.

В общем случае температура неодинакова в различных точках тела и зависит от времени, т. е. является функцией координат и времени: $\theta = f(x, y, z, \tau)$.

Совокупность температур в данный момент времени для всех точек пространства называется *температурным полем*. Если при этом температура зависит от длительности нагрева или охлаждения, поле называется *неустановившимся* или *нестационарным*. Если же температура

не изменяется, поле называется *установившимся или стационарным*. Если температура зависит от всех трех координат, поле является трехмерным, от двух — двумерным, от одной — одномерным.

Технологическая система может функционировать только при подводе к ней энергии. В процессе выполнения операций энергия полностью или частично преобразуется из одного вида в другой, например механическая — в тепловую. При этом источники тепловой энергии по отношению к тому или иному компоненту системы или подсистемы могут быть внешними или внутренними. Чтобы управлять тепловыми процессами необходимо знать, каким образом и по каким закономерностям происходит теплообмен в ячейках технологической системы.

Различают три способа теплообмена: теплопроводность, конвекция и тепловое излучение.

Теплопроводностью называется перенос теплоты (или внутренней энергии) при непосредственном соприкосновении тел или частей одного тела с различной температурой. Для анализа теплофизики технологических систем существенную роль играет теплопроводность в твердых телах — заготовке, режущем инструменте, деталях оборудования.

Явление *конвекции* наблюдается в движущихся жидкостях или газах. Перенос теплоты при этом происходит за счет перемещения вещества в пространстве, тогда как в процессе теплопроводности это не обязательно. Конвекция всегда сопровождается теплопроводностью, так как при движении жидкости или газа имеет место соприкосновение частиц с различными температурами. Совместный процесс конвекции и теплопроводности называется *конвективным теплообменом*.

Тепловым излучением называется явление переноса теплоты в виде электромагнитных волн с взаимным превращением тепловой энергии в лучистую и обратно.

Градиент температуры. Закон Фурье. Соединив все точки поля, имеющие одинаковые температуры, получим так называемую *изотермическую поверхность*. Любая кривая, проведенная на данной поверхности, является *изотермой*. Изотермические поверхности либо замыкаются сами на себя, либо обрываются на границах тела. Они не могут пересекаться, так как это означало бы, что в одной точке возникают две разные температуры. Изменение температуры наблюдается при переходе с одной изотермической поверхности на другую. Скорость изменения температуры с расстоянием вдоль какого-либо направления l характеризуется отношением $\Delta\theta/\Delta l$, а вдоль направления m отношением $\Delta\theta/\Delta m$. Максимальная скорость изменения температуры соответствует направлению нормали n (рис. 2.5.1), так как расстояние между изотермами будет кратчайшим:

$$\Delta\theta/\Delta n > \Delta\theta/\Delta m > \Delta\theta/\Delta l.$$

Предел отношения приращения температуры $\Delta\theta$ к расстоянию между изотермами по нормали Δn называется *градиентом температуры*:

$$\mathbf{grad}\theta = \lim_{\Delta n \rightarrow 0} (\Delta\theta / \Delta n) = d\theta / dn.$$

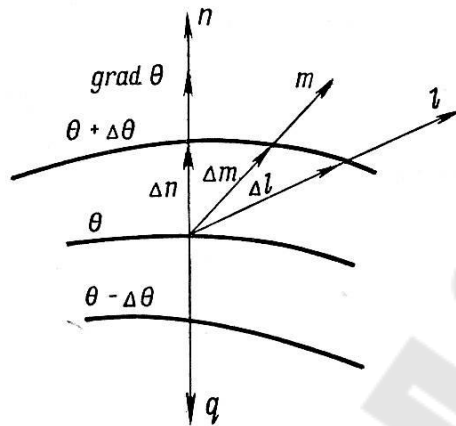


Рис. 2.5.1. К определению градиента температур

Градиент температуры ($^{\circ}\text{C}/\text{м}$) характеризует интенсивность изменения температуры внутри тела и является векторной величиной, направленной по нормали в сторону возрастания температур.

Распределение температур в теле и, следовательно, температурный градиент определяет величину и направление теплового потока. Количество теплоты, проходящей через единицу площади в единицу времени (плотность теплового потока), определяется соотношением

$$\mathbf{q} = -\lambda \mathbf{grad}\theta, \quad (1)$$

где λ — коэффициент теплопроводности.

Данное уравнение выражает основной закон распределения теплоты внутри тела — закон Фурье.

Плотность теплового потока q ($\text{Вт}/\text{м}^2$) — вектор, который направлен в сторону, противоположную градиенту температуры, о чем свидетельствует знак минус в выражении (1).

Количество теплоты, проходящей в единицу времени через единицу площади при градиенте температуры в один градус на единицу длины, называется *коэффициентом теплопроводности* λ . Под длиной здесь понимается линейный размер тела в направлении теплового потока. Коэффициент теплопроводности является физическим параметром, который характеризует способность вещества проводить теплоту и численно равен плотности теплового потока при градиенте температуры, равном единице. Коэффициент $\lambda = q / \mathbf{grad}\theta$.

Коэффициент теплопроводности зависит, прежде всего, от состава вещества, а также структуры, плотности, влажности и температуры материала. Он изменяется в значительных пределах, составляя, например, для воздуха 0,0244, воды 0,55, а для меди 392 $\text{Вт}/\text{м}^{\circ}\text{C}$. В чистом виде

теплопроводность наблюдается в твердых телах, лишенных пор. В пористых материалах, жидкостях и газах имеет место также конвекция и тепловое излучение.

Стационарный теплообмен. Ранее уже отмечалось, что теплообмен бывает стационарным и нестационарным. В качестве примера стационарного теплообмена рассмотрим теплопроводность плоской стенки из однородного материала. Длина и ширина стенки значительно больше ее толщины δ , а температуры θ_1 и θ_2 поддерживаются постоянными (рис. 2.5.2). При этих условиях температурное поле стенки будет одномерным, т. е. температура будет изменяться только вдоль оси x , а изотермические поверхности будут представлять собой плоскости, параллельные поверхностям стенки.

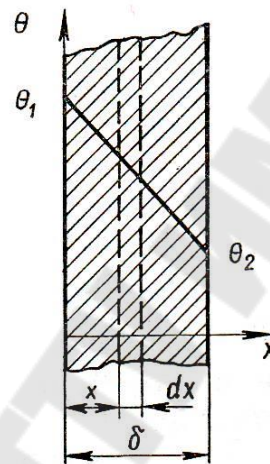


Рис. 2.5.2. К расчету теплопроводности плоской стены

На некотором расстоянии x от поверхности стенки двумя изотермическими поверхностями выделим слой толщиной dx . Для данного слоя с учетом уравнения (1) тепловой поток $q = -\lambda(d\theta/dx)$. Тогда $d\theta = -(q/\lambda)dx$, а после интегрирования

$$\theta = -(q/\lambda)\delta + \theta_1. \quad (2)$$

Полученное уравнение является уравнением прямой линии. Следовательно, температура внутри плоской однородной стенки при постоянном коэффициенте теплопроводности изменяется по прямолинейному закону.

Чтобы исключить постоянную величину интегрирования C , воспользуемся граничными условиями (граничные условия первого — четвертого рода описывают условия теплообмена на границах тела): при $x=0$ $\theta=C=\theta_1$; при $x=\delta$ $\theta=\theta_2$.

После подстановки этих значений в уравнение (2)

$$\theta_2 = -(q/\lambda)\delta + \theta_1.$$

Из этого равенства определяем плотность теплового потока

$$q = (\lambda / \delta)(\theta_1 - \theta_2) = (\lambda / \delta)\Delta\theta.$$

Это выражение является основным уравнением для расчета теплопроводности плоской однородной стенки. Из него следует, что тепловой поток прямо пропорционален коэффициенту теплопроводности и разности температур наружных поверхностей стенки и обратно пропорционален толщине стенки.

Значение λ/δ называется *тепловой проводимостью*, а δ/λ — *тепловым* или *термическим сопротивлением* стенки. С учетом сказанного можно получить зависимость $q = (\Delta\theta\lambda)/\delta$, согласно которой плотность теплового потока прямо пропорциональна разности температур и обратно пропорциональна термическому сопротивлению.

Количество теплоты, проходящей через плоскую стенку

$$Q = qA\tau = (\lambda/\delta)\Delta\theta A\tau,$$

где A — площадь стенки; τ — время.

При нестационарном режиме перераспределение теплоты сопровождается изменением температуры отдельных элементов тела. Изменение температурного поля твердого тела при нестационарной теплопроводности описывается *дифференциальным уравнением теплопроводности*.

Для вывода этого уравнения выделим в теле элементарный параллелепипед со сторонами dx, dy и dz (рис. 2.5.3). В общем случае градиент температуры и тепловой поток для различных направлений неодинаковы. Разложим изменение теплового потока dQ по направлениям x, y, z . На участке dx изменение потока равно $(\partial q_x / \partial x)dx$, на участке dy — $(\partial q_y / \partial y)dy$ и на участке dz — $(\partial q_z / \partial z)dz$.

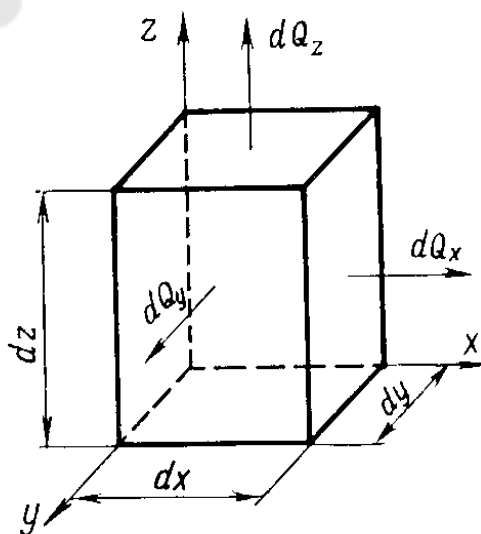


Рис. 2.5.3. К выводу дифференциального уравнения теплопроводности

Выразив плотности тепловых потоков q_x, q_y и q_z с помощью уравнения (1) и умножив их на соответствующие площади граней и время $d\tau$, получим изменения количества теплоты, проходящей в направлениях x, y, z :

$$dQ_x = (\partial q_x / \partial x) dx dy dz d\tau = -\lambda (\partial^2 \theta / \partial x^2) dV d\tau;$$

$$dQ_y = (\partial q_y / \partial y) dx dy dz d\tau = -\lambda (\partial^2 \theta / \partial y^2) dV d\tau;$$

$$dQ_z = (\partial q_z / \partial z) dx dy dz d\tau = -\lambda (\partial^2 \theta / \partial z^2) dV d\tau;$$

где dV — объем элементарного параллелепипеда: $dV = dx dy dz$.

Изменение теплового потока за время dx для элементарного параллелепипеда

$$dQ = dQ_x + dQ_y + dQ_z = -\lambda (\partial^2 \theta / \partial x^2 + \partial^2 \theta / \partial y^2 + \partial^2 \theta / \partial z^2) dV d\tau \quad (3)$$

Согласно закону сохранения и превращения энергии, изменение теплового потока при прохождении его через параллелепипед происходит за счет внутренней энергии этого элемента, т. е. справедливо равенство $dQ = dU$. При возрастании теплового потока внутренняя энергия элемента уменьшается. В соответствии с этим количество теплоты dQ можно определить также через теплоемкость:

$$dQ = -\rho c dV (\partial \theta / \partial \tau) d\tau; \quad (4)$$

где ρ — плотность материала; c — массовая теплоемкость; ρc — объемная теплоемкость; $\partial \theta / \partial \tau$ — скорость изменения температуры тела во времени.

Знак минус показывает, что при увеличении теплового потока внутренняя энергия тела уменьшается.

Приравняв выражения (3) и (4), получим

$$\partial \theta / \partial \tau = \omega (\partial^2 \theta / \partial x^2 + \partial^2 \theta / \partial y^2 + \partial^2 \theta / \partial z^2), \quad (5)$$

где ω — коэффициент температуропроводности: $\omega = \lambda / \rho c$.

Коэффициент температуропроводности (m^2/s) является физической константой вещества и характеризует реакцию тела на перераспределение теплоты, т. е. его теплоинерционные свойства.

Выражение (5) называется *дифференциальным уравнением теплопроводности Фурье* и является основным уравнением распространения теплоты в твердом теле.

Ранее отмечалось, что конвекция как разновидность теплообмена характерна для жидких и газовых сред, частицы которых могут легко перемещаться. Конвекция достаточно часто встречается в технологических станочных системах при контакте поверхности твердого тела с жидкостью или газом. Это происходит, например, при использовании смазочно-охлаждающих веществ, в гидро- и пневмосистемах станков и т. д.

Интенсивность конвективного теплообмена между твердым телом и жидкой (газообразной) средой характеризуется *коэффициентом теплоотдачи* α , который определяется по формуле Ньютона: $Q = \alpha(\theta - \theta_c)A$.

Согласно этому закону тепловой поток Q пропорционален поверхности теплообмена A и разности температур твердого тела θ и среды θ_c .

Коэффициент теплоотдачи ($\text{Вт}/\text{м}^2\cdot\text{с}$) можно определить как количество теплоты, отдаваемое в единицу времени единицей поверхности при разности температур между поверхностью и жидкостью, равной одному градусу:

$$\alpha = Q/[A(\theta - \theta_c)].$$

В общем случае коэффициент теплоотдачи может изменяться вдоль поверхности теплообмена, и поэтому различают *средний* (по поверхности) *коэффициент теплоотдачи* и *местный* (локальный) *коэффициент теплоотдачи*, соответствующий единичному элементу поверхности.

Процессы теплоотдачи тесно связаны с условиями движения среды — ламинарным или турбулентным режимами, а также ее кинематической вязкостью, скоростью движения, теплофизическими свойствами и др. В связи с этим аналитическое описание конвективного теплообмена чрезвычайно затруднено, и определение коэффициента теплоотдачи производится главным образом экспериментальным путем.

Тепловое излучение является результатом сложных внутриатомных процессов. Излучение свойственно твердым и жидким телам, а также трех- и многоатомным газам. Носителем лучистой энергии является поток квантов, или фотонов, который обладает свойствами электромагнитных волн. Он может распространяться в газообразной среде, в вакууме и в некоторых твердых телах.

Энергия, излучаемая телом в пространство, при попадании на другие тела в общем случае частично поглощается, частично отражается, а часть ее проходит сквозь тела. Лучистая энергия, поглощаемая телом, преобразуется в теплоту. Энергия, отраженная от окружающих тел, и собственное их излучение при попадании на любое тело также частично им поглощаются.

Количество теплоты, излучаемой единицей поверхности тела в единицу времени ($\text{Вт}/\text{м}^2$), определяется законом Стефана—Больцмана:

$$E = \varepsilon C_0 (\theta/100)^4,$$

где C_0 — коэффициент лучеиспускания абсолютно черного тела, равный $5,7 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K}^4)$; θ — абсолютная температура поверхности тела, K ; ε — степень черноты тела; для стальных и чугунных деталей она равна 0,4... 0,7, а для алюминиевых — 0,06...0,2.

Все тела непрерывно излучают энергию и одновременно поглощают излучение других тел при условии, что лучи попадают на их поверхность. Поэтому при наличии вблизи исследуемого тела других тел следует

учитывать также излучаемую ими энергию. Таким образом, количество теплоты, отдаваемой телом в результате лучистого теплообмена, равно разности между количеством излучаемой и поглощаемой энергии.

В процессе резания важную роль играют тепловые явления. Именно они определяют температуру в зоне резания, которая оказывает прямое воздействие на характер образования стружки, нарост, усадку стружки, силы резания и микроструктуру поверхностного слоя. Еще более существенно воздействует температура резания Θ на интенсивность затупления инструмента и период его стойкости.

Выделение теплоты при снятии стружки объясняется тем, что в теплоту преобразуется механическая работа, затраченная на срезание стружки:

Выделение теплоты при снятии стружки объясняется тем, что в теплоту преобразуется механическая работа, затраченная на срезание стружки:

$$W = W_{\text{Деф}} + W_{\text{Т.П.П.}} + W_{\text{Т.З.П.}},$$

где $W_{\text{Деф}}$, $W_{\text{Т.П.П.}}$, $W_{\text{Т.З.П.}}$ - работа, затрачиваемая соответственно на упругую и пластическую деформации срезаемого слоя, на преодоление сил трения по передней и задней поверхностям.

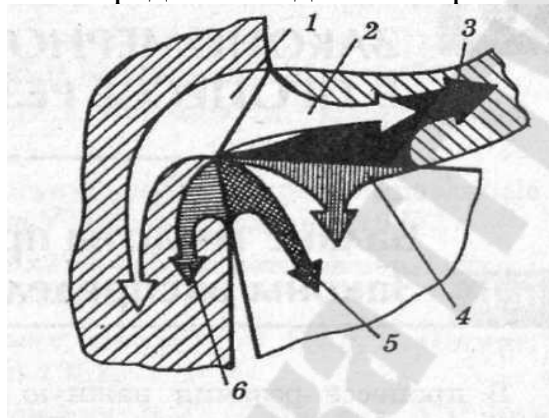


Рис. 2.5.4. Схемы движения тепловых потоков: **1** – доля теплоты деформации $Q_{\text{Деф}}$, уходящая в деталь; **2** – доля теплоты деформации $Q_{\text{Деф.с}}$, уходящая в стружку **3** – количество теплоты $Q_{\text{т.п.}}$, возникающая в результате трения между стружкой и передней поверхностью; **4** – итоговый поток теплоты $Q_{\text{п.}}$, возникающей в результате теплообмена на площадке контакта надрезцовой стороны стружки с передней поверхностью инструмента; **5** – итоговый поток теплоты $Q_{\text{з.}}$, возникающий в результате теплообмена на площадке контакта поверхности резания с задней поверхностью инструмента; **6** – количество теплоты $Q_{\text{т.з.}}$, возникающей в результате трения между деталью и задней поверхностью инструмента

Практически в теплоту переходит вся работа резания (более 99,5 %). Пути распространения тепловых потоков без учета искусственного охлаждения инструмента и детали приведены на рис. 2.5.4. Как видно, при

резании наблюдается итоговое распределение тепловых потоков, проходящих через контактные площадки.

Эксперименты показывают, что при резании с небольшой скоростью (до 30...40 м/мин) относительное количество теплоты составляет: Q_c — 60...70 %, $Q_{и}$ — 3 %, Q_d — 30...40 %, $Q_{o.c.}$ — 1...2 %. Установлено, что чем ниже теплопроводность обрабатываемого материала, тем большее количество теплоты уходит в инструмент. По мере увеличения скорости резания значительно возрастает относительное количество теплоты, уходящей в стружку. Из опытов известно, что при скорости $v = 400...500$ м/мин теплота распределяется так: $Q_c = 97...98$ %, а $Q_{и} \approx 3$ %.

Использование технологических сред позволяет значительно повысить $Q_{o.c.}$ в общем тепловом балансе. В зависимости от условий подвода среды уменьшаются $Q_{и}$, Q_c и Q_d .

Зная количество теплоты, выделяемой в процессе резания и распространяемой между стружкой, обрабатываемой деталью, инструментом и средой, можно записать уравнение баланса тепловой и механической энергии при резании.

$$W_{\text{деф}} + W_{\text{т.п.п}} + W_{\text{т.з.п}} = Q_c + Q_{и} + Q_d + Q_{o.c.},$$

где Q_c , $Q_{и}$, Q_d , $Q_{o.c.}$ - количество теплоты, переходящее соответственно в стружку, инструмент, деталь и окружающую среду.

Температура в зоне резания может оказывать влияние на процесс резания из-за изменения свойств материала инструмента, обрабатываемого материала и условий взаимодействия инструмента и обрабатываемого материала на контактных площадках.

При оценке влияния температуры на свойства обрабатываемого материала необходимо учитывать два фактора — продолжительность воздействия высокой температуры и скорость деформации.

Действие высокой температуры в течение тысячных и даже сотых долей секунды совершенно недостаточно для протекания в толще срезаемого металла структурных превращений и изменения механических свойств обрабатываемой детали. Поэтому воздействие высокой температуры в зоне резания на обрабатываемый металл ограничивается его тончайшими слоями, соприкасающимися с рабочими поверхностями инструмента, и проявляется в изменении условий трения, контактных нагрузок, напряжений, характера изнашивания и т.д.

Исследование тепловых потоков проводят различными методами, это метод источников теплоты, метод конечных разностей, метод граничных элементов, ряд экспериментальных методов и др.

Для аналитических расчетов тепловых потоков и температур можно эффективно использовать метод источников теплоты. В этом случае на первом этапе определяется мощность источников теплоты. Энергия,

выделяемая источником теплоты трения на надрезцовой стороне стружки, пропорциональна силе трения и скорости

$$Q_{т.л} = F_{тl} v_c = F_{тl} v / K_l,$$

где $F_{тl}$ — сила трения на передней поверхности резца: $F_{тl} = (P_z - F_3) \sin \gamma + (P_N - N_3) \cos \gamma$; P_z, P_N — соответственно главная и нормальная силы резания; F_3, N_3 — сила трения и нормальная сила, действующие на площадке контакта задней поверхности инструмента с деталью; γ — передний угол; v_c — скорость скольжения стружки по передней поверхности; v — скорость резания; K_l — коэффициент укорочения стружки.

Метод источников теплоты характеризуется сложностью и трудоемкостью расчетных операций, их в значительной степени эмпирическим характером, а также требованием обязательной стационарности процесса. Введение в расчет фактора времени и попытка учета нелинейности теплофизических свойств обрабатываемого и инструментального материалов в зависимости от температуры делает использование данного метода практически невозможным. В этом случае можно применять численные методы исследования. Среди них — *метод конечных разностей*, основанный на замене истинных значений производных, входящих в дифференциальное уравнение теплопроводности и аналогичные ему, приближенными значениями в определенных точках — узлах. Эти узлы являются центрами элементов конечной длины, участвующих в теплообмене, на которые разбивается твердое тело. Пример формирования конечно-разностной сетки и результаты расчетов приведены на рис. 2.5.5.

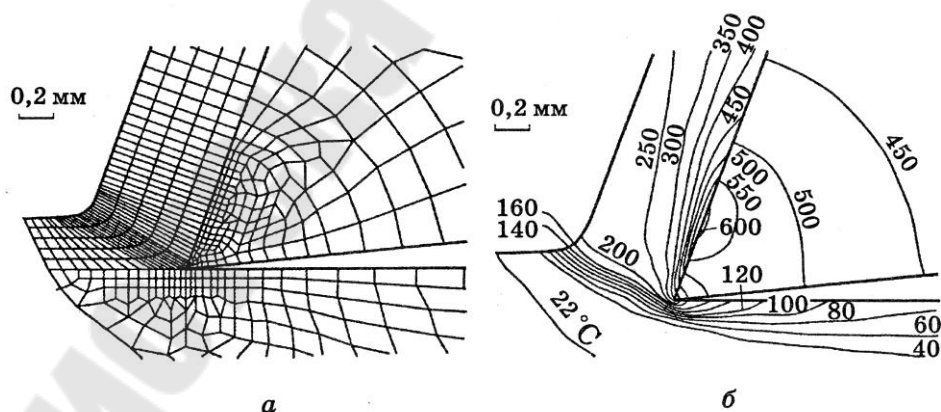


Рис. 2.5.5. Сетка для расчета поля температур в зоне резания методом конечных разностей (а) и результаты расчета (б) для свободного точения стали твердосплавным резцом ($a = 0,27$ мм, $v = 78$ м/мин)

Метод граничных элементов по своей сути подобен методу источников. В нем использован принцип суперпозиции сингулярных

решений, поэтому область применения ограничена классом задач, полностью линейных или линейных относительно приращений. *Метод конечных элементов* (рис. 2.5.6) позволяет осуществлять различную детализацию решения в разных областях изучаемого объекта, причем могут быть использованы объемы, различающиеся по размерам, конфигурации и теплофизическим свойствам.

Задача определения температурных полей в зоне резания характеризуется, во-первых, геометрической нелинейностью границ определения функции, во-вторых, физической нелинейностью — зависимостью теплофизических свойств материалов от температуры; в третьих — соединением материалов с различными характеристиками. Кроме того, можно предусмотреть нестационарный характер теплообмена и нелинейность граничных условий. Единственный метод, который может это обеспечить, — метод конечных элементов. Пример использования данного метода для расчета тепловых полей в зоне резания приведен на рис. 2.5.6.

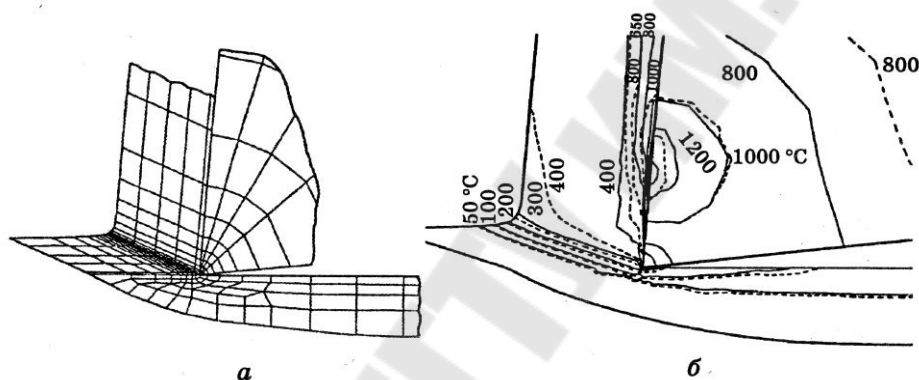


Рис. 2.5.6. Сетка для расчета поля температур в зоне резания методом конечных элементов (а) и результаты расчета (б) для свободного течения стали (сплошная линия — свойства материалов постоянны; штриховая — свойства материалов зависят от температуры)

Экспериментальные методы, применяемые в настоящее время для исследования тепловых процессов в зоне резания чрезвычайно разнообразны и благодаря надежности и простоте, являются основными методами исследования. С их помощью можно определить: количество выделяемой теплоты и ее распределение между стружкой, деталью и инструментом; температуру контактных площадок инструмента; температурные поля в зоне деформации и режущем клине инструмента. Рассмотрим некоторые из них.

Калориметрический метод позволяет определять количество теплоты, переходящей в стружку, деталь и инструмент, а также их средние температуры. Например, улавливая в калориметр горячую стружку, зная массы стружки и воды в калориметре и изменение температуры воды,

можно определить среднюю температуру стружки (рис. 2.5.7, а). Есть также калориметры, в которые погружают деталь и инструмент (рис. 2.5.7, б).

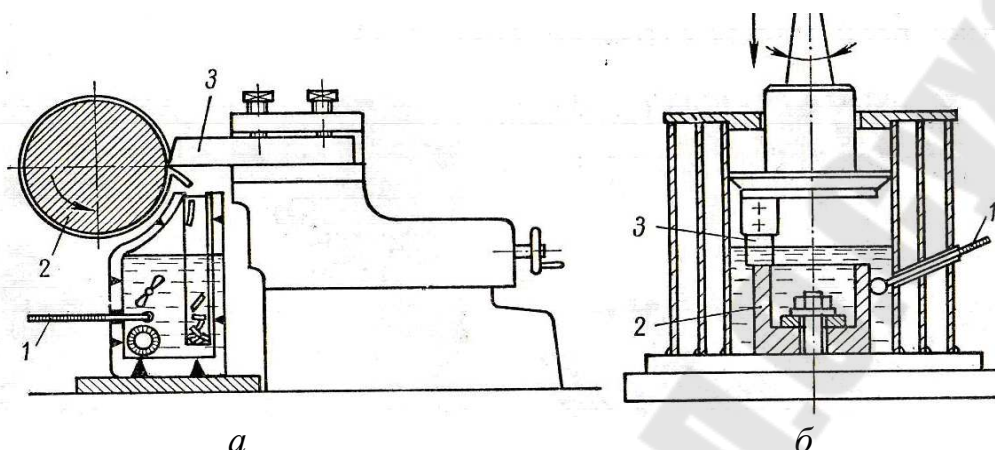


Рис. 2.5.7. Схемы калориметров: **1** — термометр; **2** — деталь; **3** — резец

Метод пленок заключается в том, что на контактные площадки инструмента наносится в вакууме тонкий слой чистого металла с известной температурой плавления. Теплота, выделяющаяся при резании, оплавляет пленку в области, где достигается температура ее плавления, и тем самым обозначает соответствующую изотерму (рис. 2.5.8).

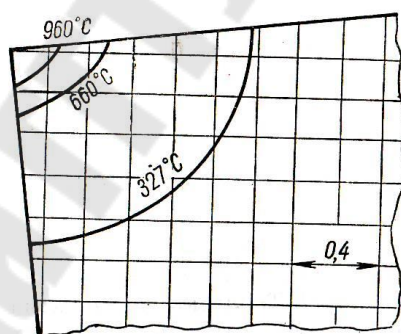


Рис. 2.5.8. Изотермы на резце из минералокерамики при точении стали 45 в течение 1 мин ($v = 500$ м/мин, толщина металлической пленки 0,05 мм)

Метод термокрасок аналогичен методу пленок, но вместо чистых металлов используются специальные составы, изменяющие свой цвет под действием температур.

Термоэлектрический метод заключается в том, что если нагреть место спая двух проводников из различных металлов, оставляя при этом свободными концы при более низкой температуре, на последних возникает термоЭДС, которая зависит от разности температур спая и более холодных концов. Замыкая цепь через милливольтметр, можно измерять термоЭДС.

Такая цепь называется *термоэлектрической*. Этот метод является наиболее распространенным и подразделяется на ряд разновидностей.

Метод искусственной термопары заключается в том, что в инструменте просверливается отверстие малого диаметра, не достигающее до какой-либо точки передней или задней поверхностей, примерно на 0,2...0,5 мм, в отверстие вставляется изолированная термопара (рис. 2.5.9). Температура в точке соприкосновения термопары и инструмента регистрируется включенным в цепь термопары гальванометром. Этот метод дает возможность определять температуру различных точек на передней и задней поверхностях инструмента и на поверхности стружки, т.е. находить температурное поле.

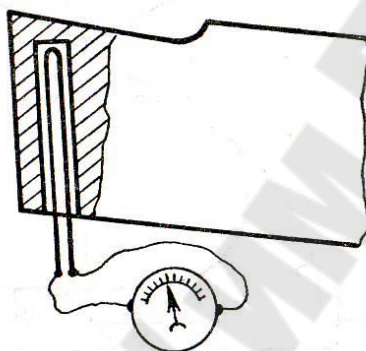


Рис. 2.5.9. Схема измерения температуры резания методом искусственной термопары

Недостатки классической схемы искусственной термопары — сложность устройства и невозможность определить наивысшую температуру, так как измерение температуры производится не на поверхности контакта резца и стружки, а на некотором удалении от них.

Более точные значения температур можно получить, используя скользящие (рис. 2.5.10) или бегущие термопары. Принципиальная схема бегущей термопары представлена на рис. 2.5.11, а. Деталь 4 имеет гребни в форме винта с ленточной резьбой. В них сверлят отверстия диаметром 0,5...0,7 мм, в которые вставляют защитные трубки 3 с двумя изолированными проводниками 1 и 2 термопары.

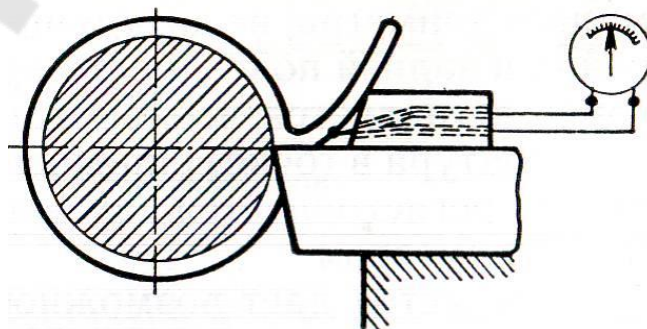


Рис. 2.5.10. Схема скользящей термопары

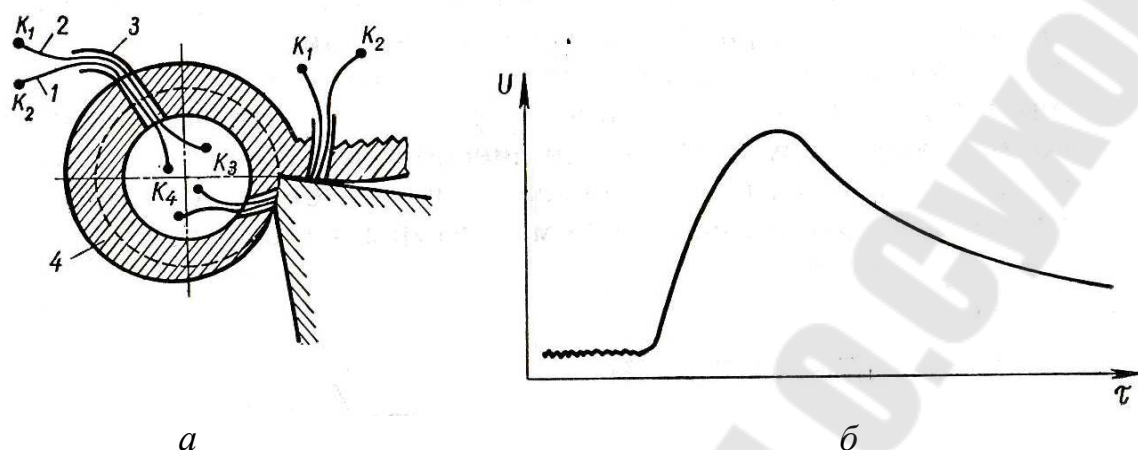


Рис. 2.5.11. Схема бегущей термопары (а) и осциллограмма ее работы (б)

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. Это дает возможность записать распределение температуры по длине контакта. Участки проводников, оставшиеся в заготовке, позволяют определить сначала распространение температуры по задней поверхности инструмента, а затем температуру обработанной поверхности.

В *методе полуискусственной термопары* один из ее элементов (инструмент или деталь) участвует в механической обработке, второй не участвует в этом процессе, а вводится в зону обработки с целью измерения температуры (рис. 2.5.12).

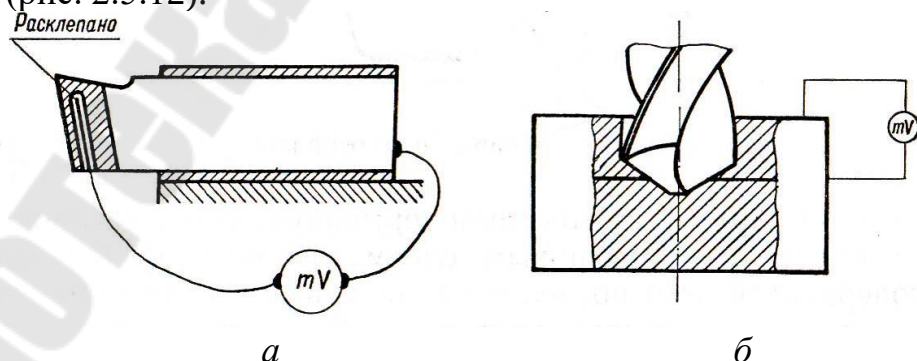


Рис. 2.5.12. Схемы полуискусственной термопары: а — инструмент-проводник; б — деталь-проводник

Разновидность метода полуискусственной термопары приведена на рис. 2.5 13. В тело разрезного резца **1** закладывается изолированная от него токопроводящая пластина **2**, расположенная под углом μ к режущей

кромке. ТермоЭДС, возникающая между стружкой **3** и пластиной, регистрируется измерительным устройством. Если при свободном течении диска из обрабатываемого материала инструменту сообщить продольное перемещение, можно записать закон распределения температур на площадке контакта резец — стружка.

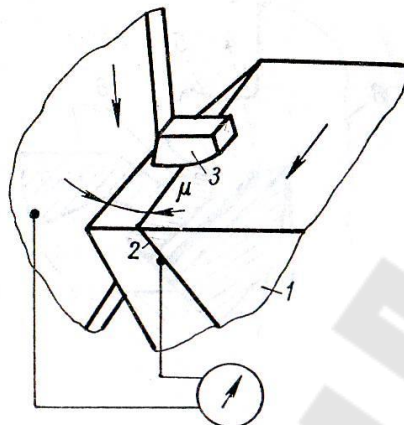


Рис. 2.5.13. Схема полуискусственной термопары проводник - стружка

Метод полуискусственной термопары дает более точные результаты, чем метод искусственной, но, обеспечивая измерение температур в данных точках поверхности, не позволяет изучить закономерности влияния элементов режима резания на наивысшую температуру процесса резания.

В *методе естественной термопары* элементами термопары служат деталь и инструмент, которые, будучи изготовлены из разнородных металлов, в процессе резания имеют сильно нагретый контакт, являющийся спаем этой термопары. Концы инструмента и детали имеют значительно более низкую температуру. Одна из распространенных схем естественной термопары приведена на рис. 2.5.14. Заготовка **5** изолируется от станка с помощью диэлектрических прокладок и текстолитовой вставки **4** в деталь, на которую опирается задний центр станка. Резец **6** изолируется от резцедержателя станка текстолитовыми прокладками **7**. Для замыкания контакта с деталью в заготовку ввертывается стержень **1**, диаметр которого меньше, чем диаметр отверстия в шпинделе. Этот стержень при выходе из шпинделя проходит через текстолитовую втулку **3**, чтобы избежать соприкосновения со станком. На конце стержня установлен токосъемник **2**, обеспечивающий надежное замыкание вращающегося и неподвижного участков цепи. Возникающая в процессе резания термоЭДС, регистрируется гальванометром **8**.

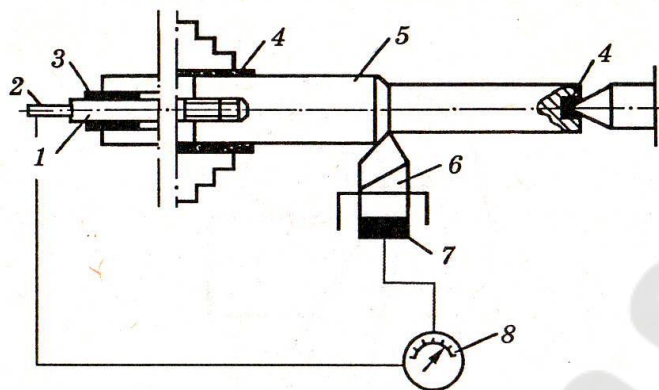


Рис. 2.5.14. Схема измерения температуры резания методом естественной термопары

Для устранения дополнительных паразитных термопар, возникающих в местах стыка деталей станка с заготовкой, резец и заготовку изолируют от станка. При исследованиях, 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 бесконтактного измерения температур представляет собой регистрацию теплового излучения отдельных участков детали или инструмента в процессе обработки. Он основан на принципе собирания теплового излучения с участка нагретой поверхности **1** с помощью линз **2** и направления его на фотосопротивление **3** (рис. 2.5.15). Под действием теплового излучения в фотоэлементе возникает ток, который повышается усилителем **4** и регистрируется измерительным устройством **5**. Фотоэлектрический метод позволяет измерять температуру различных участков зоны резания и определять температурные поля передней и задней поверхностей резца.

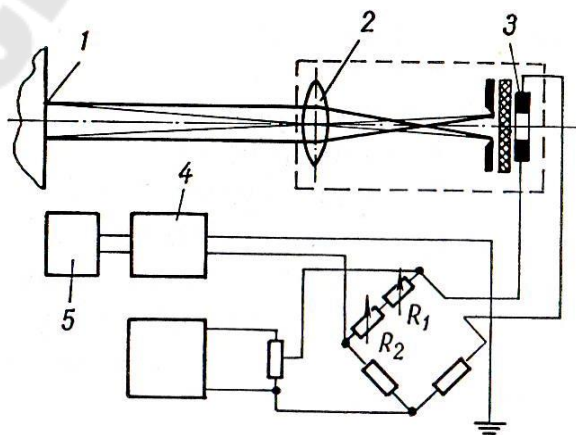


Рис. 2.5.15. Схема фотоэлектрического пирометра для измерения температуры инструмента, детали и стружки

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

Для перехода от показаний в милливольтках к градусам каждое устройство должно быть тарировано 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 спай термопары помещают 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 распространен следующий метод тарирования термопары, при котором в металлическую ванну (из свинца, олова, сурьмы), подогреваемую каким-либо источником теплоты, вставляют применяемый при опытах резец и стружку 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 вводят так называемую «контрольную» термопару с проградуированным ранее гальванометром (рис. 2.5.16).

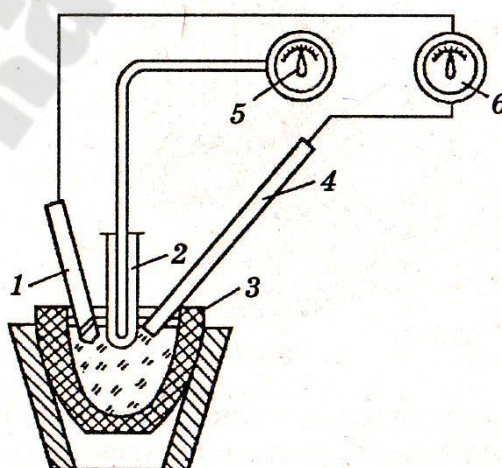


Рис. 2.5.16. Схема тарирования естественной термопары в расплавленном металле: **1** — резец; **2** — контрольная термопара; **3** — тигель; **4** — прутки; **5,6** — регистрирующие приборы

При подогреве и охлаждении ванны через определенные промежутки времени регистрируются ее температура, указываемая «контрольной» термопарой, и показания гальванометра тарируемой термопары. По полученным результатам строится график, показывающий значения температуры, соответствующие различным показаниям гальванометра тарируемой термопары (рис. 2.5.17).

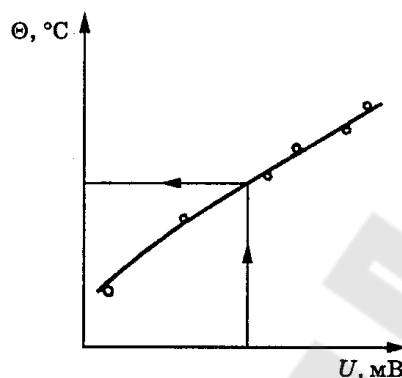


Рис. 2.5.17. Тарировочный график

Описанный метод тарирования не воспроизводит действительных условий работы реза, так как не обеспечивает одинаковые площади контакта обрабатываемого металла с резцом. При тарировании температура контактной поверхности постоянна, между тем как на площади контакта стружки с передней поверхностью инструмента в процессе резания развиваются различные температуры. Таким образом, измеряемая при тарировании термопар температура является усредненной.

На теплоту в зоне резания влияют условия резания различные факторы: режимы резания, условия подвода и отвода тепла, ширина и толщина среза, физико-химические свойства материала и геометрические параметры режущего инструмента. С увеличением скорости резания возрастает количество теплоты, выделяющейся в зоне резания, а также температура нагрева детали, стружки и инструмента. Однако рост температуры в зоне резания отстает от роста скорости резания. Это отставание особенно усиливается в зоне высоких скоростей, что видно на отдельных участках кривой, представленной на рис. 2.5.18. Кривую можно разбить на отдельные участки и получить простые зависимости вида

$$\Theta = C_{\Theta_v} v^{\alpha}$$

где C_{Θ_v} — коэффициент, учитывающий влияние на температуру резания всех остальных факторов, кроме скорости резания;

α — показатель степени, указывающий интенсивность влияния скорости резания на повышение температуры резания Θ .

Обычно $\alpha < 1$ (например, при обработке стали со скоростями резания $v = 10 \dots 20$ м/мин; $\alpha = 0,5$; при $v = 25 \dots 45$ м/мин $\alpha = 0,4$; при $v = 45 \dots 180$ м/мин $\alpha = 0,2$).

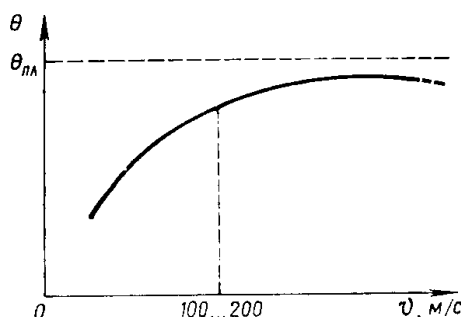


Рис. 2.5.18. Зависимость температуры от скорости резания

Температура в зоне резания при тяжелых условиях работы может достигать $1000 \dots 1100$ °С. С увеличением скорости растет мощность резания $N = P_z v$ и, следовательно, количество выделяемой теплоты. Но непосредственно в резец переходит очень небольшое ее количество, а основное — уносится стружкой. Поэтому, хотя с увеличением скорости резания температура резания повышается, этот рост все время замедляется. Кроме того, допущение о том, что $N = P_z v$ изменяется пропорционально и, не совсем правильно, так как по мере увеличения v сила резания P_z уменьшается. Унос теплоты стружкой тоже растет с повышением скорости резания, поэтому нет прямой зависимости изменения температуры резания Θ от скорости v .

На силы резания, а, следовательно, на работу резания и количество выделяющейся теплоты, а также на условия теплоотвода оказывают влияние физико-механические свойства обрабатываемого материала. На температуру резания Θ они влияют так же, как и на силу резания P_z , т.е. имеется тенденция к увеличению Θ с повышением прочности, твердости и пластичности обрабатываемого материала. Большое воздействие на температуру резания оказывают теплопроводность обрабатываемого материала и характер его микроструктуры. Чем выше теплопроводность обрабатываемого материала, тем ниже Θ , так как отвод теплоты от места ее выделения в стружку и деталь более интенсивен. Кроме того, при обработке сталей со структурой зернистого перлита сила и температура резания значительно выше, чем при обработке сталей со структурой пластинчатого перлита. Это объясняется тем, что пластичность структуры зернистого перлита гораздо выше, чем пластинчатого.

С увеличением ширины среза b прямо пропорционально растут сила, работа резания и количество выделяющейся теплоты. Во столько же раз увеличивается и длина активной части режущей кромки (рис. 2.5.19), а соответственно и отвод теплоты. Поэтому с увеличением b температура

резания изменяется незначительно. Экспериментально установлена зависимость $\Theta = C_{\Theta} b^{\beta}$,

где C_{Θ} - коэффициент, учитывающий влияние на температуру резания всех остальных факторов, кроме ширины среза; β — показатель степени, учитывающий влияние ширины среза на повышение Θ (обычно $\beta \approx 0,1$).

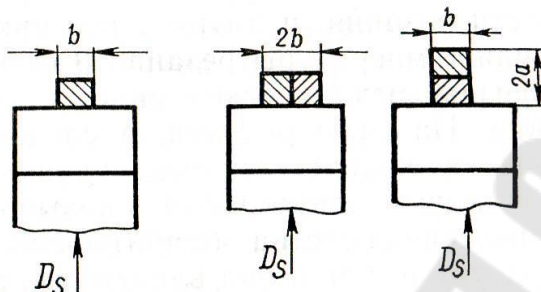


Рис. 2.5.19. Длина активной части режущей кромки резца при различной ширине среза

В зависимости от толщины срезаемого слоя, a сила P_z увеличивается примерно в степени 0,75. Так же увеличиваются работа резания и количество выделяемой теплоты. Одновременно растет, хотя и в меньшей степени, площадь контакта стружки с передней поверхностью резца. Это несколько улучшает условия отвода теплоты, поэтому увеличение температуры отстает от роста толщины среза:

$$\Theta = C_{\Theta a} a^{\gamma}, \text{ где } \gamma = 0,2 \dots 0,3.$$

С изменением переднего угла инструмента изменяются условия подвода и отвода теплоты, а, следовательно, и температура резания. С увеличением угла γ уменьшается сила, а значит, работа резания и количество выделившейся теплоты. Однако при этом ухудшаются условия ее отвода, так как уменьшается угол заострения β , т.е. массивность головки резца. Поэтому существует некоторый оптимальный угол γ , при котором уменьшаются силы резания и количество выделившейся теплоты. С увеличением γ выше оптимального уменьшается массивность головки резца, ухудшаются условия теплоотвода, растет температура резания (рис. 2.5.20, а). Аналогично влияет на температуру задний угол.

С уменьшением главного угла в плане ϕ увеличивается угол при вершине ϵ , что приводит к возрастанию массы головки резца и улучшению теплоотвода, а, следовательно, к уменьшению Θ , и наоборот (рис. 2.5.20, б).

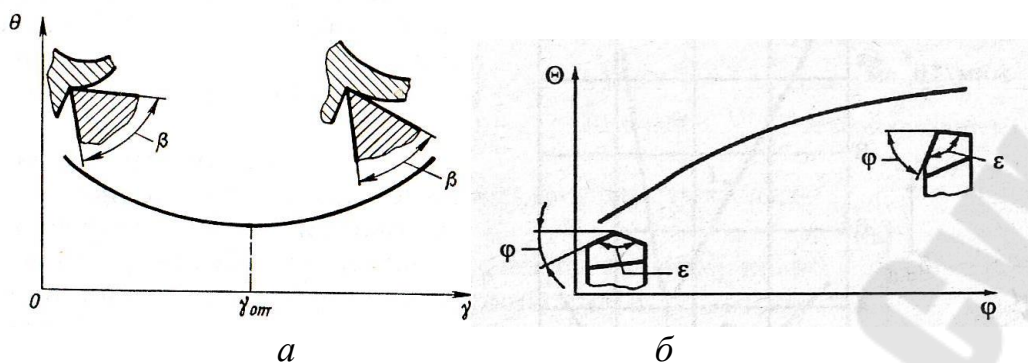


Рис. 2.5.20. Зависимость температуры резания: **а**- от переднего угла инструмента; **б** - от главного угла инструмента в плане

Из этого положения вытекает ряд важных следствий.

1. Для инструментов с любой комбинацией геометрических параметров режущей части ($\alpha, \gamma, \varphi, \varphi_1, \lambda, r_b$ и др.) точкам минимума кривых, выражающих зависимость интенсивности изнашивания от скорости резания, соответствует одна и та же оптимальная температура резания, хотя уровень оптимальных скоростей резания может существенно колебаться.

2. При обработке металлов без охлаждения и с охлаждением различными средами наименьшая интенсивность изнашивания наблюдается при одной и той же оптимальной температуре резания.

3. Изменение диаметра обрабатываемой поверхности при точении и диаметра отверстия при растачивании приводит к существенному изменению уровня оптимальных скоростей резания, в то время как оптимальная температура резания остается постоянной.

4. Изменение твердости и структуры стали приводит к существенному изменению уровня оптимальных скоростей резания, которым, однако, соответствует одна и та же оптимальная температура.

Воздействие теплоты в процессе обработки материала так же воздействует на технологическую систему.

Нагревание технологической системы возникают в работающих системах механизма станка и за счет влияния окружающей среды, а так же влияет на качество обработанной детали.

Тепловое состояние системы может быть стационарным и не стационарным.

В первом (стационарном) случае имеет место тепловое равновесие системы, т.е. количество во времени.

Это наблюдается при обработке небольших деталей и, если станок предварительно прошел период разогрева тепловой вследствие трения 2.5.21.



Рис. 2.5.21. Основные источники теплоты в станке

Однако в чистом виде такое состояние встречается редко.

Нестационарное тепловое состояние наблюдается в период пуска станка после длительной его остановки. Однако здесь следует учитывать отдельные процессы обработки и работы станка, а так же колебания теплоты в цехе.

Поэтому для упрощения задачи по выявлению влияния температурных деформаций на точность обработки рассматривают два периода в работе станка.

Первый – от начала пуска станка до достижения теплового равновесия, соответствующему нестационарному тепловому состоянию системы.

Второй (до окончания обработки) – стационарное тепловое состояние.

Здесь рассматриваются характер нагревания, тепловые деформации отдельных элементов технологической системы и их влияние на точность обработки.

В процессе резания происходит изменение температуры не только в зоне резания, но всей технологической системы, включая станок, на котором происходит обработка. Факторы, влияющие на тепловыделение в станке, представлены на рис. 2.5.21.

Нагрев бабки токарного станка (рис. 2.5.22) может вызвать смещение шпинделя в вертикальной и горизонтальной плоскостях на несколько сотых долей миллиметров. Например, при частоте вращения $n = 405$ об/мин

смещения равны соответственно 48 и 1 мкм. Такие деформации влияют на точность обрабатываемых деталей.

Температура валов и шпинделей обычно на 30-40% выше средней температуры корпуса

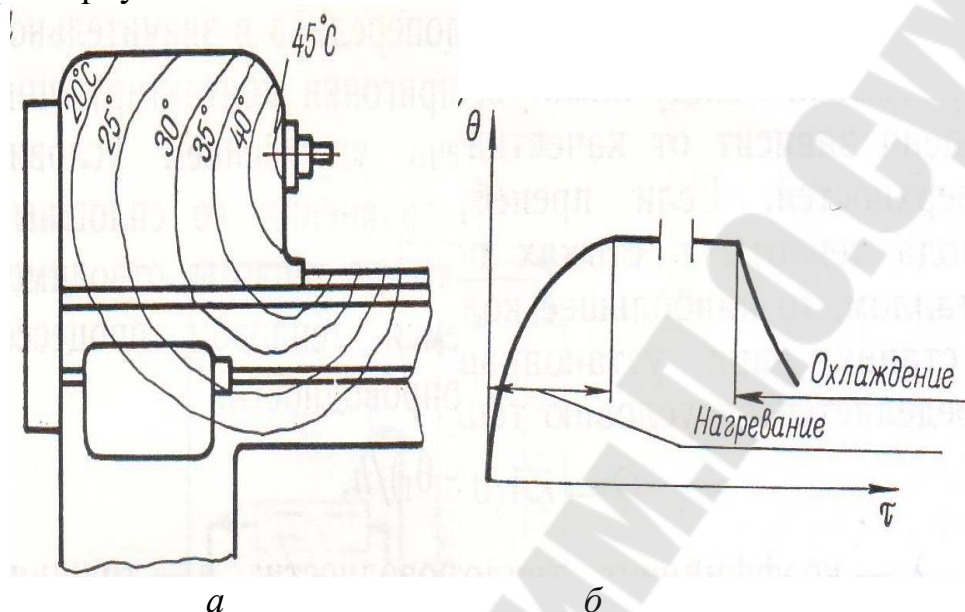


Рис. 2.5.22. Температурное поле передней бабки токарного станка (а) и график измерения температуры при его нагревании и охлаждении (б)

Если фиксация шпинделя от осевого перемещения осуществлена у заднего подшипника, то при длине шпинделя L и разности температур между корпусом и шпинделем $\Delta\theta$ осевое перемещение шпинделя и патрона составят

$$\Delta L = \alpha L \Delta \theta, \text{ где}$$

α – термический коэффициент линейного расширения.

Например, при $L = 800$ мм $\Delta\theta = 100$, $\alpha = 0,000012$, получим $\Delta L = 0,1$ мм.

Также точность обработки на станке зависит от температурных деформаций ходовых винтов. Особенно влияет этот фактор на точность перемещений бабок шлифовальных станков. В случае большой длины винтов подачи этих станков погрешность может достигать 0,03...0,05 мм

На температурные деформации обрабатываемой заготовки оказывает та теплота, которая образуется при резании. Если деформация заготовки невозможна, то в ней возникают тепловые напряжения.

В процессе обработки наблюдаются три периода распространения теплоты и развития температурных деформаций заготовки рис. 2.5.23.

Первый период характеризуется сравнительно небольшим нагревом заготовки.

Второй, установившийся период, характеризуется тем, что перед резцом идет опережающая тепловая волна. На втором периоде температурные деформации возрастают до определенного уровня и остаются постоянными на большей части длины заготовки.

Третий (завершающийся) период характеризуется повышением температуры необработанного участка заготовки из-за отражения тепловой волны от левого торца заготовки. Температурные деформации в этот период растут.

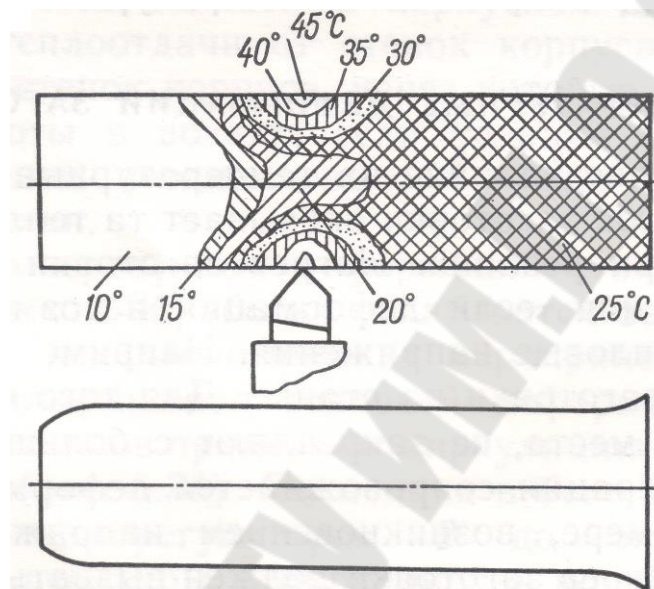


Рис. 2.5.23. Температурное поле обрабатываемой заготовки и ее форма после обработки

Большие температурные деформации наблюдаются при односторонней обработке длинные деталей типа планок, реек, пластин.

Применение СОЖ практически позволяет устранить нагревание детали. И погрешность температурных деформаций на точность ее обработки можно не учитывать.

Однако погрешность обработки вследствие температурных деформаций детали в случае ее постоянного температурного поля можно рассчитать:

$$\Delta \Theta = Q / c_p V, \text{ где}$$

Q – количество теплоты полученное заготовкой в процессе резания;

c – удельная теплоемкость материала заготовки;

V – объем заготовки.

РАЗДЕЛ III АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА РЕЗАНИЕМ МАТЕРИАЛОВ

Тема 3.1. Методы абразивной обработки.

Абразивная обработка материалов предусматривает следующие методы:

- 1) шлифование;
- 2) полирование;
- 3) притирка и доводка;
- 4) хонингование и прочие процессы.

Шлифование – один из этапов обработки материалов, выполняется на завершающих стадиях изготовления перед финишным полированием или нанесением краски. Главные цели шлифования материала – это придание поверхности гладкости, удаление дефектов. В процессе шлифования металлических поверхностей снимается верхний тончайший слой материала специальными абразивными инструментами. Рабочая поверхность шлифовальных кругов – это материал с пористой структурой, покрытый минеральным абразивом малой фракции. Его зёрна нанесены на основание и зафиксированы на нём, скреплены друг с другом прочным цементирующим составом.

Полирование является отделочной операцией обработки металлических, стеклянных, деревянных, пластиковых, тканых и других поверхностей. Суть полирования – снятие тончайших слоев обрабатываемого материала механическими, химическими, электролитическими или методами ионного облучения, придание поверхности малой шероховатости и зеркального блеска.

Притиркой называется операция по чистовой обработке поверхностей изделия, выполняемая с помощью абразивных материалов в виде порошков или паст с целью получения плотных, герметичных разъемных и подвижных соединений.

Доводка является разновидностью притирки и предназначена для получения деталей с высокой точностью формы, размеров, высокой чистотой поверхности.

При помощи притирки и доводки можно довести поверхность детали до зеркального блеска, что соответствует наивысшему – 14-му классу чистоты. При помощи этих операций можно получить точность обработки до 0,5 мкм. Припуск на притирку не должен превышать 0,01—0,02 мм, ибо большие припуски уменьшают производительность труда и ухудшают качество обрабатываемой поверхности.

Притиркой и доводкой снимается слой металла толщиной 0,003—0,030 мм.

Сущность процесса притирки заключается в механическом или химико-механическом удалении с обрабатываемых поверхностей частиц металла абразивными материалами.

Существуют два метода притирки:

1. Притирка сопрягаемых между собой поверхностей деталей одна к другой с помощью абразивных порошков, смешиваемых со смазывающими веществами, и паст, наносимых на притираемые поверхности.

2. Притирка сопрягаемых или несопрягаемых между собой поверхностей деталей с помощью специальных притирок и с применением протирочных паст или доводочных эмульсий.

Различают притирку предварительную и окончательную. На предварительную притирку оставляют припуск 0,01—0,02 мм, на окончательную — 0,003—0,005 мм.

Хонингование – вид финишной металлообработки цилиндрических деталей изнутри. Применяется для повышения износостойкости трущихся поверхностей. Процесс представляет собой нанесение на металл мелкого сеточного рисунка. Существует несколько наиболее распространенных методов хонингования: вибрационный, вихревой, растровый. Способ обработки выбирается в зависимости от назначения деталей, наличия подходящего оборудования. Суть процесса хонингования заключается в равномерном снятии микронных слоев металла. Для этого используется специальный инструмент – хон. Рабочая поверхность хонинговальной головки касается внутренней части обрабатываемой поверхности по траектории, совмещающей вращательные и возвратно-поступательные движения. Обработка производится с применением специальной смазочно-охлаждающей жидкости, в качестве которой может быть использован керосин либо рабочая жидкость на основе водно-масляных эмульсий (применяется при обработке изделий с высокими требованиями к качеству покрытия). В процессе хонингования крайне важно обеспечить равномерное давление шлифующей кромки, так как только в таком случае удастся получить равномерную глубину риски и около идеальную геометрическую форму внутренней поверхности цилиндра. Для исключений возможной неравномерной обработки, шток задает хону небольшие круговые колебания вокруг своей оси.

Наиболее часто встречающимися в современном машиностроении способами абразивной обработки являются:

- 1) наружное круглое (с продольной или осевой подачей; поперечной подачей; бесцентровое);
- 2) внутреннее (при вращающейся детали с продольной и поперечной подачами; бесцентровое; при неподвижной детали: планетарное);
- 3) плоское (периферией; торцом круга);
- 4) специальная (резьбовое, фасонное и т.д.).

Абразивная обработка при шлифовании обычно осуществляется посредством трех движений: вращения шлифовального круга, вращения или перемещения (кругового либо возвратно-поступательного) детали и движения подачи, осуществляемого кругом или обрабатываемой деталью. Некоторые из указанных движений могут отсутствовать, например возвратно-поступательное движение детали или круга при врезном шлифовании, однако вращение шлифовального круга является неотъемлемым условием процесса шлифования.

Скорость круга v_k (м/с) является скоростью резания и определяется по формуле

$$v_k = \frac{\pi D_k n_k}{60 \cdot 1000},$$

где D_k - диаметр круга, мм, n_k - частота вращения круга, об/мин.

Скорость обрабатываемой детали v_d (м/мин) при круглом наружном и внутреннем шлифовании

$$v_d = \frac{\pi D_d n_d}{60 \cdot 1000},$$

где D_d - диаметр шлифуемых деталей или отверстия, мм, n_d - частота вращения детали, об/мин.

Подача в направлении снятия припуска — поперечная подача $S_{\perp} = t$ при круглом наружном (рис. 3.1.1, а) и внутреннем шлифовании с продольной подачей устанавливается за двойной или один ход обрабатываемой детали либо круга. При черновом наружном шлифовании $S_{2x} = t = 0,01...0,07$ мм за двойной ход, при чистовом $S_{2x} = t = 0,005...0,02$ мм за двойной ход.

Виды шлифования представлены на рис. 3.1.1.

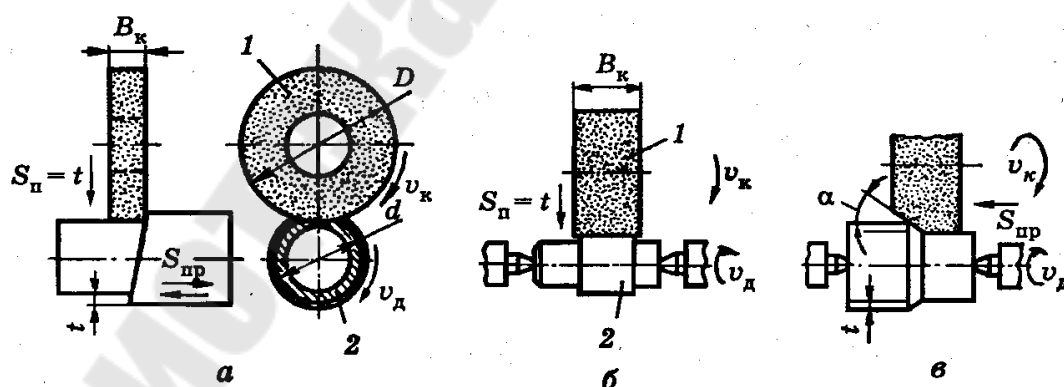


Рис. 3.1.1 - Круглое наружное шлифование в центрах: 1 — шлифовальный круг; 2 — деталь

Продольную подачу назначают в долях ширины круга или миллиметрах за один оборот обрабатываемой детали, а также в метрах в

минуту. При черновом наружном шлифовании $S_{\text{пр}} = (0,3 \dots 0,85) B_k$, при чистовом $S_{\text{пр}} = (0,2 \dots 0,3) B_k$, где B_k — ширина круга, мм.

Шлифование методом врезания (рис. 3.1.1, б) чаще всего применяют при обработке кругом 1 фасонных, а также коротких жестких деталей 2. Поперечная подача при этом принимается равной значениям $0,002 \dots 0,005$ мм/об. Иногда задается минутная подача $0,8 \dots 3$ мм/мин.

Глубинное шлифование (рис. 3.1.1, в) применяют при обработке жестких коротких деталей со снятием припуска (до $0,4$ мм) за один проход. Продольная подача выбирается в пределах $1 \dots 6$ мм за оборот детали.

Внутреннее круглое шлифование может осуществляться обычным и планетарным способами. В первом случае (рис. 3.1.2, а) деталь закрепляется в патроне и получает вращательное движение; круг вращается и имеет возвратно-поступательное движение ($S_{\text{пр}}$) и поперечную подачу ($S_{\text{п}}$) на каждый двойной ход. При планетарном способе внутреннего шлифования деталь неподвижна, а все движения осуществляются кругом (рис. 3.1.2, б). Этот метод применяется при обработке крупных и тяжелых деталей. Шлифовальный шпиндель станка имеет четыре движения:

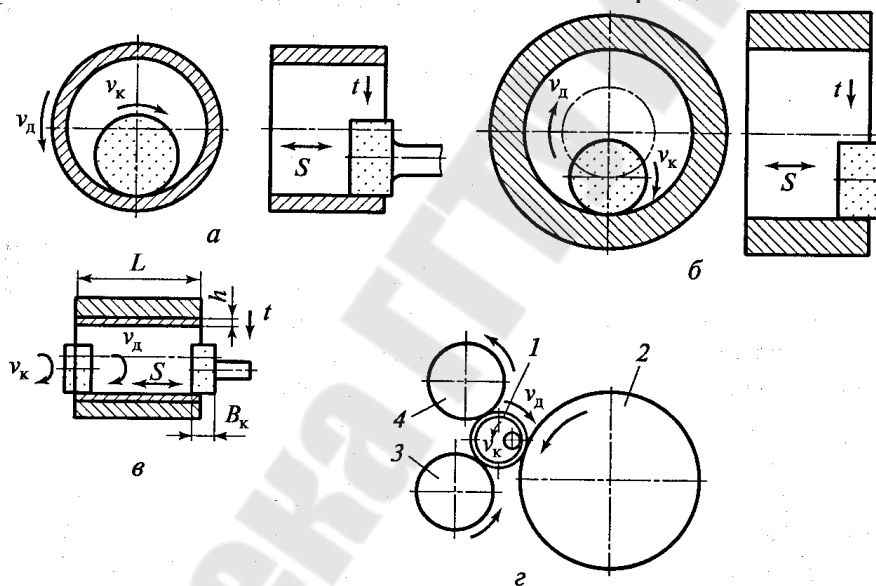


Рис. 3.1.2. Внутреннее шлифование

Шлифовальный шпиндель станка имеет четыре движения:

- 1) вокруг своей оси со скоростью круга до 35 м/с;
- 2) планетарное вокруг оси обрабатываемого отверстия со скоростью $40 \dots 60$ м/мин;
- 3) возвратно-поступательное вдоль оси изделия, измеряемое в долях ширины круга;
- 4) поперечная подача, осуществляемая после каждого двойного хода ($0,008 \dots 0,02$ мм за двойной ход).

Внутреннее круглое шлифование протекает в более тяжелых условиях, чем наружное. Связано это с тем, что нагрузка на каждое зерно круга для внутреннего шлифования больше, чем для наружного, так как велика поверхность контакта круг — деталь. Диаметр шлифовального круга D_k меньше диаметра обрабатываемого отверстия D и составляет $(0,75...0,25)D$. Кроме того, размеры посадочного отверстия кругов для внутреннего шлифования малы, поэтому шпиндель недостаточно жесткий. Проникновение СОЖ в зону резания плохое, что приводит к снижению теплоотвода.

Учитывая ухудшенные условия внутреннего шлифования, режимы резания (глубина и подача) принимают примерно в 2 раза меньшими значениями, чем при наружном круглом шлифовании.

Бесцентровое шлифование может применяться для обработки как внутренних, так и наружных поверхностей, осуществляться напроход и до упора. Рассмотрим некоторые основные принципиальные особенности процесса бесцентрового шлифования на примере обработки наружной поверхности гладкого цилиндрического валика (рис. 3.1.3, а).

Деталь 2 помещается на опорном ноже 4 между двумя вращающимися с различными скоростями кругами 1 и 3. Рабочий круг 1 осуществляет процесс резания, а ведущий круг 3 обеспечивает вращательное и поступательное движения детали за счет разворота его оси относительно оси рабочего круга на угол $\alpha = 1...5^\circ$. Ось детали устанавливается выше осей кругов на $h = (0,1...0,3)d$, где d — диаметр детали. Большее значение h берется при обработке деталей меньшего диаметра. Вектор скорости ведущего круга раскладывается на вектор скорости вращения детали v_d (рис. 3.1.3, б) и вектор скорости ее продольного перемещения v_s . Рабочий круг вращается со скоростью 30...35 м/с, ведущий — 15...30 м/мин. В результате разных скоростей вращения кругов сила трения между ведущим кругом и деталью значительно больше окружной силы резания, что обеспечивает вращательное движение детали.

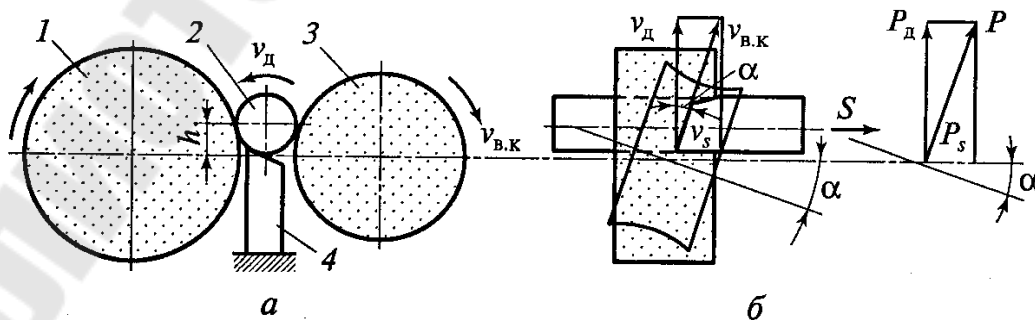


Рис. 3.1.3. Бесцентровое шлифование

В процесс абразивной обработки происходят следующие физические явления. Минеральные частицы абразивного инструмента (например, шлифовального круга) имеют острые грани, которые при обработке снимают верхний тонкий слой с металла, устраняя неровности, придавая заданную гладкость, установленную техническим заданием или действующими стандартами.

Важно брать во внимание характеристики материала, ведь скорость снятия верхнего слоя бывает очень высокой. При повышенной мягкости материала детали нужны точность и аккуратность. Чем крупнее абразивные частицы, тем быстрее резание. Чем их размер меньше, тем лучше эстетика, гладкость.

Стандартная обработка предполагает скорость вращения кругов, не превышающую 50 м/с. Если значение выше, то шлифовка является скоростной. В токарных станках рабочие элементы вращаются медленнее в 25-30 раз. Время контакта отдельного зерна с материалом малое – 0,0001 секунды.

Круг покрыт хаотично расположенными многочисленными абразивными частицами, имеющими режущие кромки разных конфигураций. Эти зёрна удаляют металлическую стружку, размеры которой практически микроскопичные. Но при этом станок расходует электричество в 5 раз активнее фрезеровочного оборудования и в 10 раз интенсивнее токарного.

Из-за малых размеров и многочисленности зёрен, их различных форм и мельчайшей металлической стружки активно выделяется тепловая энергия. Нагрев происходит в зоне соприкосновения круга со шлифуемой поверхностью. Температура порой достигает +1000 градусов Цельсия и больше. Из-за такого интенсивного термического воздействия могут меняться некоторые свойства металла, из-за чего он становится хрупким. Чтобы сохранить прочность, нужно обеспечить постоянное охлаждение участка контакта. Кроме того, важно грамотно рассчитывать припуски и обязательно учитывать их.

Во время шлифовки происходит частичное измельчение, как снимаемой металлической стружки, так и зёрен круга. В результате образуются маленькие фрагменты, которые забивают промежутки между остающимися абразивными частицами. Происходит затупление режущих кромок, а также их окрашивание металлом. Для продолжения работы необходимо либо сменить круг, либо увеличить рабочую мощность.

Процесс абразивной обработки обладает рядом характерных особенностей.

1. Процесс отделения стружки отдельным абразивным зерном осуществляется на высоких скоростях резания (30-70 м/с) за очень короткий промежуток времени (в течение тысячных и сотых долей секунды).

2. Резание осуществляется большим количеством беспорядочно расположенных абразивных зерен, обладающих высокой микротвердостью. Эти зерна, образующие прерывистый режущий контур, производят царапание поверхности и прорезают мельчайшие углубления. Объем металла, срезаемый в единицу времени, в этом случае значительно меньше, чем при резании лезвийным инструментом. Одним абразивным зерном в единицу времени срезается примерно в 4000000 раз меньше объема металла, чем одним зубом фрезы.

3. Абразивные зерна расположены в круге хаотически, имеют неблагоприятную геометрию: отрицательные передние углы $50-55^\circ$.

4. Из-за высоких скоростей и неблагоприятной геометрии зерен процесс шлифования сопровождается выделением большого количества тепла, высокими температурами в зоне резания (до 1500°C), из-за чего особое значение приобретают вопросы охлаждения.

5. Управлять процессом шлифования можно только за счет изменения режимов резания, так как изменить геометрию абразивного зерна невозможно.

6. Абразивный инструмент может в процессе работы самозатачиваться, когда затупившиеся зерна вырываются из связки или раскалываются, и в работу включаются новые острые зерна.

7. Формируемая при шлифовании поверхность детали образуется в результате одновременного действия как геометрических факторов, характерных для лезвийной обработки, так и пластических деформаций, когда из-за высоких температур происходит «размазывание» размягченного металла по обрабатываемой поверхности.

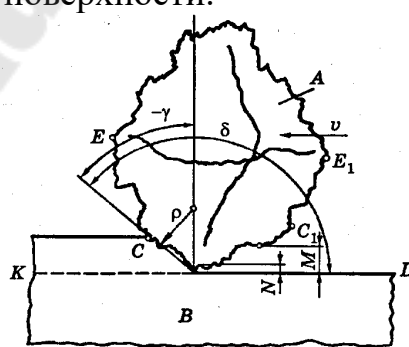


Рис. 3.1.4. Схема шлифующего зерна при микрорезании: *A* – основной царапающий элемент (абразивное зерно); *M* – микровыступ; *N* – субмикровыступ; *KL* – линия среза

Абразивные зерна расположены в теле круга хаотически. Они являются многогранниками неправильной формы и имеют округленные

радиусом ρ вершины (рис. 3.1.4). Округление это невелико (обычно $\rho = 8 \dots 20$ мкм), но его всегда надо учитывать, так как при микрорезании толщины слоев, снимаемых отдельными зернами, соизмеримы с ρ . С учетом этой особенности формы зерна установлены основные закономерности процесса микрорезания при работе любым абразивным инструментом. Как видно из рисунка, в процессе резания зерна имеют отрицательные передние углы ($-\gamma$), резко повышающие их механическую прочность и сопротивление действующим на них силам. Угол резания δ обычно больше 90° . У каждого шлифующего зерна различают переднюю поверхность ECB , по которой сходит стружка, и заднюю поверхность BC_1E_1 , обращенную к обработанной поверхности.

Поверхность абразивных и алмазных зерен всегда имеет шероховатость, вызываемую внутренним строением (несовершенством) в связи с условиями их изготовления. Наиболее значительна шероховатость синтетических алмазов. В связи с этим на зернах различают микровыступы и субмикровыступы. Они играют роль самостоятельных царапающих элементов, снимающих стружки, в 10 и 100 раз меньшие по сравнению с основным царапающим элементом. Следовательно, при алмазно-абразивной обработке имеет также место микро- и субмикрорезание.

Из-за наличия округления режущих элементов в зоне тонких стружек создаются более тупые углы резания δ .

При изучении механизма образования шлифованной поверхности основное внимание следует уделять вопросу образования шероховатости и волнистости. С геометрической точки зрения шероховатость образуется в результате копирования на обрабатываемой поверхности траектории движения режущих абразивных зерен. Пластическое деформирование, происходящее в процессе резания, сильно искажает микрорельеф, получающийся в результате действия геометрических факторов.

Что касается геометрической схемы образования шлифованной поверхности, необходимо иметь в виду следующее:

- 1) для большего соответствия действительному процессу стружкообразования следует рассматривать врезание зерен в шероховатую поверхность, а сами зерна считать хаотично расположенными во всем объеме круга (рис. 3.1.5). Шлифование должно рассматриваться как явление пространственное, а не плоскостное. В зоне резания обрабатываемая элементарная поверхность (например, на участке I) за время ее контакта со шлифовальным кругом соприкасается не с одним рядом зерен, а с несколькими;

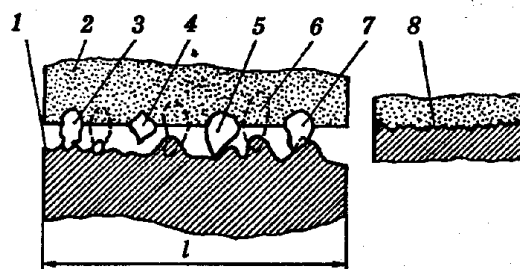


Рис. 3.1.5. Схема образования шлифованной поверхности: **1** — шероховатая поверхность до шлифования; **2** — шлифовальный круг; **3, 4, 5, 7** — первый ряд абразивных зерен (сплошные линии), находящихся на одной образующей; **6** — второй (соседний) ряд зерен (штриховые линии); **8** — профиль шлифованной поверхности после выхода ее из зоны контакта с кругом

2) чем меньше неровности абразивного режущего контура, тем ближе он подходит к сплошному режущему лезвию и тем менее шероховатой получается обработанная поверхность. Одинаковый режущий контур можно создать уменьшением номера зернистости или увеличением времени абразивного воздействия, например, за счет понижения скорости вращения детали или уменьшения продольной подачи за один оборот изделия;

3) упорядоченный режущий рельеф достигается алмазной правкой. В процессе шлифования по мере разрушения и выпадения отдельных зерен упорядоченный режущий рельеф нарушается. Режущие лезвия располагаются хаотично, и процесс стружкообразования протекает по схеме, приведенной на рисунке 3.1.5. При шлифовании в режиме самозатачивания круга процесс стружкообразования идет в основном по той же схеме;

4) абразивные зерна в процессе врезания можно разделить на режущие (например, зерна **3, 7**, рис. 3.1.5), скоблящие, если они врезаются на столь малую глубину, что происходит лишь пластическое выдавливание металла без снятия стружки (на схеме они не указаны), давящие **5** и нережущие - **4**. В реальном процессе шлифования примерно 85...90 % всех зерен не режет, а так или иначе пластически деформирует тончайший поверхностный слой, т.е. наклепывает его. За счет наклепа микротвердость могла бы значительно возрасти, но этому противодействует явление отдыха, происходящего из-за высокой температуры резания. Тем не менее, при тонком шлифовании, особенно при выхаживании или шлифовании с очень малой либо нулевой подачей, эффект наклепа резко возрастает, а шероховатость уменьшается; скоблящих и давящих зерен становится больше, и они упрочняют поверхностный слой;

5) на шероховатость влияет не только зернистость, но и связка абразивного инструмента, оказывающая полирующий эффект, который особенно проявляется при меньших скоростях вращения круга.

Экспериментально доказано, что по убывающей степени влияния на уменьшение шероховатости шлифованной поверхности основные технологические факторы можно распределить в следующем порядке: выхаживание — алмазная правка круга — скоростное шлифование — уменьшение размеров зерен круга — варьирование режимами резания — влияние материала связки — влияние химического состава и чистоты СОЖ.

Тема 3.2. Тепловые процессы при абразивной обработке материалов

Процесс шлифования характеризуется высокими температурами в зоне резания, которые служат причиной появления структурно измененных слоев шлифуемой детали и больших остаточных напряжений. Образующая теплота воздействует так же на абразивный круг, в результате чего быстро затупляются абразивные зерна, выгорают органические связки, повышается изнашивание и снижаются режущие свойства круга.

Вся механическая энергическая мощность микрорезания преобразуется в тепловую и, лишь незначительная часть мощности (десятые доли процента) переходит в скрытую энергию изменений кристаллической решетки обрабатываемого материала.

Теплота при шлифовании распределяется между деталью, кругом, стружкой и окружающей средой

$$Q = Q_d + Q_{кр} + Q_c + Q_{o.c.},$$

где Q_d - теплота, переходящая в обрабатываемую деталь;

$Q_{кр}$ - теплота, переходящая в круг;

Q_c - теплота, переходящая в стружку;

$Q_{o.c.}$ - теплота, отводимая охлаждающей средой.

Распределение теплоты при шлифовании следующее:

- деталь - 60-80%;
- абразивный круг – 10-13%;
- стружка – до 30%.

При шлифовании различают мгновенную температуру Q_m , развивающуюся в зоне микрорезания абразивным зерном и являющуюся высокой и кратковременной, контактную Q_k , устанавливающуюся в зоне контакта круга с деталью и среднюю $Q_{ср}$, устанавливающуюся на всей обработанной поверхности.

При абразивном шлифовании средняя температура детали изменяется в пределах 20...350°C, контактная – в пределах 200-1100°C и мгновенная – от 1000°C до температуры плавления обрабатываемого материала.

При абразивной обработке возникновение и распределение теплоты зависит от условий обработки:

- характеристики круга;

- элементов режима резания;
- свойств материала детали (механических и тепловых);
- СОЖ.

На рост температуры резания влияет нагрузка на зерно в зоне его работы, в свою очередь нагрузка на зерно возрастает при увеличении окружной скорости детали и подач как продольной, так и поперечной.

С ростом скорости шлифовального круга температура поверхности обрабатываемой детали уменьшается, так как с увеличением скорости резания уменьшается контакт круга с поверхностью детали.

Температура возрастает при увеличении твердости, плотности структуры и зернистости шлифовального круга, так как шлифовальным кругом снимается большее количество стружек, т.е. затрачивается большая работа.

Увеличение размеров шлифуемой детали способствует более интенсивному отводу тепла. Детали, имеющие меньшие диаметры и массу хуже отводят теплоту, поэтому на поверхности таких деталей могут возникать прижоги и образовываться трещины.

При уменьшении мощности источников теплообразования, а так же при повышении интенсивности теплоотвода, температура при шлифовании уменьшается.

Одним из методов управления балансом теплоты является изменения теплоемкости применяемых СОЖ.

Тепловые явления, сопровождающие процесс шлифования, оказывают значительное влияние, как на протекание процесса, так и на качество поверхности обрабатываемого материала. Затрачиваемая при снятии стружки, трении и деформациях работа переходит в тепло, которое создает в зоне контакта абразивного круга и обрабатываемой поверхности быстрорежущей стали поле с высокими температурами. Деформация и нагрев металла происходит очень быстро (за доли секунды), и основное количество тепловой энергии концентрируется в тонком поверхностном слое шлифуемой детали. Этому способствует и сравнительно низкая теплопроводность быстрорежущих сталей.

После прохождения абразивного инструмента происходит быстрое охлаждение поверхностного слоя обрабатываемого металла. Такие температурные перепады, как правило, приводят к структурным изменениям в тонком поверхностном слое шлифуемого металла, вызывают появление остаточных напряжений.

Для оценки тепловых явлений при шлифовании и их влияния на состояние поверхностного слоя обрабатываемого материала необходимо знать температуру в зоне контакта абразивного инструмента с деталью, т.е. контактную температуру поверхности детали, а также распределение температуры от шлифуемой поверхности вглубь металла.

Для измерения осредненной контактной температуры шлифования используются искусственные термопары. Например, две проволоочки диаметром 0,1 мм располагали одну строго над другой. Электроды изолируются прокладками слюды толщиной 0,02 мм и располагаются между двумя пластинками образца материала. Для размещения комплекта из проволок термопары и слюды в нижней пластине обрабатываемого материала вышлифовывается канавка тонким алмазным кругом. При шлифовании абразивные зерна стягивают на обрабатываемую поверхность металл электродов и образуют горячий спай термопары. Обоснованием метода служит закон промежуточных металлов, который гласит, что «алгебраическая сумма термо-ЭДС в электрической сети, состоящей из любого числа проводников из разнородных металлов, находящихся при одной и той же температуре, равна нулю».

Эффективность абразивного шлифования определяется по следующим показателям:

- 1) производительность процесса обработки, определяемая объемом снятого материала $Q_M, \text{мм}^3 / \text{мин}$;
- 2) износ инструмента, определяемый расходом абразивного круга $Q_a, \text{мм}^3 / \text{мин}$;
- 3) удельная производительность процесса обработки $g = Q_M / Q_a$;
- 4) период стойкости инструмента $T, \text{мин}$;
- 5) шероховатость обработанной поверхности $Ra, \text{мкм}$.

Удельная производительность обработки алмазным инструментом определяется количеством снятого (сошлифованного) материала, приходящегося на единицу массы или объема израсходованных зерен:

$$g = \frac{G_M}{G_3} \text{ (г/мг) или } g = \frac{Q_M}{Q_3} \text{ (см}^3\text{/мг),}$$

где D_M, Q_M — соответственно масса и объем снятого материала; D_3, Q_3 — масса и объем израсходованных зерен.

Удельная производительность — важный показатель эффективности процесса, хотя и не отражает полностью условия обработки. В связи с этим часто используются такие критерии, как период стойкости инструмента, шероховатость обрабатываемой поверхности, а также различные дополнительные критерии: силы и мощности резания, температура шлифования и др.

В отдельных случаях за критерий эффективности шлифовальных кругов принимают способность его режущей поверхности внедряться в обрабатываемый материал под действием нормальной силы P_y . Иногда в качестве основного показателя процесса шлифования используют коэффициент шлифования P_z / P_y , характеризующий процесс более полно по

сравнению с другими показателями, взятыми в отдельности (удельная производительность, съем материала, мощность и др.).

Расчетный минутный съем материала - $Q_p = v_d S_{\pi} S_{\pi p}$,

где v_d — скорость детали; S_{π} — подача в направлении снятия припуска; $S_{\pi p}$ — продольная подача.

Однако фактический минутный съем Q_{ϕ} всегда меньше его расчетного значения Q_p , определяемого заданным режимом обработки.

Отношение $Q_{\phi}/Q_p < 1,0$ характеризует эффективность реального процесса шлифования. При шлифовании труднообрабатываемых сплавов в ряде случаев эффективность шлифования $Q_{\phi}/Q_p < 0,5$. Фактический минутный съем при шлифовании

$$Q_{\phi} = \varepsilon v_d S_{\pi} S_{\pi p}$$

где ε — коэффициент эффективности шлифования.

На эффективность шлифования влияют:

1) нормальная составляющая P_y силы резания, жесткость j технологической системы и толщина δ слоя материала, снимаемого с детали, влияние которых учитывается показателем эффективности шлифования

$$\varepsilon_{\Delta} = 1 - P_y / (j\delta);$$

2) удельная производительность процесса g и отношение K_c площади обрабатываемой поверхности детали к площади рабочей поверхности шлифовального круга, влияние которых учитывается показателем

$$\varepsilon_{\tau} = g / (g + K_c);$$

3) период стойкости T шлифовального круга и время его правки τ , влияние которых учитывается показателем эффективности шлифования

$$\varepsilon_{\tau} = T / (T + \tau) /$$

В реальном процессе шлифования значение каждого из показателей эффективности процесса ($\varepsilon_j, \varepsilon_{\Delta}, \varepsilon_{\tau}$), действующих одновременно и независимо друг от друга, всегда меньше единицы, и это является причиной снижения фактической производительности.

В соответствии с отдельными составляющими эффективности процесса шлифования фактический съем материала определяется по формуле

$$Q_{\phi} = \varepsilon_j \varepsilon_{\Delta} \varepsilon_{\tau} Q_p = \left(1 - \frac{P_y}{j\delta}\right) \left(\frac{g}{g + K_c}\right) \left(\frac{T}{T + \tau}\right) v_d S_{\pi} S_{\pi p}$$

По приведенной формуле легко определить пути повышения производительности процесса шлифования: повышение жесткости

технологической системы, увеличение размера одновременно обрабатываемых поверхностей детали, снижение времени на правку круга и др.

Выбор абразивного инструмента основан на производственном опыте и многочисленных исследованиях рекомендуется для шлифования сталей, ковкого чугуна и заточки режущего инструмента применять электрокорунд, для серого чугуна, бронзового и алюминиевого литья — карбид кремния черный, для твердых сплавов — карбид кремния зеленый или черный.

Круги с более крупным зерном выбираются при черновом шлифовании, а также при обработке мягких и вязких металлов, чтобы предотвратить засаливание. Зернистость абразивных зерен 12, 16, 20, 25, 32 и 40 обеспечивает хорошее качество обработанной поверхности при шлифовании большинства деталей общего машиностроения и заточке инструмента. Для грубых работ выбирают зернистость 50 и выше, а для обеспечения высокой точности и низкой шероховатости зернистость должна составлять 3...10.

Наибольшее распространение в абразивных кругах получила керамическая связка. Вулканитовая и бакелитовая связки применяются для точных чистовых работ, а также для изготовления тонких кругов, предназначенных для разрезания деталей.

Алмазные круги в промышленности наиболее широко применяются на связках Б1, Б2 и Б3. Круги на связке Б1 обеспечивают высокую производительность и умеренный расход алмазов на доводочных операциях и при чистовом шлифовании твердых сплавов и хрупких материалов. Однако эту связку, как и другие бакелитовые связки, не рекомендуется использовать при интенсивных режимах резания, так как она чувствительна к воздействию высоких температур, с повышением которых резко возрастает расход алмазов.

Для обеспечения низкой шероховатости обработанной поверхности (до $Ra = 0,04...0,02 \text{ мкм}$) рекомендуется применять алмазные круги на связках Б1 и Б3, а в случае обработки деталей повышенной точности, например профильных, резьбовых и других, когда требуется высокая размерная стойкость инструмента, — алмазные круги на связке Б2.

Круги на связке М1 применяются для шлифования деталей из керамики, стекла и других хрупких материалов. Для обработки твердосплавных деталей штампов и пресс-форм рекомендуются круги на связке М5. Режущая поверхность этих кругов имеет открытую пористую структуру. Алмазные зерна более обнажены, чем в связке М1, а удельный расход алмазов для кругов на связке М5 при заточке твердых сплавов в 1,5-3 раза меньше по сравнению с кругами на связке М1.

Повышенными износостойкостью и режущей способностью обладают круги на связках М013, МС1, М5-4, МС6, МВ1 и др. Кругами на

металлосиликатных связках МС6 и МС1 можно обрабатывать твердые сплавы без охлаждения.

Из керамических связок наиболее часто применяются связки К1 и К5. Их основой являются легкоплавкое стекло и огнеупорная глина. В качестве наполнителя используется порошок карбида бора. Алмазные круги на керамических связках К1 и К5 предназначены для обработки твердосплавных пластин одновременно с обработкой стальной державки.

Твердость кругов должна обеспечивать частичное самозатачивание их в работе. Чем тверже обрабатываемый материал, тем скорее режущие зерна круга затупляются, тем мягче должен быть шлифовальный круг. Крупнозернистые круги должны иметь более высокую твердость, так как на каждое зерно приходится большая сила, чем на зерна мелкозернистых кругов. При выборе твердости круга следует учитывать одно важное обстоятельство: истинная твердость круга в процессе шлифования во многом зависит от скорости его вращения. С повышением скорости круг приобретает так называемую динамическую твердость, т.е. ведет себя в процессе резания как более твердый.

Почти все операции шлифования обеспечиваются кругами твердостью М2...СТ3, а именно: заточка твердого сплава и быстрорежущей стали — М3...СМ2, обдирочное шлифование — СТ1...СТ3, получистовое и чистовое шлифование — М2...С2.

Пористость шлифовального круга должна быть тем больше, чем пластичнее обрабатываемый материал, больше глубина шлифования и длина дуги контакта круг — деталь. Правильно подобранная структура круга предохраняет его от засаливания, т.е. обеспечивает хороший выход стружки. Для круглого наружного, внутреннего, плоского шлифования периферией круга и для заточки инструмента из быстрорежущей стали рекомендуется использовать круги структуры № 5, 6, для плоского шлифования торцом круга, отрезания и шлифования твердых сплавов — № 7-9, для фасонного шлифования — № 3, 4.

Выбор оптимального режима резания при шлифовании следует считать режим, который обеспечивает высокую производительность, наименьшую себестоимость и получение требуемого качества шлифованной поверхности. Для определения режима шлифования следует:

- 1) выбрать характеристику шлифовального круга и установить его окружную скорость v_k ;
- 2) назначить подачу в направлении снятия припуска (поперечную подачу) и определить число проходов, обеспечивающих снятие всего припуска. Подача варьируется в пределах 0,005...0,09 мм за двойной ход.
- 3) назначить продольную подачу при круглом шлифовании и подачу вдоль оси шлифовального круга при плоском шлифовании в долях ширины

круга $S_{пр} = KB$, где $K = 0,04...0,06$ для чернового шлифования; $K = 0,3...0,4$ для чистового шлифования;

4) выбрать окружную скорость детали. При черновом шлифовании следует исходить из установленного периода стойкости круга ($T = 0,25...60 \text{ мин}$), а при чистовом — из обеспечения заданной шероховатости поверхности. Обычно скорость детали находится в пределах 40...80 м/мин;

5) подобрать охлаждающую жидкость;

6) определить силы резания и мощность, необходимые для обеспечения процесса шлифования. Мощность (в киловаттах), необходимая для вращения круга, $N_k \geq P_z v_k / (\eta \cdot 10^3)$, а для вращения детали $N_d \geq P_z v_d / (\eta \cdot 60 \cdot 10^3)$;

7) выбранные режимы шлифования скорректировать по паспорту станка; при нехватке мощности уменьшают v_d или $S_{пр}$, так как они влияют на мощность резания N_k и основное время t_0 ;

8) проверить условия бесприжогового шлифования по удельной мощности, приходящейся на 1 мм ширины круга: $N_{уд} = N_k / B$. Она должна быть меньше допустимой удельной мощности, приводимой в справочной литературе;

9) подсчитать машинное время согласно таблице 3.2.1.

Таблица 3.2.1. Расчет машинного времени при шлифовании

Вид шлифования	Машинное время
1	2
Круглое наружное в центрах с продольной подачей	$t_0 = \frac{l}{n_d S_{пр} S_{п}} K_3$, где l — шлифования, мм; h — припуск, мм; $S_{п}$ — подача в направлении снятия припуска (поперечная подача) мм; K_3 — коэффициент зачистных ходов, равный для чистового и чернового шлифования соответственно 1,25...1,7 и 1,2...1,4.
Круглое наружное в центрах с поперечной подачей (врезное)	$t_0 = \frac{l}{n_d S_{п}} K_3 = \frac{h}{n_d S_{п}} K_3$, где $S_{п}$ — поперечная подача/об; K_3 — 1,4...2,5

Продолжение таблицы 3.2.1.

1	2
Бесцентровое напроход	$t_0 = \frac{lq + B_k}{qS_{\text{пр}}} i K_3$, где q - количество деталей в партии, шт., шлифуемых непрерывным потоком; B_k - ширина круга, мм; i - число проходов; K_3 - 1,05...1,20.
Плоское периферией круга	$t_0 = \frac{L}{1000v_d} \cdot \frac{Hh}{S_{\text{п}}t} K_3$, $H = B_d + B + 5$ мм; $L = L_d + (10...15)$ мм; H - перемещение круга в направлении поперечной подачи, мм; B_d - ширина детали, мм; $K_3 = 1,15...1,35$ и $K_3 = 1,25...1,15$ для чистового и чернового шлифования соответственно.

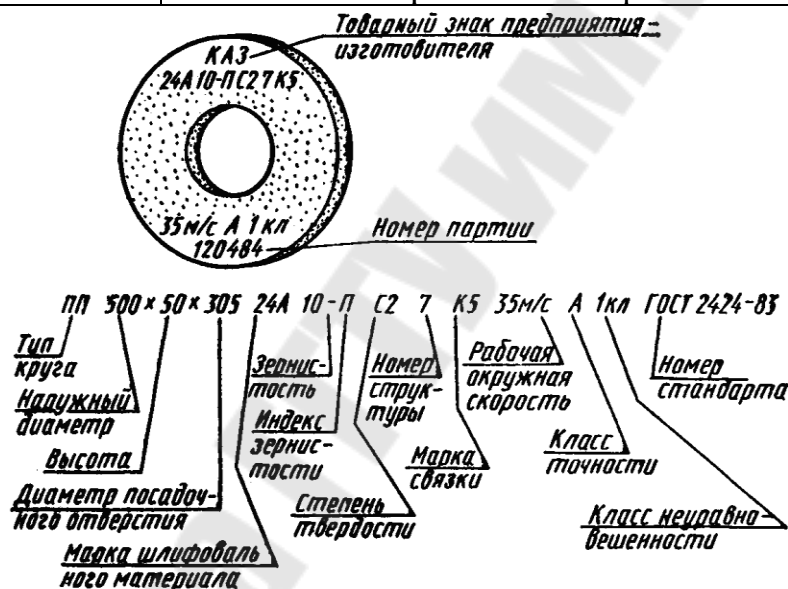


Рис. 3.2.1. Обозначение абразивного круга (материал белый корунд):

ПП 500x50x305 24А 10-П С2 7 К5 35м/с 1 кл.А;

ПП – тип круга (плоский прямого профиля);

500 – диаметр круга $D=500$ мм;

50 – высота круга $H=50$ мм;

305 – диаметр посадочного отверстия $d=305$ мм;

24А – материал абразива – белый корунд марки 24А;

10—П – зернистость;

С2 – твердость, 7 – структура №7;

К5 – керамическая связка марки К5;

35 м/с – рабочая скорость круга;

1 кл.А – 1-й класс неуровненности, класс точности А.

РАЗДЕЛ IV

РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ИНСТРУМЕНТОВ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Тема 4.1. Требования, предъявляемые к режущему инструменту

Работоспособность режущего инструмента требуемым условиям процесса резания зависит от сочетания физико-механических свойств инструментальных материалов. Необходимые режущие инструменты должны отвечать условиям их эксплуатации, для которых характерно сочетание высоких нормальных и касательных напряжений и температур в зоне резания, а также наличие трения на контактных поверхностях и вибраций в системе «инструмент – обрабатываемая заготовка». К их числу относятся приведенные ниже свойства.

Твердость. Процесс резания сопровождается внедрением режущего клина инструмента в обрабатываемую заготовку. Эффективность обработки резанием во многом зависит от отношения $H_{ин}/H_{об}$, где $H_{ин}$ – твердость материала режущего инструмента, $H_{об}$ – твердость обрабатываемого материала. Обработка резанием с применением лезвийных режущих инструментов может быть выполнена у деталей, материалом которых являются конструкционные стали и сплавы с твердостью HRC<50. Причем при твердости до HRC 30...40 при обработке могут быть использованы инструменты из быстрорежущих сталей, а выше этих значений – преимущественно из твердых сплавов.

Прочность. Процесс резания сопровождается формированием сил резания, приложенных к рабочим поверхностям инструментов. Под действием сил резания материал рабочей части инструментов должен без разрушения работать при схемах нагружения на изгиб, сжатие, кручение и при других схемах. Большинству конструкций режущих инструментов характерно многократное сочетание схем резания инструментов в процессе резания. Поэтому инструментальные материалы должны обладать определенным сочетанием прочностных свойств. Таким лучшим сочетанием обладают инструментальные стали, для которых, например, отношение их пределов прочности на сжатие и растяжение составляет 1,5...2,1. Худшим сочетанием прочностных характеристик обладают твердые сплавы и другие материалы.

Теплостойкость. Обработка резанием лезвийными инструментами сопровождается формированием температуры в зоне резания 200...1000°C и более. Превышение определенного уровня температуры для каждого инструментального материала сопровождается значительным снижением его твердости и прочностных характеристик.

Из металлических инструментальных материалов наибольшей теплостойкости соответствуют твердые сплавы, а наименьшей – инструментальные углеродистые стали.

Теплопроводность. При формировании повышенных температур в зоне контакта инструмента и срезаемого слоя значительную роль в сохранении режущих свойств инструментов играет отвод тепла из этой зоны в тело инструмента. Такой отвод тепла во многом зависит от физического свойства материала инструмента – его теплопроводности. Значение теплопроводности зависит от химического состава материала и его температуры нагрева.

Износостойкость. Контакт рабочих поверхностей инструментов и срезаемого слоя в условиях взаимного перемещения контактных поверхностей со скоростью 20...100 м/мин и более приводит к изнашиванию рабочих поверхностей инструментов.

Износостойкость может быть оценена отношением

$$B = \frac{A}{m},$$

где A – работа сил трения; m – масса продуктов изношенного инструментального материала.

Процесс изнашивания материалов можно оценить интенсивностью изнашивания $I_{и}$, которая определяется скоростью роста массы m продуктов изношенного материала на пути L , т.е.

$$I_{и} = \frac{dm}{dL}.$$

Необходимые требования износостойкости обеспечивают регулированием физико-механических свойств инструментальных материалов и созданием оптимальных условий эксплуатации режущих инструментов.

Большинство современных процессов обработки резанием требует сочетания многих из перечисленных требований к материалам режущей части инструментов.

Надёжность режущего инструмента – это свойство сохранять во времени и в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность инструмента выполнять свои функции в заданных режимах и условиях применения.

Показатели надёжности:

- *безотказность* – свойство режущего инструмента сохранять работоспособность до наступления предельного состояния с необходимыми перерывами для технического обслуживания и ремонтов.

- *ремонтпригодность* – свойство инструмента, заключающееся в его приспособленности к предупреждению и обнаружению причин возникновения отказов и поддержания и восстановлению работоспособного

состояния путём проведения технического обслуживания и ремонтов, например заточки или замены режущей пластины.

Некоторые показатели надёжности определяются конструкцией инструмента, другие – условиями эксплуатации, т.е. процессом резания. К процессам резания относится показатель безотказности.

Причины отказа следующие:

I – поломка; II – скалывание; III и IV – изнашивание рабочих поверхностей лезвия в нормальных условиях работы и при значительной пластической деформации; V – смятие режущей кромки; VI – схватывание.

Дефектами режущего инструмента являются выкрашивание и трещины.

В процессе резания происходит износ инструмента за счет потери его режущей способности, т.е. истиранием контактных поверхностей на рабочих площадках инструмента; выкрашиванием мельчайших частиц на режущем лезвии, которое характерно для инструментов из более хрупких материалов.

В результате высокого давления, температуры, свойств обрабатываемого материала происходит превалирующее истирание контактных поверхностей инструмента:

- по задней поверхности (первый вид износа);
- по передней поверхности (первый вид износа);
- по передней и задней поверхностям одновременно (второй вид износа).

Причины износа по передней поверхности A_α :

- 1) при малых толщинах среза радиус округления режущего лезвия соизмерим с толщиной среза;
- 2) при тонкой стружке возрастает относительное значение упругой деформации поверхностного слоя ($h_{упр}$);
- 3) путь трения по задней поверхности больше, чем по передней (из-за наличия усадки стружки).

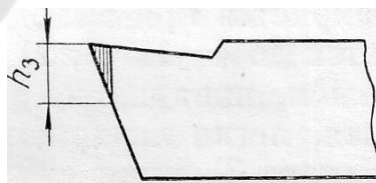


Рис. 4.1.1. Износ по задней поверхности (h_3)

Износ по задней поверхности (рис. 4.1.2) обычно наблюдается при обработке сталей с малой толщиной среза (не более 0,15 мм) и низкими скоростями резания, а также при обработке чугуна. Очертания площадки износа в сечении главной секущей плоскостью приблизительно копируют форму поверхности резания. Вдоль главного лезвия ширина площадки износа в общем случае неодинакова. Максимальная ширина площадки

износа наблюдается на переходной задней поверхности или в месте перехода главного лезвия во вспомогательное.

Затупление по задней поверхности наблюдается при работе протяжками, метчиками, зуборезными долбьями, фасонными резцами. Эти инструменты работают на низких скоростях резания и при малых толщинах среза.

Преимущественный износ по передней поверхности (рис. 4.1.2) наблюдается в случае большого удельного давления на контактной площадке, когда возникает высокая температура. Эти условия бывают при обработке стали без охлаждения с высокими скоростями резания и большими толщинами среза ($a > 0,5 \text{ мм}$). При обработке сталей без охлаждения быстрорежущие резцы изнашиваются в основном по передней поверхности, а при работе с охлаждением, износ происходит как по передней, так и по задней поверхностям.

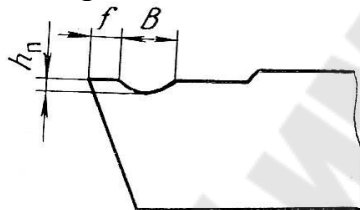


Рис. 4.1.2. Износ по передней поверхности

Износ резцов по передней поверхности происходит следующим образом. В процессе резания ширина B и глубина лунки h_n постепенно увеличивается. При этом ширина лунки растёт быстрее в сторону, противоположную режущему лезвию резца. Кривизна лунки постепенно уменьшается, а площадка износа увеличивается, и когда ширина перемычки f достигнет нуля, наступает полный, или катастрофический, износ инструментов.

На практике чаще всего наблюдается одновременный износ инструмента по задней и передней поверхностям (рис. 4.1.3). Он является наиболее общим видом износа. Кроме того, происходит округление режущего лезвия инструмента. Таким образом, в зависимости от скорости резания, толщины среза и других факторов изменяется характер износа режущих инструментов.

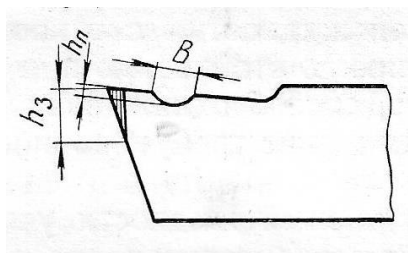


Рис. 4.1.3. Износ по задней и передней поверхности одновременно

Основной мерой величины износа для большинства инструментов в производственных условиях является ширина изношенной площадки по задней поверхности зуба h_z , а для инструментов с преобладающим износом по передней поверхности – глубина h_n и ширина лунки B . Износ зубьев инструментов h_z и B измеряют с помощью луп или специальных микроскопов с точностью до 0,02...0,05 мм. Для измерения глубины лунки пользуются индикатором. Эти измерения называются микрометрическими.

Причины, приводящие к изнашиванию контактных поверхностей инструмента следующие:

- а) абразивное действие, оказываемое обрабатываемым материалом (абразивное изнашивание);
- б) адгезионное взаимодействие между инструментальным и обрабатываемым материалами (адгезионное изнашивание);
- в) диффузионное растворение инструментального материала в обрабатываемом материале (диффузионное изнашивание);
- г) химические процессы, происходящие на передней и задней поверхностях (окислительное изнашивание).

Абразивное изнашивание происходит при трении поверхности резания о заднюю поверхность и стружки о переднюю, поверхность инструмента твёрдые микрокомпоненты материала обрабатываемой детали царапают материал инструмента, постоянно разрушая его. Интенсивность абразивного изнашивания возрастает при увеличении содержания в сталях цементита (HB800) и сложных карбидов, в чугунах цементита и фосфидов, в жаропрочных сплавах интерметаллидов, которые сохраняют высокую твёрдость даже при высоких температурах резания. Контактные поверхности инструмента могут также царапать частицы периодически разрушающегося нароста, твёрдость которого значительно превосходит твёрдость материала обрабатываемой детали. Особенно сильно изнашивается задняя поверхность, на которой появляются углубления в виде канавок, перпендикулярных к главному лезвию.

Абразивное изнашивание усиливается при резании в химически активных средах, ослабляющих сопротивляемость контактных поверхностей инструмента царапанию. Абразивное действие обрабатываемого материала становится тем сильнее, чем меньше отношение H_n / H_m . Вследствие этого абразивное изнашивание заметнее проявляется при работе инструментами из углеродистых и быстрорежущих сталей и в меньшей степени при работе твёрдосплавными инструментами, твёрдость которых значительно выше.

Адгезионный износ связан с процессами схватывания (сваривания) отдельных микроучастков поверхностей инструмент-стружка под воздействием высоких давлений и температуры при непрерывном перемещении стружки по инструменту, благоприятствующем образованию

зон сварки под давлением. Созданию таких зон способствует шероховатость поверхности инструмента.

Закономерность износа приближённо определяется зависимостью

$$vT \approx \text{const} \left(\frac{H_u}{H_m} \right)^z,$$

где v - скорость резания; T - стойкость инструмента; H - твёрдость инструмента, заготовки; z - показатель степени износа.

Адгезионный износ особенно возрастает при скоростях резания, способствующих наростообразованию. При малых скоростях резания нарост не образуется, при увеличении скорости резания до 10-20 м/мин происходит интенсивное наростообразование, при дальнейшем повышении скорости резания нарост не образуется.

По интенсивности протекания адгезионного изнашивания инструментальные материалы различно реагируют на изменение температуры резания. Износ инструментов из быстрорежущих сталей до температур 500⁰С остаётся почти постоянным или уменьшается при увеличении температуры резания. При нагреве твёрдых сплавов их хрупкость уменьшается, что способствует повышению сопротивляемости контактными нагрузкам. Поэтому в интервале температур 500⁰-700⁰С повышение температуры резания уменьшает износ твёрдосплавных инструментов.

Адгезионный износ инструмента можно уменьшить, применяя жидкости, создающие на контактных поверхностях защитные плёнки, уменьшающие силы адгезии и препятствующие схватыванию обрабатываемого и инструментального материалов. Например, применение химически активных жидкостей, для твёрдосплавных инструментов.

Изнашивание инструмента при температурах выше 800-850⁰С происходит в результате *диффузионного* растворения инструментального материала в обрабатываемом, а разрушение поверхностных слоёв инструмента происходит в результате структурных превращений, которые приводят к их разупрочнению.

В процессе резания высокие температура и давление в зоне контакта, интенсивная адгезия, большие пластические деформации способствуют взаимному диффузионному растворению компонентов, повышая их химическую активность. Стружка и обрабатываемая поверхность перемещаются относительно инструмента непрерывно и с большой скоростью. При этом в контакт входят все новые и новые участки поверхности обрабатываемого материала, и скорость взаимного растворения высока.

Различные компоненты твёрдого сплава диффундируют в обрабатываемый материал с различной скоростью: наиболее быстро –

углерод, менее быстро – вольфрам, кобальт и титан. Одновременно в твёрдый сплав диффундирует железо. Это приводит к образованию между инструментом, стружкой и поверхностью резания трёх диффузионных слоёв. Наиболее удалённым от контактных поверхностей является науглероженный слой, под ним лежит слой белого цвета, представляющий собой твёрдый раствор углерода и вольфрама или углерода, вольфрама и титана в γ -железе. Третий слой является интерметаллидом в виде железувольфрамового или более сложного карбида. Этот слой более хрупкий и разупрочненный, что приводит к срезу с контактных поверхностей инструмента слоёв инструментального материала движущимися стружкой и поверхностью резания.

Скорость резания (v_e) – наибольшая скорость перемещения режущей кромки относительно заготовки (измеряется в м/мин). Стойкость – это время достижения допустимой величины износа инструмента. На стойкость инструмента влияют скорость резания, подача и глубина резания. Меняя данные параметры, мы можем добиться наилучшего результата для обработки резанием. Скорость резания в свою очередь оказывает большое влияние на износ инструмента. Слишком высокая скорость резания вызывает интенсивный износ по задней поверхности, низкое качество обработанной поверхности, быстрое лункообразование, пластическую деформацию. При низкой скорости происходит наростообразование и снижение эффективности обработки.

Исходя из этого, при обработке резанием необходимо добиться оптимального сочетания производительности обработки и стойкости инструмента. Недостаточная стойкость инструмента увеличивает простои оборудования при замене инструмента, что приводит к снижению производительности. Если выбран слишком щадящий режим резания, то стойкость инструмента возрастет, но время обработки детали увеличится, что так же снижает эффективность использования оборудования и общую производительность. Для обеспечения эффективности обработки необходимо не только правильно выбрать инструмент, но и подобрать оптимальные параметры режима резания, о чем мы сегодня и поговорим.

Скорость резания выбирается в соответствии с определенными значениями глубины резания, подачи и стойкости режущего инструмента, геометрических параметров режущей части. Скорость резания назначается по соответствующим нормативам режимов резания или подсчитывается по эмпирическим формулам. После выбора всех трех элементов режима резания проверяется их соответствие мощности станка по формуле.

1. При большей стойкости инструмента, скорость должна быть меньше.
2. Скорость резания материалов следует уменьшить при работе с твердыми металлами с целью сохранения стойкости режущего инструмента,

поскольку последняя будет уменьшаться с повышением твердости обрабатываемых заготовок. Если работа ведется с коваными или литыми изделиями, покрытыми окалиной, коркой или имеющими раковину, надо уменьшить скорость резания на токарном станке. Расчет ведется от оптимальной скорости обработки данного металла, но без поверхностных корок.

3. Стойкость режущего инструмента во многом зависит от характеристик материала, из которого он изготовлен. А значит, они будут влиять и на скорость резания. Если рассматривать одинаковые условия использования резцов, то наибольшая скорость будет у приспособлений из твердых сплавов, чуть меньшая у инструмента, выполненного из быстрорежущей стали. Наименьшая скорость эксплуатации у насадок из углеродистой стали.

4. Работа с вязкими материалами требует предварительного охлаждения режущих поверхностей инструмента. Это позволяет увеличить стойкость одинаковых резцов от 15 и до 25 % в сравнении с неохлажденными.

5. На скорость резания влияют размер режущей поверхности и углы заточки. Массивность головки резца помогает лучше отводить тепло, которое неминуемо появляется в момент резки. Следует правильно выбирать углы заточки инструмента, поскольку иначе придется прикладывать большее усилие при обработке, что ведет к ускоренному износу резца.

6. Чем больше сечение среза, тем меньшую скорость необходимо выбирать для работы, поскольку стойкость резца падает и наоборот.

Тема 4.2. Инструментальные материалы

Для изготовления режущих инструментов используются различные виды инструментальных материалов.

Углеродистые инструментальные стали, это стали с повышенным содержанием углерода - 0,6...1,4%. Маркировка этих сталей состоит из буквы «У» от слова «углеродистая» и цифры, выражающей количество в стали десятых долей процента углерода. Основные марки углеродистых инструментальных сталей: У7, У8, У9, У10, У11, У12 и У13. Это стали обыкновенного качества. Высококачественная углеродистая сталь отличается по маркировке, тем, что к обозначению стали приписывается буква «А». Содержание в углеродистых сталях легирующих элементов не превышает 0,3%.

Углеродистые инструментальные стали имеют относительно невысокую поверхностную твердость **HRC 60...63**, в глубинных слоях

вследствие низкой прокаливаемости твёрдость снижается до **HRC 40**. Они имеют в связи с этим низкую износостойкость. Теплостойкость углеродистых сталей 200⁰...250⁰С. Кроме того, эти стали при термообработке склонны к поводке и трещинообразованию. Теплопроводность углеродистых сталей составляет $\lambda = 0,63 \text{ Дж/см} \cdot \text{с} \cdot ^\circ \text{С}$.

Из углеродистых инструментальных сталей изготавливают различные слесарные и кузнечные инструменты, режущие инструменты для дерева, кожи, бумаги, резины, пластических масс, инструменты, работающие с ударной нагрузкой, корпуса и державки сборных и составных инструментов с пластинами твёрдого сплава, штампы. Режущие инструменты для обработки металла изготавливают из сталей с повышенным содержанием углерода /U10A...U13A/. Однако такие инструменты могут работать с малыми скоростями резания до 8...10 м/мин и с ручным приводом. Например, сталь U12A содержит 1,2% углерода (A – высокое качество стали, т.е. пониженное содержание серы и фосфора).

Режущие инструменты, изготовленные из углеродистых инструментальных сталей U10A, U11A, U12A, U13A, обладают достаточной твердостью, прочностью и износостойкостью при комнатной температуре, однако теплостойкость их невелика. При температуре 200...250⁰С их твердость резко уменьшается. Поэтому они применяются для изготовления ручных и машинных инструментов, предназначенных для обработки мягких металлов с низкими скоростями резания, таких, как напильники, мелкие сверла, развертки, метчики, плашки и др. Углеродистые инструментальные стали имеют низкую твердость в состоянии поставки, что обеспечивает их хорошую обрабатываемость резанием и давлением. Однако они требуют применения при закалке резких закалочных сред, что усиливает коробление инструментов и опасность образования трещин.

Инструменты из углеродистых инструментальных сталей плохо шлифуются из-за сильного нагревания, отпуска и потери твердости режущих кромок. Из-за больших деформаций при термической обработке и плохой шлифуемости, углеродистые инструментальные стали, не используются при изготовлении фасонных инструментов, подлежащих шлифованию по профилю.

Легированные инструментальные стали – это такие стали, в состав которых входят в количестве от 0,5% до 10% и более легирующие элементы, такие как хром (X), марганец (Г), кремний (С), вольфрам (В), ванадий (Ф), никель (Н), азот (А), и др. Маркировка их составляет из букв русского алфавита, обозначающих легирующие элементы, преимущественно в той последовательности, в какой они даны в перечислении. Цифра, стоящая после буквы, обозначает содержание данного химического элемента в процентах. Начальная цифра указывает на процентное содержание углерода

в десятых и в сотых долях процента. Например: 9ХС – хромокремнистая сталь с содержанием углерода 0,9%, а хрома и кремния – около 1%.

Основные марки легированных сталей: Х05, 9ХС, Х6ВФ, 9ХВГ, Х12, Х1214, ХВ5, Х12Ф1, 95ХГСВФ.

Легированные инструментальные стали обладают по сравнению с углеродистыми сталями несколько большими износостойкостью и твёрдостью. Например: **ХВ5-НRC-70**; их теплостойкость составляет 350...400⁰С, благодаря чему они допускают скорость резания в 1,5 раза большую, чем углеродистые стали. Теплопроводность легированных сталей $\lambda = 0,42 \text{ Дж/см} \cdot \text{с} \cdot ^\circ \text{С}$.

Из легированной стали изготавливаются протяжки, метчики, плашки, зенкеры, развёртки, ножовочные полотна, штампы, в общем, любой инструмент с машинным приводом, работающий на невысоких скоростях резания (до 12...15 м/мин).

Быстрорежущая сталь – это высоколегированные стали, т.е. стали с высоким содержанием легирующих элементов (от 5% до 20%). Маркировка этих сталей начинается с русской буквы Р, после которой указывается процентное содержание вольфрама. Далее следует буквенное обозначение остальных легирующих элементов и их процентное содержание (Р18 – 18% вольфрама, 1% - углерода).

Инструменты, изготовленные из быстрорежущих сталей, имеют высокую твёрдость **НRC 60...68**, повышенную теплостойкость 600...650⁰С и хорошие показатели прочности и износостойкости. Вследствие этого, быстрорежущие стали могут допускать обработку со скоростями резания $v = 20...50 \text{ м/мин}$. При работе же в режиме низких скоростей, свойственных легированным сталям, инструмент из быстрорежущей стали имеет стойкость в 4...8 раз большую, чем стойкость инструментов из легированных сталей. Теплопроводность быстрорежущих сталей $\lambda = 0,21 \text{ Дж/см} \cdot \text{с} \cdot ^\circ \text{С}$.

Из быстрорежущей стали изготавливают фасонный и сложнопрофильный инструмент, сверла, зенкеры, развёртки, плашки, метчики, всевозможные фрезы, протяжки и зуборезный инструмент.

Быстрорежущие стали повышенной производительности используются в основном, при обработке жаропрочных сплавов, высокопрочных и нержавеющей сталей, других труднообрабатываемых материалов и конструкционных сталей с повышенными режимами резания. В настоящее время применяются кобальтовые и ванадиевые быстрорежущие стали.

Твёрдым сплавом называется продукт спекания при высокой температуре и давлении порошковых масс карбидов тугоплавких металлов (вольфрама, титана, тантала) и кобальта. Кобальт в твёрдом сплаве содержится в небольших количествах и играет роль связующего материала.

Вязкость и прочность твёрдого сплава во многом зависят от процентного содержания кобальта.

Твёрдый сплав на основе карбида вольфрама подразделяется на три группы:

1) однокарбидный твёрдый сплав вольфрамокобальтового состава (группы ВК).

2) двухкарбидный твёрдый сплав вольфрамотитанокобальтового состава (ТК).

3) трёхкарбидный твёрдый сплав титанотанталовольфрамокобальтового состава (группа ТТК).

Маркирование твёрдого сплава осуществляется следующим образом: после каждой буквы в обозначении группы ставится цифра, выражающая процентное содержание обозначенного элемента. Исключение из этого правила составляет трёхкарбидный твёрдый сплав группы ТТК, в котором цифра, стоящая после второй буквы Т, выражает процентное содержание карбидов двух предыдущих металлов. Иногда в конце маркировки можно встретить буквы М или В, означающие соответственно мелкозернистую или крупнозернистую структуры.

Основные марки твёрдых сплавов:

1) Однокарбидных: ВК-2, ВК-3, ВК-4, ВК-6, ВК-8, ВК-10, ВК-12, ВК-15, ВК-20, ВК-30.

2) Двухкарбидных: ТКК10, Т14К8, Т15К6, Т30К4, Т5К12В, Т60К6.

3) Трёхкарбидных: ТТ7К12, ТТ10К8А, ТТ10К8Б, ТТ20К9.

ВК8 – 8% кобальта, 92% карбидов вольфрама.

Т15К6 – 6% кобальта, 15% карбидов титана, 79% карбидов вольфрама.

ТТ7К12 – 12% кобальта, 7% карбидов титана и тантала, 81% карбидов вольфрама.

Твёрдый сплав по своим свойствам резко отличается от свойств быстрорежущей стали. Его твердость составляет **HRA** – 87...92, теплостойкость определяется температурой: для однокарбидных сплавов – 800⁰С, для двух и трёхкарбидных – 900⁰...1000⁰С. Твёрдый сплав обладает очень хорошей износостойкостью. Прочность твёрдого сплава характеризуется следующими величинами:

$$\sigma_H = 100...130 \text{ кгс / мм}^2 (981 \text{ МПа}...1275 \text{ МПа});$$

$$\sigma_{сж} = 400 \text{ кгс / мм}^2 (3924 \text{ МПа}).$$

Теплопроводность твёрдого сплава составляет $\lambda = 0,27...0,59 \text{ Дж / см} \cdot \text{с} \cdot ^0 \text{ С}.$

Твёрдый сплав применяется для изготовления любого по сложности инструмента, работающего на повышенных скоростях резания. Скорость

резания может быть установлена при обработке твёрдосплавным инструментом до 500 м/мин (*T15K6*) и до 1000 м/мин (*T30K4*).

Для создания сложнопрофильного режущего инструмента в последнее время выпускается мягкий полуспеченный пластифицированный твёрдый сплав, который подвергается механической обработке лезвийным инструментом. После обработки резанием получения необходимых поверхностей и размеров производится окончательное спекание твёрдосплавных заготовок без нарушения ранее образованных поверхностей.

Заточка твёрдосплавных пластин осуществляется шлифовальными кругами из зелёного карбида кремния на керамической связке или алмазным кругом. После заточки рекомендуется доводка мелкозернистым алмазным кругом, алмазной пастой или пастой карбида бора на чугунных притирах.

Пластинки твердого сплава крепят к державке или корпусу напайкой или механически при помощи винтов и прижимов. Наряду с этим в машиностроительной промышленности применяют мелкогабаритные, монолитные твёрдосплавные инструменты, состоящие из твёрдых сплавов. Их изготавливают из пластифицированных заготовок. В качестве пластификатора в порошок твердого сплава вводят парафин до 7...9 %. Из пластифицированных сплавов прессуют простые по форме заготовки, которые легко обрабатываются обычным режущим инструментом. После механической обработки заготовки спекают, а затем шлифуют и затачивают. По такой технологии изготавливают мелкие сверла, зенкеры, развертки и т. п.

Одним из путей повышения эксплуатационных характеристик твёрдых сплавов является нанесение на режущую часть инструмента тонких износостойких покрытий на основе нитрида титана, карбида титана, нитрида молибдена, окиси алюминия. Толщина наносимого слоя покрытия колеблется от 0,005 до 0,2 мм. Опыты показывают, что тонкие износостойкие покрытия приводят к значительному росту стойкости инструмента.

Минералокерамика – новый инструментальный материал, получаемый прессованием, спеканием с последующей термообработкой технического глинозема (окиси алюминия Al_2O_3) с небольшой добавкой окиси магния **MgO**. Этот материал называется также корундом. Существует (в пределах бывшего СССР) два вида: микролит *ЦМ332* и термокорунд *ЦВ14*.

Минералокерамика имеет следующие показатели: твёрдость **HRA** 86...93, теплостойкость 1100...1200°C и высокую износостойкость. Поэтому она используется при резании со скоростями 500...4000 м/мин (при чистовом и тонком точении твёрдых и закалённых сталей и чугуна). Минералокерамика ценна, также химической инертностью по отношению к обрабатываемым материалам (отсутствие химического родства), в особенности к чёрным металлам, т.к. в её состав входит ни один химический

элемент стали. Это не относится к обработке алюминия, т.к. в связи с наличием в минералокерамике алюминия, обработка алюминиевых сплавов минералокерамическим режущим инструментом затруднена из-за сильного налипания стружки на передней поверхности инструмента.

Наиболее редкое преимущество минералокерамики по сравнению с другими инструментальными материалами является исключительно малая стоимость (в 10 раз дешевле твёрдого сплава).

К существенным недостаткам минералокерамики относится низкая прочность, в особенности изгибная прочность, которая в 4...5 раз ниже, чем у твёрдого сплава и в 10...12 раз уступает, прочности быстрорежущей стали.

Показатели прочности минералокерамики следующие:
 $\sigma_n = 30...40 \text{ кгс} / \text{мм}^2 (294 \text{ МПа}...3924 \text{ МПа})$, $\sigma_{см} = 250 \text{ кгс} / \text{мм}^2 (2452 \text{ МПа})$,
 $a_H = 0,05 \text{ кгс} / \text{см}^2 (981 \text{ МПа})$.

В связи с высокой хрупкостью режущий инструмент, выполненный из минералокерамики, не может работать при прерывистом резании, при неравномерном припуске, при вибрациях технологической системы, при использовании нежёсткого оборудования, при низких скоростях резания.

Высокая твёрдость и низкая теплопроводность $\lambda = 0,021 \text{ Дж} / \text{см} \cdot \text{с} \cdot ^\circ \text{C}$ минералокерамики создают определённые трудности при её заточке.

Минералокерамику марок ВОК-60, ВОК-63 используют при фрезеровании закаленной стали и высокопрочных чугунов.

Новым инструментальным материалом, созданным на основе нитрида кремния, является силинит-Р. Он используется при чистовом точении сталей, чугуна, алюминиевых сплавов.

Минералокерамика успешно может применяться для чистового обтачивания чугуна, сталей, неметаллических материалов и цветных металлов с большими скоростями и ограниченным числом перерывов в работе.

Алмаз – кристаллическая разновидность углерода. Кристаллы природного (естественного) алмаза имеют форму октаэдров, ромбододекаэдров, гексаэдров (кубов), кривогранных кристаллов.

Применение алмаза в качестве инструментального режущего материала обусловлено следующим:

1) Алмаз имеет самую высокую твёрдость из всех известных в природе тел. Его твёрдость в 4...5 раз выше твёрдости металлокерамических твёрдых сплавов, что в переводе на шкалу **HRC** составило бы **HRC 300...400**. По шкале Мооса – 10.

2) Алмаз обладает высокой (непревзойдённой) износостойкостью, которая в десятки и сотни раз превосходит износостойкость других инструментальных материалов при обработке цветных металлов и пластмасс.

3) Алмазу свойственна высокая теплопроводность, равная, $\lambda = 1,47 \text{ Дж/см} \cdot \text{с} \cdot ^\circ \text{C}$, что в 7 раз больше теплопроводности быстрорежущей стали. Благодаря этому алмазное лезвие обладает способностью быстро отводить от режущей кромки в себя теплоту резания, не вызывая в поверхностном слое детали прижогов, структурно-фазовых превращений и других дефектов.

4) Алмаз является химически нейтральным материалом по отношению к любому обрабатываемому материалу, отличается в связи с этим низкой адгезионной способностью, малыми коэффициентами трения, более низкими значениями сил резания, меньшим нагревом инструмента.

5) Алмаз обладает большой анизотропией, способствующей получению на алмазе режущих кромок. Поэтому обработка алмазным инструментом позволяет снизить шероховатость обработанных поверхностей по сравнению с инструментом из твёрдого сплава и быстрорежущей стали на 2...3 класса.

6) Алмаз имеет чрезвычайно низкий коэффициент линейного (температурного) расширения, который в 2 раза меньше, чем у твёрдого сплава, и в 10 раз ниже соответствующего коэффициента у быстрорежущей стали. Это позволяет получать устойчивую точность обработки, в особенности длинных деталей.

Однако алмаз обладает такими существенными недостатками как высокая стоимость (в 50 раз дороже твёрдого сплава), большая хрупкость и низкая прочность $\sigma_H = 20...50 \text{ кгс/мм}^2 (200 \text{ МПа}...400 \text{ МПа})$, сравнительно малая теплостойкость (при 750...800 $^\circ\text{C}$ алмаз превращается в графит).

Синтетические алмазы получают по специальной технологии из графита при высоком давлении (1 млн. МПа) и температуре (2500 $^\circ\text{C}$). Полученные таким образом алмазы имеют одинаковые с природными алмазами. Они выпускаются как в виде зёрен (для абразивной обработки), так и в виде отдельных лезвий (для лезвийной обработки).

Искусственные алмазы выпускаются, в основном, трёх марок:

1) *АСО* – алмаз синтетический обычной прочности для изготовления инструментов на органической связке;

2) *АСП* – алмаз синтетический повышенной прочности для изготовления инструмента на металлической и керамической связках;

3) *АСВ* – алмаз синтетический высокой прочности для изготовления инструментов на металлической связке.

Для изготовления лезвийного инструмента в настоящее время применяются сверхтвердые материалы (СТМ): природные алмазы, поликристаллические синтетические алмазы и композиты на основе кубического нитрида бора.

Природные и синтетические алмазы обладают самой высокой твердостью (HV 10000 кгс/мм²), малыми коэффициентами линейного расширения и трения и высокой теплопроводностью, адгезионной стойкостью и износостойкостью. Недостатки алмазов – невысокая прочность на изгиб, хрупкость и растворимость в железе при относительно низких температурах (750°С), что препятствует использованию их для обработки железоуглеродистых сталей и сплавов на высоких скоростях резания, а также при прерывистом резании и вибрациях. Теплостойкость алмаза около 800° С.

Природные алмазы используются в виде кристаллов, закрепляемых в металлическом корпусе резца.

По твердости синтетические поликристаллы лишь незначительно уступают природным монокристаллам алмаза.

Синтетические алмазы маркируются буквами АС. Например: марки АСБ (баллас) и АСПК (карбонадо). Большие скорости резания 1000...1200 м/мин обеспечивают высокую производительность обработки. Их можно использовать не только для точения, но и для фрезерования. Синтетические алмазы менее чувствительны к динамическим нагрузкам и позволяют вести обработку с большим сечением среза (глубиной и подачей).

Природные и синтетические алмазы нашли широкое применение в обработке медных, алюминиевых и магниевых сплавов баббитов, благородных металлов (золота, серебра, палладия, платины), титана и его сплавов, неметаллических материалов (пластмасс, текстолита, стеклотекстолита, органического стекла, прессованного и силицированного графита), а также твердых сплавов и керамики.

Кубический нитрид бора (КНБ) химический состав: 44% бора и 56% азота. По твердости КНБ близок к твердости алмаза, а по теплостойкости (1500°С) значительно превосходит все инструментальные материалы. инертен к железу и углеродистым сплавам. Для изготовления лезвийных инструментов используются поликристаллы КНБ и композиционные материалы, созданные на его основе (композиты). К ним относятся: Эльбор-Р (композит 01), белбор (композит 02), композит 05, ПТНБ (композит 09), гексанит-Р (композит 10), композит 10Д, композит 12. Они синтезируются в виде цилиндрических столбиков диаметром 4...8 мм, высотой 3...6 мм, которыми затем оснащаются режущие инструменты.

Композиты на базе кубического нитрида бора используют для обработки сталей и чугунов различной твердости. Причем чем выше твердость стали или чугуна, а также скорость резания, тем значительнее

преимущество инструментов из композита по сравнению с инструментами из твердого сплава и минералокерамики. При этом обеспечиваются 5...6-й квалитеты точности и шероховатость поверхности $R_a = 0,16...0,08$ мкм, что позволяет во многих случаях заменить операции внутреннего и наружного шлифования.

Новый СТМ – силинит-Р – инструментальный материал на основе нитрида кремния (SiN), обладает $\sigma_{\text{и}} = 49...68$ кгс/мм² и большой твердостью HRA 94...96, стабильностью свойств при высокой температуре. Теплостойкость достигает 1600° С. Для силинита-Р характерно отсутствие адгезии с большинством сталей и сплавов на основе алюминия и меди. Из этого материала изготавливают как напайные, так и неперетачиваемые механически закрепляемые пластины. Используют для выполнения операций получистового и чистового точения различных материалов. При обработке закаленных сталей его применение может заменить шлифование.

Кубический нитрид бора – представляет собой кристаллическую разновидность химического соединения бора и азота (нитрида бора **BN**).

Сверхтвёрдые инструментальные материалы на основе нитрида бора делятся на собственно кубический нитрид бора, т.е. монокристалл, и поликристаллический кубический нитрид бора, т.е. поликристалл. Последний носит следующие названия: эльбор, боразон, кубонит, гексанит. Торговые марки кубического нитрида бора – композит 01, 05 и 10, что соответствует названиям: эльбор, композит, гексанит. Эти материалы превосходят по твёрдости все инструментальные материалы, кроме алмаза. Сверхтвёрдые материалы на основе **BN** имеют непревзойдённую теплостойкость – 1200°...1500°С. Недостаток этих материалов – низкая теплопроводность и невысокая прочность $\sigma_n = 100 \text{ кгс} / \text{мм}^2 (980 \cdot 10^6 \text{ Па})$.

Применяются для шлифовальных работ (шлифпорошки и микропорошки, при точении, сверлении, фрезеровании и др. видах лезвийной обработки). Такой лезвийный инструмент из ПКНБ используется при обработке закалённых сталей, что недоступно алмазу.

В процессе резания режущий инструмент обрабатывает деталь (рис. 4.2.1), где слой металла толщиной a , превращаясь в стружку, соприкасается с передней поверхностью инструмента в пределах площадки контакта **B** шириной **C**.

При этом необходимо, чтобы режущий клин, не деформируясь, мог срезать слой обрабатываемого материала и превратить его в стружку, а так же что бы твёрдость H_n инструментального материала значительно превосходила твёрдость H_m обрабатываемого материала.

Исходя из этого к инструментальным материалам предъявляются требования, которые определяются условиями их использования:

1) высокая *твёрдость*. Если бы при повышении твёрдости инструментального материала сохранилась его механическая прочность, то, увеличивая отношение $\frac{H_n}{H_m}$, которое однозначно характеризовало бы улучшения эксплуатационных свойств инструментального материала. Однако увеличение твёрдости H_m , как правило, сопровождается возрастанием хрупкости, а поэтому для различных марок инструментальных материалов существует определенное оптимальное отношение $\frac{H_n}{H_m}$.

2) высокая *механическая прочность*. Срезаемый слой через стружку давит на переднюю поверхность инструмента с нормальной силой N , создавая в пределах площади контакта среднее контактное нормальное напряжение, равное $\sigma_N = \frac{N}{Cv} \text{ кгс/мм}^2$, где v - ширина срезаемого слоя (размер слоя, измеренный в направлении, перпендикулярном к плоскости чертежа, рис. 4.2.1).

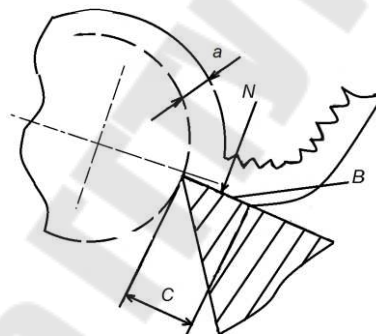


Рис. 4.2.1. Схема резания.

Нормальные контактные напряжения при резании конструкционных материалов с применяемыми в производстве режимами резания имеют очень большие значения, достигающие 50-70- кгс/мм². Режущий клин инструмента должен выдерживать такие высокие давления без хрупкого разрушения и заметного пластического деформирования. Помимо этого режущим инструментам часто приходится работать в условиях прерывистого резания или с переменными значениями сил резания из-за неравномерного припуска на обработку. Поэтому желательно, чтобы инструментальный материал сочетал высокую твёрдость с хорошей сопротивляемостью на сжатие и изгиб и обладал высоким пределом выносливости и ударной вязкостью.

3) *теплостойкость*. В процессе резания, вследствие превращения механической энергии в тепловую, со стороны детали на инструмент

действует мощный тепловой поток, в результате чего на передней поверхности инструмента устанавливается высокая температура $\theta = 800...900^{\circ}\text{C}$. Из-за интенсивного разогревания контактные поверхности инструмента теряют свою исходную твёрдость, размягчаются и быстро изнашиваются. Поэтому третьим требованием, предъявляемым к инструментальному материалу, является его высокая теплостойкость. Под теплостойкостью инструментального материала понимают способность материала сохранять при нагреве твёрдость, достаточную для осуществления процесса резания. Теплостойкость является важнейшим показателем качества инструментального материала, т.к. для инструмента важна не только исходная твёрдость, но и то, как эта твёрдость сохраняется при нагревании инструмента в процессе резания. Теплостойкость инструментального материала при резании можно характеризовать так называемой критической температурой. Эта температура, устанавливающаяся в процессе резания, при которой инструментальный материал ещё не теряет своих режущих свойств, и инструмент, из которого он изготовлен, способен резать.

4) *износостойкость*. В результате перемещения стружки по передней поверхности и поверхности резания по задней поверхности с большей скоростью, достигающей до 250...350 м/мин, при высоких контактных напряжениях и температурах рабочие поверхности инструмента изнашиваются. Под износостойкостью понимают способность инструментального материала сопротивляться при резании удалению его частиц с контактных поверхностей инструмента. Износостойкость материала зависит от его твёрдости, прочности и теплостойкости, возрастая при их увеличении.

5) *высокая теплопроводность* Немаловажное значение для улучшения качества инструментального материала имеет повышение его теплопроводности. Чем выше теплопроводность материала, тем меньше опасность возникновения шлифовочных ожогов и трещин на лезвиях инструмента при заточке. Кроме того, при возрастании теплопроводности улучшаются условия отвода тепла из зоны резания, что снижает температуру резания θ и повышает износостойкость инструмента.

6) *экономичность инструментального материала*. Инструментальный материал должен быть по возможности *дешёвым* и не содержать дефицитных элементов.

РАЗДЕЛ V

ФОРМИРОВАНИЕ ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛИ

Тема 5.1. Качество обрабатываемой поверхности детали

Под *качеством поверхности детали* понимают свойства ее поверхностного слоя, которые формируются в результате воздействия на поверхность одного или нескольких последовательно применяемых технологических методов обработки.

Качество поверхности детали определяется *геометрическими* (шероховатость, волнистость, отклонение от нормы) и *физико-механическими* (микротвердость, остаточные напряжения, структура) характеристиками поверхностного слоя.

В конструкциях современных технических устройств используется большое количество разнообразных металлических и неметаллических деталей, выполняющих различные функции. Технологические методы изготовления данных деталей различны и требуют разнообразного технологического оборудования, оснастки и приспособлений. Особенностью производства технических устройств являются детали, к которым предъявляются повышенные требования к точности размеров и качеству обработки поверхностей, особенно для труднообрабатываемых материалов и сложных поверхностей.

К методам обработки материалов и формообразования поверхностей относятся: обработка резанием, сварка, физико-химическая обработка, обработка давлением и др.

Выбор того или иного метода обработки во многом зависит от свойств обрабатываемого материала.

Свойства материала можно разделить на три группы:

- физико-химические (плотность, теплопроводность, температура плавления, коррозионная стойкость и др.);
- механические (прочность, твердость, пластичность и др.);
- технологические.

Технологические свойства характеризуют способность материала подвергаться тому или иному методу обработки.

В понятие *качества поверхности* входит целый ряд характеристик, определяющих, с одной стороны, геометрические параметры реальной поверхности, а с другой — ее физико-механические свойства (рис. 5.1).

Геометрические параметры обработанной поверхности характеризуются следующими отклонениями от геометрической формы: макрогеометрией (бочкообразность, конусность, овальность, неплоскостность и т. д.) и микрогеометрией (шероховатость и волнистость).

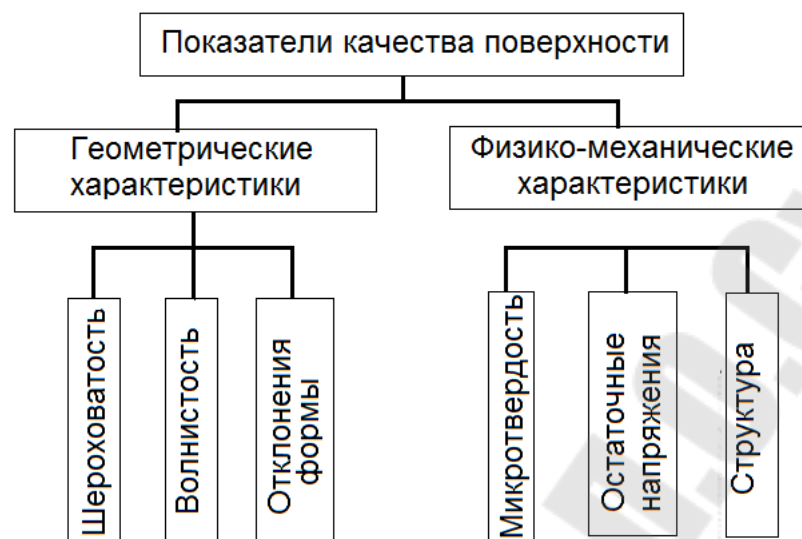


Рис. 5.1. Классификация показателей качества обрабатываемой поверхности

Физико-механические свойства поверхностного слоя характеризуются глубиной и степенью уплотнения (наклепа), а также значениями остаточных напряжений, глубиной их проникновения и знаком.

Обработанные поверхности классифицируются:

- по признаками:

1. конфигурация,
2. размеры
3. точность
4. марка материала
5. наличие и количество поверхностей элемента.

Элемент поверхности – это такая поверхность, которую невозможно разделить на составляющие (плоскость, отверстие, наружная поверхность вращения, сфера).

- по конфигурации: тела вращения (валы) и не тела вращения (плиты, корпуса, рычаги).

- по служебному назначению: зубчатые колёса, червяки, шпиндели, ходовые винты.

- по конфигурации валы подразделяют: гладкие, ступенчатые односторонние (диаметр ступеней уменьшается в одну сторону).

Качество поверхности детали определяется геометрическими параметрами (шероховатостью, волнистостью) и отклонением от нормы. Эксплуатационные показатели деталей, образующие механизмы, узлы машин, зависят не только от вида материала, но и от того, как и по какому технологическому процессу, они изготовлены (выбор метод обработки, режущий инструмент и т.д.)

Поверхность детали можно рассматривать как непрерывное множество последовательных геометрических положений (следов) движущейся производящей линии, называемой образующей, по другой производящей линии, называемой направляющей. Например, для получения плоскости необходимо образующую прямую линию 1 перемещать по направляющей прямой линии 2 (рис. 5.2, а). Цилиндрическая поверхность может быть получена при перемещении образующей прямой линии 1 по направляющей линии – окружности (рис. 5.2, б) или образующей окружности 1 вдоль направляющей прямой линии 2 (рис. 5.2, в). Рабочую поверхность зуба цилиндрического колеса можно получить, если образующую линию – эвольвенту 1 передвигать вдоль направляющей 2 (рис. 5.2, г) или, наоборот, образующую прямую 1 – по направляющей – эвольвенте 2 (рис. 5.2, д).

Рассмотренные поверхности называют обратимыми, так как их форма не изменяется, если поменять местами образующие и направляющие линии. В противоположность им этого нельзя сделать при образовании необратимых поверхностей. Например, если левый конец образующей прямой линии 1 перемещать по направляющей окружности 2, то получим круговую коническую поверхность (рис. 5.2, е). Но если окружность 2 сделать образующей и переместить вдоль направляющей прямой, то конус не получится. В этом случае необходимо, чтобы по мере перемещения окружности к вершине конуса ее диаметр изменялся, достигая в вершине нуля. Такие поверхности называют также поверхностями с изменяющимися производящими линиями, в противоположность поверхностям, у которых производящие линии постоянны (рис. 5.2, а–д).

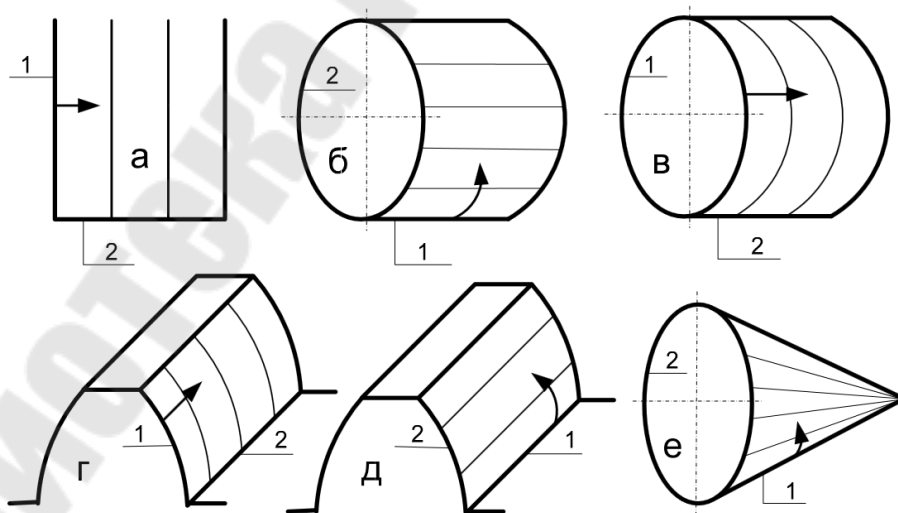


Рис. 5.2. Схемы образования поверхностей: **1** – образующая линия;
2 – направляющая линия

Большинство поверхностей деталей машин может быть образовано при использовании в качестве производящих линий прямой линии, окружности, эвольвенты окружности, винтовой и ряда других линий.

В реальных условиях обработки производящие линии не существуют.

Производящие линии на станках образуются материальными точками и линиями режущей кромки инструмента за счет согласованных относительных движений заготовки и инструмента. Причем почти все производящие линии на станках непрерывно образуются (имитируются) в течение всего времени формирования поверхности. В процессе непрерывной имитации обеих производящих линий и формируется (процессом резания) требуемая поверхность.

При анализе процессов формообразования образующую и направляющую можно различать по следующим признакам:

1 – образующая подвижна в пространстве, а направляющая неподвижна;

2 – форма и размеры образующей в общем случае переменны, а направляющей – неизменны;

3 – скорость образования (генерации) образующей существенно выше, чем направляющей.

Во времени образующая и направляющая линии могут возникать прерывисто, непрерывно или одновременно. По этому признаку можно выделить следующие схемы формообразования:

1 – образующая и направляющая линии возникают прерывисто; сюда относят фрезерование тел вращения, зубофрезерование червячной фрезой, дробеструйную обработку и т. д.;

2 – направляющая линия возникает прерывисто, а образующая – непрерывно; сюда можно отнести продольное точение, строгание, торцовое фрезерование плоскости и т. д.;

3 – направляющая линия возникает во времени прерывисто, а образующая – одновременно; сюда относят фрезерование фасонных канавок, плоскостей цилиндрической фрезой и т. д.;

4 – направляющая и образующая линии возникают непрерывно; к данной схеме можно отнести поперечное точение с тангенциальной подачей;

5 – направляющая линия возникает во времени непрерывно, а образующая – одновременно; к этой схеме относится, например, обработка отверстия однозубой прошивкой.

Прерывистый характер генерации производящих линий обрабатываемых поверхностей является одной из причин образования погрешностей формы (шероховатости, волнистости, огранки). Частичное уменьшение погрешности формы направляющей возможно за счет увеличения длины ее контакта с формообразующим элементом

инструмента, а для повышения устойчивости процесса резания наоборот часто уменьшают длину контакта формообразующего элемента с образующей.

Согласованные относительные движения заготовки и режущего инструмента, которые непрерывно создают производящие линии, и, следовательно, поверхность заданной формы в целом, называют формообразующими (рабочими) движениями. В зависимости от формы производящей линии и метода ее образования движения формообразования могут быть простыми и сложными. К простым движениям формообразования относят вращательное и прямолинейное. Сложными формообразующими движениями являются те, траектории которых образуются в результате согласованности взаимозависимых двух и более вращательных или прямолинейных движений, а также их сочетаний (например, винтовое движение, движение обката и т. п.).

При обработке поверхностей резанием в зависимости от вида режущего инструмента и формы его режущей кромки используют четыре метода образования производящих линий: копирование, обкат, след и касание.

Метод копирования основан на том, что режущая кромка инструмента по форме совпадает с производящей линией. Например, при получении цилиндрической или фасонной поверхности вращения (рис. 5.3, а) образующая линия 1 воспроизводится копированием прямолинейной или фасонной кромки инструмента, а направляющая линия 2 – вращением заготовки. Здесь необходимо одно формообразующее движение – вращение заготовки.

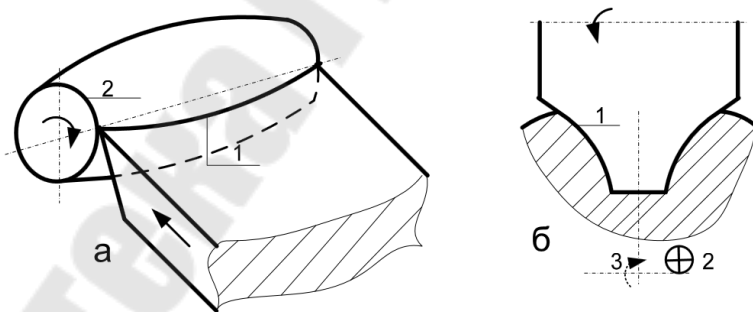


Рис. 5.3. Методы копирования: **1**- образующая линия, направляющая линия.
3 – движение деления

Для снятия припуска и получения детали заданного размера необходимо поперечное перемещение резца, но это движение (установочное) не является формообразующим. На рис. 5.3, б показан пример обработки зубьев цилиндрического колеса. Контур режущей кромки фрезы совпадает с профилем впадин и воспроизводит образующую линию. Направляющая линия получается прямолинейным движением заготовки

вдоль своей оси. Здесь необходимы два формообразующих движения: вращение фрезы и прямолинейное перемещение заготовки. Кроме этого, для обработки последующих впадин заготовка должна периодически поворачиваться на угол, соответствующий шагу зацепления. Такое движение называют делительным.

Метод обката (огибания) основан на том, что образующая линия возникает в форме огибающей ряда положений режущей кромки инструмента, в результате его движений относительно заготовки.

Форма режущей кромки отличается от формы образующей линии и при различных положениях инструмента является касательной к ней. На рис. 5.4 показана схема обработки зубьев цилиндрического колеса по методу обката. Режущая кромка инструмента имеет форму зуба зубчатой рейки. Если сообщить вращение заготовке и согласованное с ним прямолинейное перемещение рейки вдоль ее оси, как в реечной передаче, то в своем движении относительно заготовки режущий контур инструмента займет множество положений. Их огибающей явится образующая линия в форме впадины колеса. Поэтому образующая линия и линия режущей кромки являются взаимоогibaемыми.

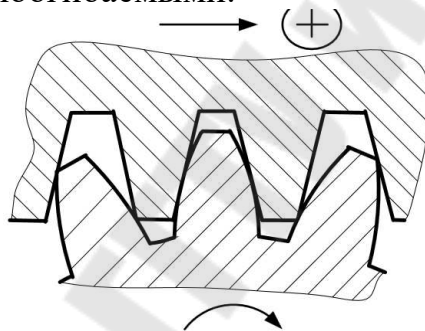


Рис. 5.4. Метод обката

Направляющая линия образуется прямолинейным перемещением инструмента или заготовки вдоль оси колеса. Для рассматриваемого случая требуется сложное формообразующее движения, состоящее из: вращения заготовки, перемещения инструмента вдоль своей оси, перемещения инструмента или заготовки вдоль оси зубчатого колеса по методу обката. Режущая кромка инструмента имеет форму зуба зубчатой рейки. Если сообщить вращение заготовке и согласованное с ним прямолинейное перемещение рейки вдоль ее оси, как в реечной передаче, то в своем движении относительно заготовки режущий контур инструмента займет множество положений. Их огибающей явится образующая линия в форме впадины колеса. Поэтому образующая линия и линия режущей кромки являются взаимоогibaемыми. Направляющая линия образуется прямолинейным перемещением инструмента или заготовки вдоль оси колеса. Для рассматриваемого случая требуется сложное формообразующее

движения, состоящее из: вращения заготовки, перемещения инструмента вдоль своей оси, перемещения инструмента или заготовки вдоль оси зубчатого колеса.

Поступательное движение инструмента вдоль своей оси (зуборезная гребёнка) может быть заложено в конструкцию инструмента (червячная фреза, у которой режущие кромки выполнены на винтовой поверхности). Это усложняет конструкцию инструмента, но увеличивает производительность, т. к. устраняет холостой ход возврата зубчатой рейки в исходное состояние.

Метод следа состоит в том, что образующая линия получается как след движения точки – вершины режущего инструмента. Например, при точении образующая 1 (рис. 5.5, а) возникает как след точки А – вершины резца, а при сверлении (рис. 5.5, б) – сверла. Инструмент и заготовка перемещаются относительно друг друга таким образом, что вершина режущего инструмента все время касается образующей линии **1**. Направляющая линия получается вращением заготовки (рис. 5.5, а), сверла или заготовки (рис. 5.5, б). В обоих случаях требуется два формообразующих движения.

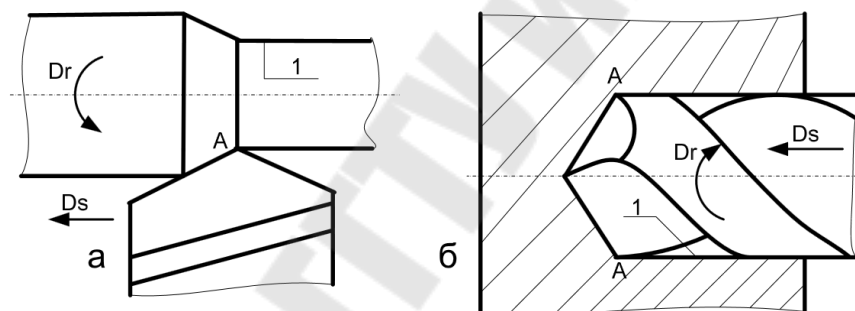


Рис. 5.5. Метод следа

Метод касания заключается в том, что форма производящей линии образующей 1, (рис. 5.6) возникает как огибающая множества режущих точек вращающегося инструмента в результате относительных движений инструмента и заготовки. Этот метод характерен при образовании производящих линий с участием таких инструментов, как фрезы и шлифовальные круги, имеющих множество режущих точек, и, следовательно, точек касания, формирующих траекторию образуемой производящей линии. Для получения производящей линии методом касания требуется два, реже три формообразующих движения.

Метод касания заключается в том, что форма производящей линии (образующей 1, рис. 5.6) возникает как огибающая множества режущих точек вращающегося инструмента в результате относительных движений инструмента и заготовки. Этот метод характерен при образовании производящих линий с участием таких инструментов, как фрезы и шлифовальные круги, имеющих множество режущих точек, и,

следовательно, точек касания, формирующих траекторию образуемой производящей линии. Для получения производящей линии методом касания требуется два, реже три формообразующих движения.

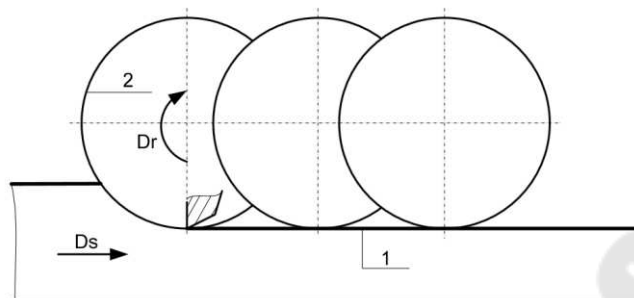


Рис. 5.6. Метод касания

Процесс образования поверхностей резанием состоит в том, что за счет согласованных относительных движений заготовки и инструмента непрерывно образуются обе производящие линии при одновременном относительном их перемещении. Каждая производящая линия образуется одним из указанных выше четырех методов, поэтому образование поверхностей характеризуется сочетанием двух из четырех методов образования производящих линий, причем это может быть сочетание одноименных методов. Например, при образовании круговой цилиндрической поверхности с помощью резца обе производящие линии (окружность и прямая) получаются одним и тем же методом – методом следа. В общем случае число движений формообразования для создания поверхности определяется суммой движений формообразования необходимых для образования обеих производящих линий. Во всех случаях общее число формообразующих движений при формировании поверхностей резанием практически не превышает трех. Поэтому металлорежущие станки бывают с одним, двумя или тремя движениями формообразования. Если в станке имеется одно движение формообразования, то оно является движением скорости резания. Если в станке есть два движения формообразования, то одно из них, имеющее большую скорость, является движением скорости резания (Dr), а второе, имеющее меньшую скорость, является движением подачи (Ds). Из трех движений формообразования в станке одно будет движением скорости резания, имеющим наибольшую скорость, а два других – движениями подачи.

При выборе метода обработки заданной поверхности детали необходимо учитывать *техничко-экономические показатели*. При сравнении двух методов обработки необходимо выбрать наиболее экономичный с учетом выбранного оборудования. На примере последующих схем резания (рис. 5.7, *а*), можно выбрать из двух методов обработки цилиндрической поверхности один, *а* - поперечное точение, а можно использовать (если длина заготовки небольшая) и применить фасонное точение, *б* - второй

метод продольное точение (если заготовка имеет большую длину), так же необходимо учитывать выбранное оборудование для каждого вида обработки

Круговая цилиндрическая поверхность может быть представлена как след движения прямой линии по окружности (рисунок 5.7, а) или след движения окружности по прямой (рис. 5.7.б)

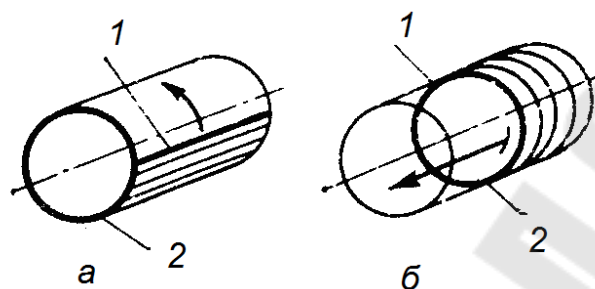


Рис. 5.7. Схемы обработки цилиндрической поверхности

Боковую поверхность зуба прямозубого цилиндрического колеса можно рассматривать как след движения эвольвенты вдоль прямой линии (рис. 5.8, а) или след движения прямой по эвольвенте. Обработка боковой поверхности зуба предусматривает обработку по методу обкатки, то есть данный вид обработки выполняется одним инструментом, за один проход, что позволяет получить более точную поверхность. Второй метод (рис. 5.1.8, б) предусматривает обработки зубчатых впадин поочередно набором фрез, что дает менее точность обработки и снижение производительности.

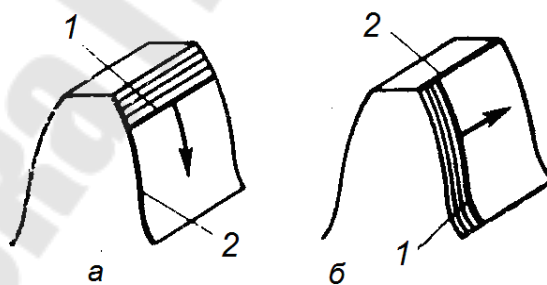


Рис. 5.8. Схемы обработки боковой поверхности зуба прямозубого колеса

Геометрические параметры поверхности детали определяются значениями шероховатости, которые представляют собой совокупность неровностей с относительно малыми шагами, образующих ее рельеф боковую поверхность зуба прямозубого цилиндрического колеса можно рассматривать как след движения эвольвенты вдоль прямой линии или след движения прямой по эвольвенте в пределах базовой величины.

Микронеровности формируются в результате взаимодействия

обрабатываемой поверхности и элементов режущего инструмента или обрабатывающих сред.

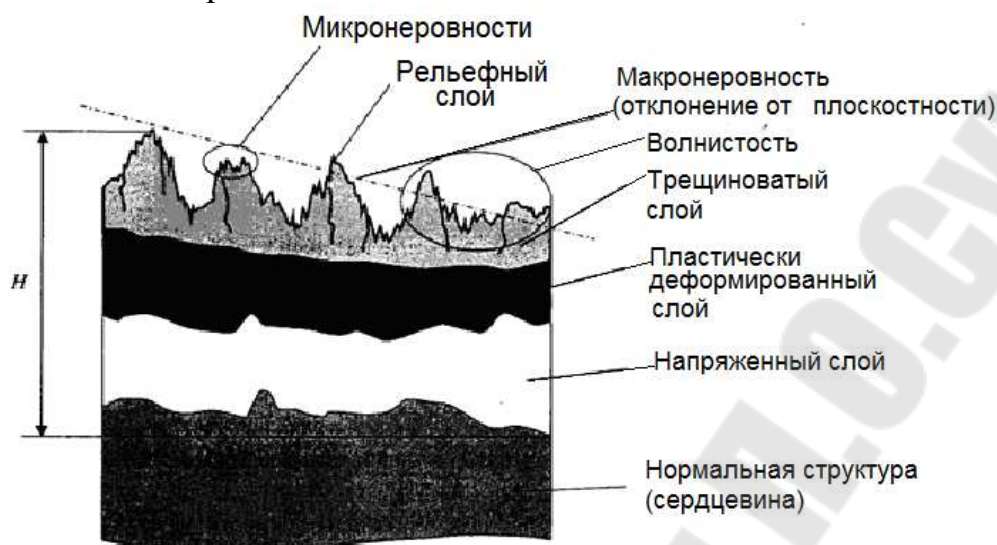


Рис. 5.9. Схема сечения детали после обработки

Если рассмотреть реальную деталь в разрезе (рис. 5.9), то можно выделить рельефный слой, который определяет геометрические отклонения от идеального поверхностного слоя; трещиноватый слой, в котором нарушена целостность поверхности; пластически деформированный слой; напряженный, упругодеформированный слой. H - высота дефектного слоя, величина которого определяется способом обработки. Чем грубее обработка, тем дефектный слой больше.

К причинам появления дефектного слоя следует отнести упругие, пластические деформации и деформации разрушения, которые имеют место в процессе обработки; нагрев поверхностного слоя; химические явления, которые имеют место в зоне обработки.

Количественная оценка шероховатости поверхности производится по шести параметрам (рис. 5.10).

1. Среднее арифметическое отклонение профиля **Ra** :

$$Ra = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|$$

где n — количество точек профиля на базовой длине; y — расстояние между данной точкой профиля и средней линией.

$$Rz = \frac{1}{5} \left(\sum_{i=1}^5 |H_{i\max}| + \sum_{i=1}^5 |H_{i\min}| \right)$$

где $H_{i\max}$ и $H_{i\min}$ — соответственно отклонения пяти наибольших максимумов и минимумов профиля.

3. Наибольшая высота неровностей профиля $R_{\max}$ — расстояние между линией выступов профиля и линией впадин профиля в пределах базовой длины.

4. Средний шаг неровностей профиля S_m — среднее арифметическое значение шага неровностей профиля в пределах базовой длины.

5. Средний шаг неровностей профиля по вершинам S — среднее арифметическое значение шага неровностей профиля по вершинам в пределах базовой длины.

6. Относительная опорная длина профиля tp (рис. 5.10, б):

$$tp = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^n b_i$$

где l — длина базовой линии; b — отрезок профиля, отсекаемый на уровне p в материале выступов профиля линией, эквидистантой к средней линии.

С достаточной для практики точностью установлено, что между параметрами шероховатости существуют зависимости $R_z = 4,5Ra^{0,97}$ либо $R_z = 0,75R_{\max}$.

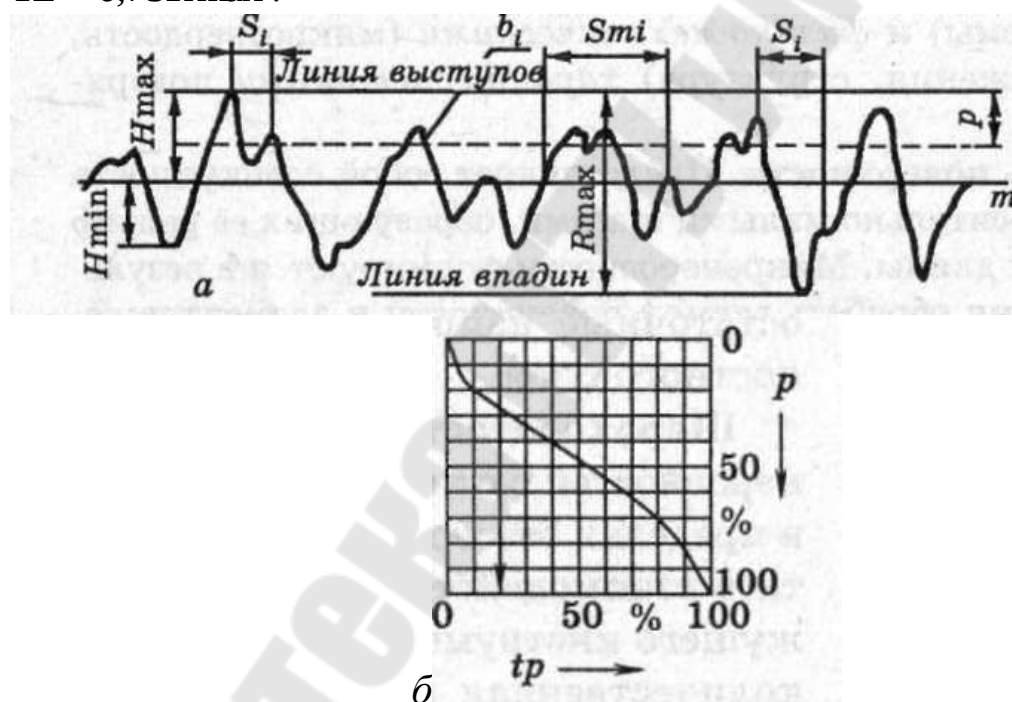


Рис. 5.10. Схема для определения шероховатости

На эксплуатационные показатели поверхностей деталей оказывают влияние и параметры шероховатости, не предусмотренные ГОСТ 2789-73: радиусы закругления вершин и впадин, углы наклона образующих неровностей и др. Необходимо иметь в виду, что требования к шероховатости поверхности должны быть обоснованными и устанавливаться с учетом функционального назначения деталей. В

большинстве случаев для этого достаточно нормировать только один параметр: **Ra** или **Rz**.

Шероховатость обработанной поверхности определяется условиями ее обработки (табл. 5.1).

Таблица 5.1. Влияние способа обработки на шероховатость обработанной поверхности

Способ обработки	Материал детали			
	Сталь	Чугун		Цветные сплавы
1	2	3	4	
Наружные поверхности вращения				
Точение:				
черновое	Rz 80.	.20	Rz 80.	..20
чистовое:				
продольное	Rz 40..	.5,0	Rz 40.	..10
продольное, совме-				
щенное с поперечным	Rz 80.	.10	Rz 80.	..10
повышенной точности	Ra 2,5..	1,25	Да 2,5..	.1,25
Шлифование в центрах				
и врезанием:				
черновое	Ra 2,5..	1,25	Ra 2,5..	.1,25
чистовое	Ra 0,63.	..0,32	Ra 0,63	..0,32
тонкое	Ra 0,32.	..0,10	-	-
Шлифование бесцентровое				
напроход:				
однократное	Ra 2,5..	1,25	Ra 1,25	..0,63
трехкратное	Ra 1,25.	..0,63	Ra 1,25	..0,63
шестикратное	Ra 0,63.	..0,16	Ra 1,25	..0,32
Внутренние поверхности вращения				
Сверление, рассверливание	Rz 160...20		Rz 160...20	Rz 80...10
Зенкерование:				
черновое	Rz 80...10		Rz 80...10	Rz 80...10
чистовое	Ra 5,0...1,25		Ra 5,0...1,25	Ra 2,5.-1,25
Развертывание:				
черновое	Ra 5,0...2,5		Ra 5,0.-2,5	Ra 2,5.-1,25
чистовое	Ra 2,5...0,63		Ra 2,5...0,63	Ra 1,25...0,40
тонкое	Ra 1,25...0,32		Ra 1,25...0,32	Ra 0,63...0,66
Растачивание:				
черновое	Rz 80...20		Rz 80...20	Rz 40...10
чистовое	Ra 5,0...1,25		Ra 5,0...1,25	Ra 2,5...0,63
тонкое	Ra 2,5...0,63		Ra 2,5.-1,25	Да 0,63.-0,32
Протягивание:				
«по черному»	Ra 5,0...0,63		Ra 5,0...1,25	Ra 2,5...0,32
по обработанной поверхности	Ra 5,0...0,63		Ra 5,0...1,25	Ra 1,25...0,32

Продолжение таблицы 5.1.

1	2	3	4
Шлифование:			
1	2	3	4
Черновое	Ra 2,5...0,63	-	-
чистовое	Ra 2,5...0,32	-	-
тонкое	Ra 0,63...0,16	-	-
Обработка плоских поверхностей			
Фрезерование торцовой фрезой:			
черновое	Rz 40...10	Rz 40...10	Rz 20...5,0
чистовое	Ra 2,5...1,25	Ra 2,5...1,25	Ra 2,5...0,63
тонкое	Ra 2,5...0,63	Ra 2,5...0,63	Ra 2,5...0,32
Протягивание	Ra 2,5...0,63	Ra 2,5...1,25	Ra 1,25...0,32

Механизм образования шероховатости обработанной поверхности можно разбить на три группы, связанные:

- 1) с положением режущих кромок инструмента относительно обработанной поверхности;
- 2) упругой и пластической деформацией обрабатываемого материала;
- 3) возникновением вибраций в технологической станочной системе.

Образование неровностей обработанной поверхности в первом приближении можно представить как след рабочего движения режущей кромки (или кромок) инструмента в поверхностном слое металла (рис. 5.11, а). Назовем такой профиль *регулярным*. На образование регулярного профиля шероховатости влияет геометрия режущего инструмента, в частности главный и вспомогательный углы в плане φ и φ_1 , радиус вершины резца r_b и подача S .

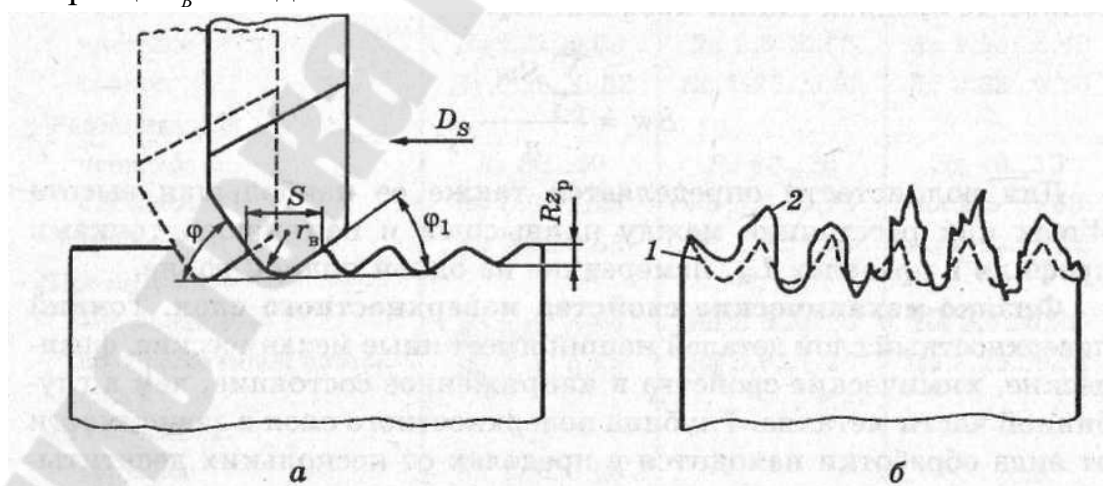


Рис. 5.11. Схема образования шероховатости поверхности: а — образование регулярного профиля шероховатости; б — его искажение за счет пластической деформации в зоне резания; 1, 2 — соответственно регулярный и искаженный (действительный) профили

Исходя из геометрических соотношений расчетная высота неровностей для резца с незакругленной вершиной

$$Rz_p = \frac{S \sin \varphi \sin \varphi_1}{\sin(\varphi + \varphi_1)}$$

Для резца, вершина которого имеет радиус закругления (при $S > r_B$), используются следующие эмпирические зависимости:

$$Rz \approx \frac{S^2}{8r_B}; \quad Ra_p \approx \frac{0,0321S^2}{r_B},$$

а при тонком точении

$$Rz_p \approx \frac{S^2}{8r_B} + \frac{a_{\min}}{2} \left(1 + \frac{r_B a_{\min}}{S^2} \right),$$

где $a_{\min}$ — минимальная толщина среза.

Минимальную толщину срезаемого слоя, гарантирующую нормальные условия резания можно найти так:

$$a_{\min} = 2\rho[1 - \cos(45^\circ - \mu')] = KS \sqrt{\frac{t}{2r_B}},$$

где ρ - радиус округления режущей кромки, μ' - угол трения пары инструментальный материал - обрабатываемый материал; K — коэффициент, учитывающий уменьшение размеров сечения среза и механические свойства обрабатываемого материала; для стали 45 $K = 0,3$.

Обычно $a_{\min}$ находится в пределах 0,02 мм.

Из приведенных формул следует, что чем больше S , φ и φ_1 и меньше r_B , тем высота неровностей больше, и наоборот. Указанную шероховатость называют *поперечной* (ее измеряют в направлении подачи). Одновременно образуется и *продольная шероховатость*, измеряемая вдоль главного движения инструмента (или детали). Обычно поперечная шероховатость больше продольной, поэтому она сильнее влияет на эксплуатационные свойства обработанных поверхностей.

В реальном процессе обработки металлов резанием впереди резца и под обработанной поверхностью образуется определенная зона пластической деформации. Это вносит существенные искажения в регулярный профиль поверхности (рис. 5.11, б), так как пластически деформированный металл в отдельных местах как бы наволакивается, а также вырываются отдельные кусочки металла. Поэтому чем меньше поверхностная пластическая деформация, тем ближе фактический профиль подходит к регулярному.

Исходя из изложенного, значение Rz в общем виде можно представить уравнением:

$$Rz = Rz_p + \Delta Rz,$$

где Rz_p - расчетная величина гребешков;

ΔRz - приращение высоты неровностей. Это приращение является суммой трех слагаемых:

$$\Delta Rz = \Delta Rz_{пл} + \Delta Rz_{уп} + \Delta Rz_{т.з},$$

где: $\Delta Rz_{пл}$ - приращение высоты неровностей в результате пластического течения металла в направлении вершины остаточного гребешка;

$\Delta Rz_{уп}$ - приращение, вызванное упругим восстановлением поверхностного слоя;

$\Delta Rz_{т.з}$ - приращение, вызванное трением задней поверхности инструмента об обработанную поверхность.

Отметим, что для различных видов обработки резанием при одних и тех же режимах шероховатость поверхности получается различной в зависимости от свойств материала обрабатываемых деталей. При обработке более твердых материалов высота микронеровностей меньше, чем при обработке мягких. Вязкие и пластичные материалы более склонны к пластическим деформациям и при обработке резанием дают более грубые поверхности. Недостаточная жесткость в ячейках технологической системы и возникающие вибрации вызывают перемещение лезвия режущего инструмента относительно поверхности обрабатываемой детали, что ведет к увеличению шероховатости.

При обработке материала резанием в поверхностном слое происходят физико-механические изменения. Тонкий поверхностный слой деталей машин имеет иные механические, физические, химические свойства и напряженное состояние, чем в глубинной части металла. Глубина поверхностного слоя в зависимости от вида обработки находится в пределах от нескольких десятитысячных до сотых и десятых долей миллиметра, оказывая большое влияние на работоспособность деталей машин. Отличие свойств тонких поверхностных слоев от свойств сердцевины обусловлено суммой механических, тепловых и физико-химических воздействий на поверхность металла в ходе обработки резанием. В результате этого происходит изменение структуры поверхностного слоя, формируется микрорельеф обработанной поверхности и т.п. Это приводит к возрастанию свободной энергии поверхности, увеличению ее адсорбционной активности и другим изменениям, оказывающим существенное влияние на эксплуатационные характеристики детали.

Металлы и сплавы имеют поликристаллическое строение и состоят из большого числа беспорядочно ориентированных и разных по размерам кристаллических зерен, которые, вставляя друг в друга, образуют прочное механическое соединение. Поэтому поверхность поликристаллического металла представляет собой скопление связанных переходным слоем кристаллов и их обломков с различной ориентацией.

Поверхностный слой — это слой материала между наружной поверхностью детали и условной поверхностью, служащей границей всевозможных изменений, происходящих в исходном материале в процессе обработки. Этот слой формируется как результат контактного взаимодействия обрабатываемого материала, инструментального материала и технологической среды. Условно его можно разделить на несколько зон, характеризующихся специфическими особенностями. Специалисты по-разному дифференцируют эти зоны (рис. 5.12).

Зона I формируется в результате *адсорбции* (адсорбция - процесс притягивания атомов и молекул газов, паров, ионов, твердых веществ под действием физических сил и химического взаимодействия) на поверхности детали поляризованных частиц органического происхождения (жирные кислоты, пот и т.д.).

Зона II формируется в результате адсорбции частиц воды (осаждение из водяного пара).

Зона III образуется в результате адсорбции газов (азота, водорода и др.).

Зона IV представляет собой пленку оксидов обрабатываемого материала, возникшую в результате окислительного взаимодействия.

Зоны I—III взаимно перекрываются, имеют аморфную структуру и толщину 0,2...0,3 нм. Толщина зоны IV обусловлена химической активностью обрабатываемого материала и скоростью диффузии кислорода через оксидную пленку. Совместно пленки, входящие в зоны I-IV, препятствуют охрупчивающему воздействию активных веществ технологической среды и предохраняют поверхность детали от коррозии, затрудняя дальнейшую диффузию кислорода и других элементов.

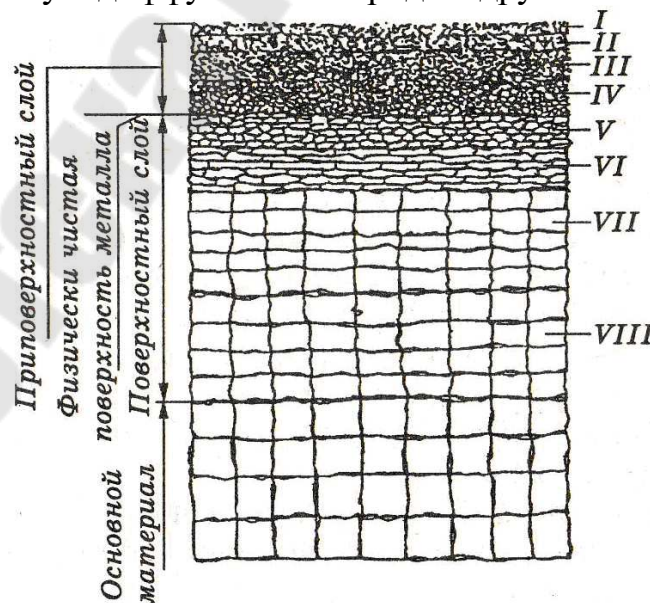


Рис. 5.12. Схемы поверхностного слоя из восьми зон

Зона V возникает в результате повреждения зерен металла режущим лезвием и состоит из раздробленных деформированных зерен исходного материала; она имеет аморфную структуру и толщину 0,1...1,0 мкм.

Зона VI охватывает область материала, подвергнутого пластическому деформированию и часто имеющего выраженную текстуру. Физические, химические и особенно прочностные характеристики этой зоны значительно различаются в разных направлениях, т.е. материал становится анизотропным. Толщина зоны обычно не превышает нескольких десятых миллиметра.

Зона VII охватывает область материала, подвергнутого пластическому деформированию, но не имеющего текстуры. Толщина зоны обычно не превышает нескольких десятых миллиметра.

На зоны VI и VII накладывается зона термического воздействия. Влияние высоких температур приводит к изменениям размеров зерен и структурно-фазовым превращениям в поверхностном слое. В зависимости от уровня и скорости воздействия высоких температур в этой области формируются слои с различной микроструктурой; общая толщина зоны — несколько десятых миллиметра.

Зона VIII охватывает область упругих деформаций. Ниже ее располагается основной материал.

Зоны I—III оказывают существенное влияние на условия трения на поверхности детали в процессе ее эксплуатации, тогда как зоны V-VIII влияют в первую очередь на условия изнашивания этой поверхности.

При обработке деталей под действием сил резания в поверхностном слое металла происходит его упругопластическое деформирование. Пластическое деформирование распространяется на определенную глубину металла, расположенного под обработанной поверхностью, и сопровождается скольжением, т.е. перемещением отдельных частей кристаллитов по определенным кристаллографическим плоскостям. Процесс скольжения начинается тогда, когда возникают критические сдвигающие напряжения, достаточные для его начала. Пластическому деформированию предшествует упругое, распространяющееся со скоростью, близкой к скорости звука. На пластическое деформирование, при котором происходит перемещение частей кристаллитов, требуется определенное время. Поэтому при больших скоростях деформирования иногда наблюдается межкристаллитная пластическая деформация. В этом случае зерна перемещаются относительно друг друга.

При обработке деталей под действием сил резания в поверхностном слое металла происходит его упруго-пластическое деформирование.

Пластическая деформация распространяется на определенную глубину металла, расположенного под обработанной поверхностью, и сопровождается скольжением, т. е. перемещением отдельных частей

кристаллов по определенным кристаллографическим плоскостям. Процесс скольжения начинается тогда, когда возникают критические сдвигающие напряжения, достаточные для его начала. Пластической деформации предшествует упругая деформация, распространяющаяся со скоростью, близкой к скорости звука. На пластическое деформирование, при котором происходит перемещение частей кристаллитов, требуется определенное время. Поэтому при больших скоростях деформирования частично наблюдается также межкристаллитная пластическая деформация. В этом случае зерна перемещаются относительно друг друга.

В процессе резания металлов зерна в поверхностном слое вытягиваются в направлении действия силы резания. Кристаллиты в основном ориентируются по кристаллографическим направлениям. Подобная ориентировка мелких зерен, вытянутых по направлению деформации, называется *текстурой*.

При пластической деформации происходит возникновение и концентрация дислокаций (нарушение в отдельных местах правильного строения кристаллической решетки) около линий сдвигов. Это связано с необходимостью преодоления сопротивления полей напряжений. Следовательно, при резании пластическая деформация вызывает наклеп поверхности, за счет чего последняя упрочняется, повышается ее микротвердость и снижается пластичность. При наклепе наблюдается снижение электропроводности, теплопроводности и плотности металла, что объясняется увеличением количества дислокаций и вакансий в наклепанном металле.

Установлено, что возможности упрочнения металла за счет его наклепа ограничены, и при чрезмерном пластическом деформировании может образоваться «перенаклеп» металла, что приводит к его разупрочнению. Разупрочнение происходит при исчерпании зернами металла возможности упрочняться. При этом наблюдается его разрыхление, появление трещин, отслаивание и т. д.

При обработке металлов резанием одновременно действуют значительные силы резания, создающие наклеп, и температура, вызывающая разупрочнение металла. Конечное состояние поверхностного слоя определяется соотношением процессов упрочнения и разупрочнения, зависящих от преобладания в зоне резания силового или теплового фактора. В связи с этим всякое изменение режимов резания, вызывающее увеличение усилий резания и степени пластической деформации, ведет к повышению степени наклепа. Увеличение продолжительности их воздействия на поверхностный слой приводит к увеличению глубины распространения наклепа.

При шлифовании наклеп поверхностного слоя возрастает вследствие увеличения нагрузки на абразивное зерно, что имеет место при росте

глубины шлифования, скорости вращения детали или продольной подачи стола при плоском шлифовании, увеличении размера и радиуса округления абразивных зерен. С увеличением скорости вращения круга уменьшается нагрузка на абразивные зерна и одновременно увеличивается количество теплоты, выделяющейся в зоне шлифования и снижающей наклеп, в результате чего упрочнение поверхностного слоя уменьшается, возможно, образование прижогов и микротрещин.

При абразивной доводке различными методами также происходит наклеп металла поверхностного слоя. При этом микротвердость повышается на 15...30 %, а глубина распространения наклепа составляет 5...10 мкм. Все это необходимо учитывать, поскольку микротвердость поверхностного слоя металла и глубина распространения упрочнения оказывают большое влияние на эксплуатационные свойства деталей и являются важными показателями качества их поверхностей.

Степень наклепа в процессе обработки определяется обычно отношением возрастания микротвердости поверхностного слоя металла к микротвердости основного металла или сердцевины H_c (в процентах):

$$H = 100 \times (H_n - H_c) / H_c,$$

где H_n — микротвердость поверхностного слоя)

Шероховатость поверхности детали, изменения физико-химических свойств в ее поверхностном слое являются важнейшими эксплуатационными характеристиками деталей машин и влияют на ее износостойкость и сопротивление усталости.

Износостойкость определяет сопротивление поверхности детали изнашиванию в процессе эксплуатации. При изнашивании изменяются размеры и геометрическая форма поверхностей, что приводит к изменению характера сопряжений деталей, потере точности относительного расположения деталей и узлов и нарушениям в работе машины.

Сопротивление усталости характеризует способность детали противостоять многократно повторяющимся знакопеременным нагрузкам в процессе эксплуатации. Недостаточное сопротивление усталости приводит к быстрой поломке деталей, вызывая отказ в работе машины.

Условия эксплуатации деталей разнообразны, в связи с чем, в некоторых случаях к деталям предъявляют дополнительные требования, такие как коррозионная стойкость, отражательная способность, электрические, магнитные, эстетические свойства и т. д.

Исследованиями установлено, что шероховатость поверхностей оказывает большое влияние на изнашивание деталей в процессе эксплуатации.

В процессе трения рабочих поверхностей в машинах и механизмах наблюдается начальный, более интенсивный период изнашивания, когда поверхности прирабатываются. Трущиеся поверхности вначале

контактируют по вершинам микронеровностей, в результате чего происходит их срезание и пластическое деформирование. К концу приработки высота исходной шероховатости уменьшается на 65...75 %, а площадь фактического контакта возрастает, что приводит к уменьшению контактных давлений. Поэтому интенсивность изнашивания резко падает, и в дальнейшем происходит равномерное изнашивание, определяющее срок службы детали.

Установлено, что в результате приработки на трущихся поверхностях образуется оптимальная шероховатость, характерная для конкретных условий работы соединения (давление, скорость скольжения, наличие смазочного материала, физико-механические свойства материалов деталей и т. д.). Поэтому, если в процессе обработки деталей на их поверхностях обеспечить шероховатость, близкую к оптимальной, длительность приработки и изнашивание будут наименьшими. Как отмечалось, оптимальная по износостойкости шероховатость поверхности деталей зависит от вида соединения и конкретных условий их эксплуатации. Эта зависимость определяется путем специальных исследований. Так, для рабочих поверхностей беговых дорожек подшипников качения оптимальна шероховатость $Ra = 0,04...0,08$ мкм, для зеркала цилиндров двигателей - $Ra = 0,08...0,32$ мкм, для пальца в соединении его с поршнем - $Ra = 0,16...0,63$ мкм, для отверстия в бобышке поршня - $Ra = 0,63...1,25$ мкм.

На интенсивность изнашивания деталей оказывает влияние не только высота, но и направление неровностей исходной шероховатости трущихся поверхностей. По данным исследований, выполненных проф. П. Е. Дьяченко, следует, что при легких условиях работы и жидкостном трении лучшие результаты получаются при совпадении направления следов неровностей с направлением перемещения трущихся деталей. В этих условиях имеет место большая площадь контакта поверхностей, разделенных слоем смазочного вещества.

При тяжелых условиях работы, когда давления значительны и смазка недостаточна, рекомендуется создавать на поверхностях пересекающиеся следы неровностей, при которых не происходит полного выдавливания смазочного материала, уменьшается вероятность схватывания и появления задиров.

От шероховатости поверхности существенно зависят сопротивление усталости деталей. Усталостному разрушению металла способствуют отдельные дефекты и неровности на поверхности детали, которые являются источниками концентрации напряжений. При грубой обработке, когда на поверхности имеются глубокие риски, последние выступают в роли первичных очагов концентрации напряжений. Во впадинах неровностей при циклических и знакопеременных нагрузках возникают субмикроскопические трещины, которые в дальнейшем разрастаются и

приводят к образованию усталостных трещин и разрушению детали. Имеется общая закономерность, показывающая, что сопротивление усталости выше у деталей, поверхности которых обработаны более тонкими способами и имеют меньшую высоту микронеровностей. Чем грубее шероховатость, тем больше на ней впадин и глубоких рисок, на дне которых концентрируются и собираются корродирующие вещества, и поэтому здесь коррозия поверхности происходит интенсивнее. С уменьшением шероховатости коррозионная стойкость деталей повышается.

В настоящее время на основании ряда исследований установлено, что *остаточные напряжения в поверхностном слое* деталей независимо от их знака не оказывают заметного влияния на износостойкость деталей при трении. Объясняется это тем, что в процессе трения происходит интенсивное пластическое деформирование трущихся поверхностей. Остаточные напряжения, созданные механической обработкой, снимаются в начальном периоде изнашивания, а затем в процессе трения постепенно возникают остаточные напряжения сжатия, которые не зависят от остаточных напряжений в поверхностном слое металла, действовавших до начала трения.

Наиболее заметное влияние остаточные напряжения оказывают на сопротивление деталей усталости. При циклическом нагружении металлов наблюдается пластическая деформация отдельных, наиболее слабых зерен поверхностного слоя. Она сопровождается упрочнением металла и искажением кристаллической решетки. Если напряжения превышают предел выносливости, искажение атомной кристаллической решетки становится столь значительным, что наступает разрыв межаутомных связей по плоскостям скольжения. При этом наблюдаются субмикроскопические нарушения сплошности, т. е. разрыхление металла, которое приводит к возникновению усталостных трещин, а затем и к разрушению деталей.

Исследования показывают, что сжимающие напряжения повышают предел выносливости, а растягивающие — уменьшают его. Имеются данные о том, что сжимающие остаточные напряжения в поверхностных слоях деталей повышают также надежность соединений с натягом. Нагревание деталей до сравнительно невысоких температур приводит к релаксации остаточных напряжений и тогда они уже не оказывают влияния на предел выносливости.

Влияние структуры поверхностного слоя на эксплуатационные свойства деталей. При обработке деталей в результате действия высоких температур в поверхностном слое могут происходить структурные изменения, которые приводят к вторичной закалке и образованию поверхностного слоя повышенной твердости по сравнению с основной

структурой металла. Обработка закаленных металлов в поверхностном слое может сопровождаться отпуском различной степени

Повышенную твердость и хрупкость белого поверхностного слоя обуславливают особенности его структуры. Она отличается от структуры стали после обычной закалки повышенным содержанием остаточного аустенита (до 80 %) и увеличенным значением параметра кристаллической решетки.

Поскольку пластической деформации в первую очередь подвергаются зерна остаточного аустенита, при обработке скопление дислокаций сосредоточивается главным образом в аустенитной среде, где легко могут образовываться микро- и макротрещины. Поэтому при циклических воздействиях контактных нагрузок деформированные зоны остаточного аустенита служат концентраторами напряжений и способствуют снижению прочности, а также образованию усталостных выкрашиваний.

В связи с отмеченной особенностью оценка роли белого поверхностного слоя может быть дана с учетом эксплуатационных требований к детали. В деталях, подвергаемых контактному циклическим нагрузкам, образующийся после шлифования белый поверхностный слой должен быть удален на финишных операциях. Если же детали работают на истирание, с целью увеличения их износостойкости белый поверхностный слой должен быть сохранен.

При шлифовании деталей под действием высоких температур может происходить не только равномерная вторичная закалка, но и местные фазовые и структурные превращения. Они проявляются в форме отдельных прижогов и сопровождаются изменением цвета участков поверхности обработанной детали.

Структурные изменения в местах прижогов приводят к локальному объемному изменению, вызывающему появление внутренних неодинаковых напряжений разных знаков. Если напряжения превышают временное сопротивление металла, происходит разрыв поверхностного слоя детали в центре или на границах участка прижога, т. е. в месте наибольшей концентрации внутренних напряжений. Появление трещин на поверхности детали резко снижает сопротивление усталости. Участки мягкого отпущенного металла имеют пониженную износостойкость, в результате чего наблюдается неравномерное изнашивание деталей.

В процессе обработки детали на значение шероховатости и физико-химических свойств поверхностного слоя большое влияние оказывают элементы удаляемого слоя. К ним относятся глубина резания t , частота вращения детали или инструмента n и подача S , которые характеризуют процесс резания с технологической стороны.

РАЗДЕЛ VI ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЗАНИЯ

Тема 6.1. Критерии оптимальности режимов резания.

Критериями оптимальности режимов резания являются:

- оптимальная геометрия режущего инструмента;
- максимальная производительность и наименьшая стоимость операции;
- минимальные расходы на эксплуатацию режущего инструмента.

Оптимальная геометрия инструментов - это геометрические параметры инструмента, при которых достигаются наибольший период стойкости и допустимая скорость резания, при условии обеспечения наименьшей стоимости обработки и при возможно большей производительности и высоком качестве обрабатываемой поверхности. То есть на интенсивность изнашивания контактных площадок инструмента большое влияние оказывает форма его режущей части и величины углов заточки, т.е. его геометрические параметры. Изменение их влечет за собой изменение периода стойкости инструмента, сил резания, шероховатости обработанной поверхности и т.д.

На практике при совершенствовании геометрии инструмента стремятся обеспечить наибольший период его стойкости и допустимую скорость резания v_T . Обращают внимание и на обеспечение требуемых производительности обработки и качества обработанной поверхности. Возможны и другие направления оптимизации процесса обработки, когда решающую роль играет, например, шероховатость обработанной поверхности, а все другие показатели являются второстепенными. Сочетание геометрических параметров, обеспечивающее достижение цели оптимизации, называют оптимальной геометрией (или наивыгоднейшими геометрическими параметрами). При назначении оптимальных геометрических параметров инструмента следует помнить, что иногда целесообразно допускать отклонения от оптимальных величин углов на $2...3^\circ$, что позволяет уменьшать номенклатуру применяемых инструментов.

Выбор заднего угла α . Задний угол обеспечивает уменьшение трения задней поверхности режущего инструмента об обработанную поверхность.

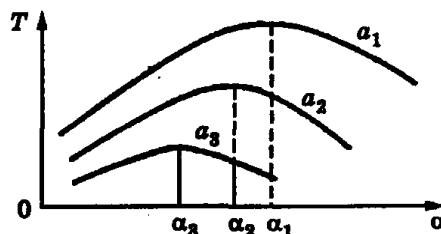


Рис. 6.1.1. Зависимость $T = f(\alpha)$ при различной толщине срезаемого слоя ($a_1 > a_2 > a_3$)

Поэтому с увеличением угла α до каких-то определенных пределов условия резания улучшаются. Однако увеличение α приводит к уменьшению угла заострения β , в результате чего ухудшаются условия теплоотвода и интенсифицируется изнашивание. Таким образом, с увеличением α стойкость вначале растет, а потом падает (рис. 6.1.1). Чтобы полнее выяснить характер изменения стойкости режущего инструмента с изменением заднего угла, необходимо учитывать толщину срезаемого слоя. Известно, что при обработке сталей больший оптимальный угол α соответствует меньшей толщине срезаемого слоя: $\sin \alpha_0 = 0,13/a^{0,3}$.

Для практических целей при обработке сталей рекомендуются следующие величины задних углов: $\alpha = 8^\circ$ для черновых резцов при $S > 0,3$ мм/об; $\alpha = 12^\circ$ для чистовых резцов при $S < 0,3$ мм/об; $\alpha = 12...15^\circ$ для торцовых и цилиндрических фрез. Величины задних углов при обработке чугунов несколько меньше, чем при обработке сталей.

Выбор переднего угла γ . Как известно, чем больше передний угол γ , тем легче протекает процесс резания, т.е. тем меньше силы и температура резания, деформация срезаемого слоя, а, следовательно, выше период стойкости режущего инструмента. Однако следует учитывать, что с увеличением угла γ , уменьшается угол заострения β , вследствие чего ухудшается отвод теплоты. Поэтому кривые $T = f(\gamma)$ имеют характер, аналогичный графику $T = f(\alpha)$ (рис. 6.1.2).

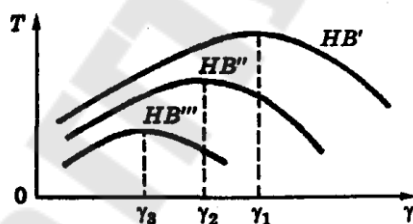


Рис. 6.1.2. Зависимость $T = f(\gamma)$ при различной твердости обрабатываемого материала ($HB' < HB'' < HB'''$)

Передний угол должен быть тем больше, чем меньше твердость и прочность обрабатываемого материала, и больше его пластичность. Для инструментов из быстрорежущей стали при обработке мягких сталей угол γ равен $20...30^\circ$, сталей средней твердости — $12...15^\circ$, чугуна — $5...15^\circ$, алюминия — $30...40^\circ$. У твердосплавного инструмента передний угол делается меньшим, а иногда даже отрицательным в силу того, что этот инструментальный материал менее прочный, чем быстрорежущая сталь. Однако уменьшение γ приводит к росту сил резания. Поэтому как в твердосплавных, так и в быстрорежущих инструментах широко используют положительно заточенную переднюю поверхность с отрицательной фаской вблизи режущей кромки (рис. 6.1.3). Фаска способствует повышению

прочности режущей кромки, а положительный передний угол уменьшает уровень сил резания.

Значения γ , f и γ_f для твердосплавного инструмента равны 15° , $(1,0...1,5)S$ и -5° , а для быстрорежущего — 30° , $0,8S$ и 0° .

Для обеспечения завивания стружки при скоростном точении на передней поверхности лезвия делают уступы, порошки или мелкие лунки. Их можно выполнить при заточке, а для твердосплавных пластин — в процессе прессования.

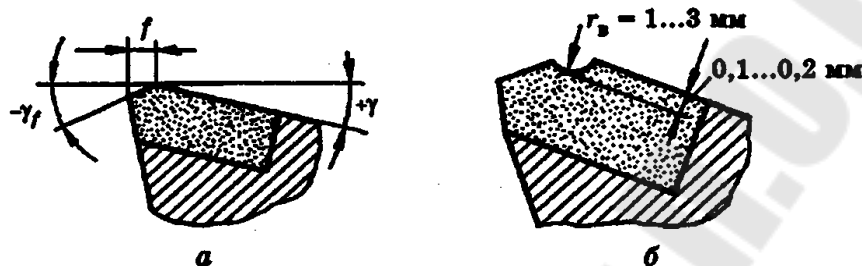


Рис. 6.1.3. Формы передней поверхности резца: *а* — с отрицательной фаской; *б* — с отрицательной фаской и лункой

Выбор главного угла в плане ϕ . При постоянных значениях S и t изменение угла ϕ приводит к изменению ширины и толщины срезаемого слоя. Чем меньше ϕ , тем больше ширина среза b и угол при вершине ϵ , и соответственно, лучше отвод теплоты. Иными словами: малые углы ϕ способствуют увеличению периода стойкости инструмента (рис. 6.1.4, *а*).

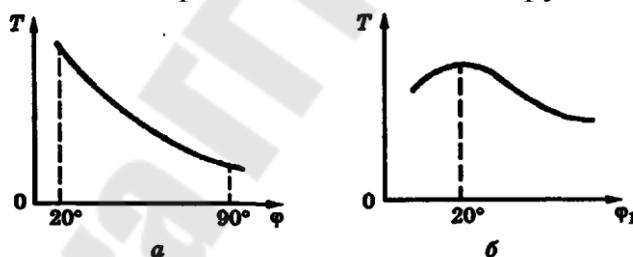


Рис. 6.1.4. Зависимость периода стойкости инструмента: *а* — от главного угла в плане; *б* — от вспомогательного угла

Отсюда следует, что для увеличения периода стойкости инструмента надо стремиться к уменьшению угла ϕ . Однако чрезмерное его уменьшение оказывается вредным, так как при этом наблюдается резкое возрастание радиальной составляющей P_y силы резания и увеличение вибраций. При обработке нежестких деталей для уменьшения радиальной составляющей P_y главный угол в плане ϕ следует увеличивать до 90° . В отдельных случаях угол ϕ назначают из конструктивных соображений.

Выбор вспомогательного угла в плане ϕ_1 . Выбор ϕ_1 преследует цель уменьшения трения вспомогательной задней поверхности инструмента об обработанную поверхность. Однако чем больше угол ϕ_1 , тем выше остаточные гребешки на обработанной поверхности. Кроме того,

уменьшается угол при вершине ε , а, следовательно, хуже отводится теплота. График зависимости стойкости резца от вспомогательного угла в плане $T = f(\varphi_1)$ представлен на рисунке 6.1.5, б. Для отдельных видов инструментов φ_1 колеблется в пределах от 0° до $2...3^\circ$. Например, у сверл и метчиков $\varphi_1 = 2...3'$, а у отрезного резца $\varphi_1 = 1...3^\circ$.

В ряде случаев на инструментах выполняют переходные режущие кромки. Они обеспечивают плавное сопряжение главной и вспомогательной режущих кромок. При наличии переходной кромки уменьшается шероховатость обработанной поверхности и повышается период стойкости режущего инструмента. Переходная режущая кромка выполняется прямолинейной (рис. 6.1.5, а) или по радиусу $r_s = 0,5...2$ мм (рис. 6.1.5, б). Обычно у проходных резцов длина переходной кромки $l = 2...3$ мм.

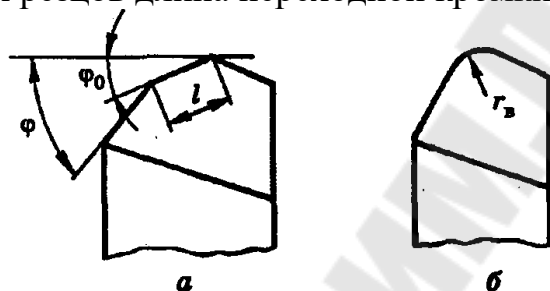


Рис. 6.1.5. Переходная прямолинейная (а) и радиусная (б) режущие кромки

Выбор угла наклона главной режущей кромки λ . При выборе угла λ необходимо учитывать следующее:

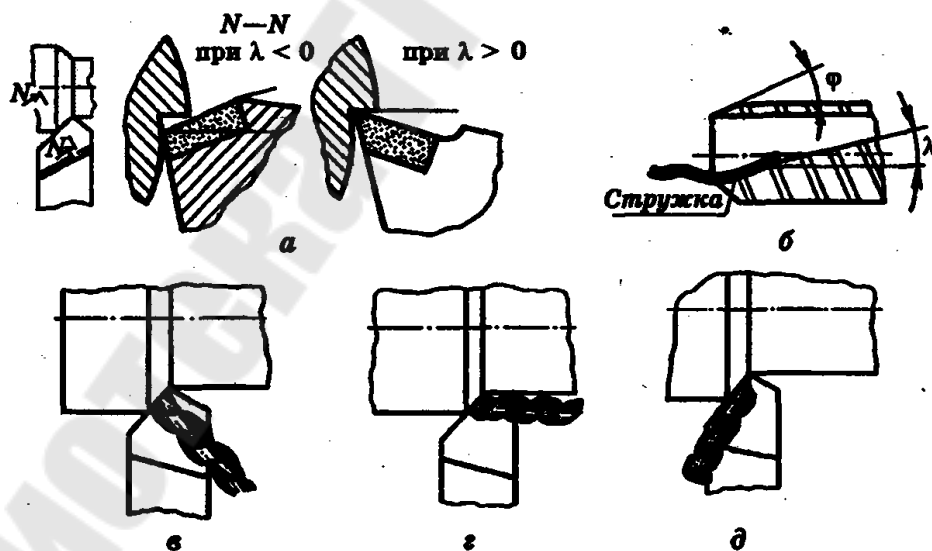


Рис. 6.1.6. К выбору угла наклона режущей кромки: а — резание с положительными и отрицательными углами λ ; б — направление схода стружки при нарезании резьбы метчиком с углом $+\lambda$; в, г, д — направление схода стружки при резании резцом соответственно с $\lambda = 0^\circ$, $\lambda > 0^\circ$, $\lambda < 0^\circ$

- чем больше положительный угол λ , тем больше масса металла около вершины инструмента (рис. 6.1.6, *а*) и лучше отвод теплоты;
- наряду с этим нужно учитывать, что положительные углы λ уменьшают передние углы, а это затрудняет работу резания;
- при положительных углах λ лезвие инструмента оказывается более прочным, что важно для твердосплавных инструментов, особенно при работе их с ударами и пульсирующими нагрузками;
- угол λ влияет на направление схода стружки и ее форму (рисунок 6.1.6, *б—д*); например, при нарезании резьб метчиком можно направить стружку в отверстие или из отверстия (для глухих резьб).

С учетом вышесказанного рекомендуемые углы для чистовых и черновых резцов из быстрорежущей стали равны соответственно $\lambda = 0^\circ \dots 4^\circ$ и $\lambda = 5 \dots 10^\circ$, для твердосплавных резцов при работе их без ударов и с ударами — $\lambda = 5 \dots 10^\circ$ и $\lambda = 5 \dots 20^\circ$.

Показатель *наибольшей производительности оборудования* при определенных условиях обеспечивает достижение максимальной выработки рабочего. Он применяется, в частности, при ликвидации узких мест, когда экономия «живого» труда имеет наибольшее значение.

Производительность оборудования можно выразить количеством деталей, обработанных за единицу времени:

$$Q = \frac{1}{T_o + T_{в.н} + T_{обс} + T_{от.л} + T_{п-з}}, \quad (1)$$

где T_o — основное время обработки одной детали; $T_{в.н}$ — вспомогательное неперекрываемое время, включающее время на установку и снятие детали, управление станком, измерение детали непосредственно на станке; $T_{обс}$ — время технического и организационного обслуживания рабочего места; $T_{отл}$ — время на отдых и личные надобности; $T_{п-з}$ — подготовительно-заключительное время, затраченное на подготовку к заданной работе (отнесенное к одной детали).

Другой критерий оптимальности — *это показатель затрат на эксплуатацию инструмента*. Он используется в тех случаях, когда возникает необходимость экономии дефицитного режущего инструмента, замена которого по тем или иным причинам нежелательна. Этот критерий предполагает наличие минимума стоимости инструмента, отнесенной к одной детали.

Стоимость эксплуатации режущего инструмента, отнесенная к одной детали,

$$S_H = S_T / N = T_o S_T / T,$$

где S_T — затраты, связанные с изготовлением и эксплуатацией режущего инструмента за период его стойкости;

N — количество деталей, обработанных за период стойкости инструмента.

Одноинструментная обработка. При разработке технологического процесса обработки детали важное значение имеет правильный выбор режима резания. Его можно обеспечить либо методом оптимизации по различным критериям, либо на основе приближенных расчетов с использованием справочников. В последнем случае существует строго определенная последовательность расчетов, изложенная ниже.

1. Прежде всего, выбирают инструментальный материал, конструкцию инструмента и геометрические параметры его режущей части. Материал режущей части выбирают в зависимости от свойств обрабатываемого материала, состояния поверхности заготовки, условий резания (общие рекомендации по выбору инструментальных материалов приведены в разделе 4). Геометрические параметры инструмента назначаются в зависимости от свойств обрабатываемого материала, жесткости технологической системы, вида обработки (черновая, чистовая или отделочная) и других условий резания.

2. Назначают глубину резания с учетом припуска на обработку. При черновой обработке желательно назначать глубину резания, обеспечивающую срезание 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) осуществляется при глубине резания $t = (0,6...0,75)h$ а второй (окончательный) — при $t = (0,3...0,25)h$. Обработка в два прохода в этом случае вызвана тем, что при снятии слоя толщиной свыше 2 мм за один проход качество обработанной поверхности низкое, а точность ее размеров недостаточная. При чистовой обработке в зависимости от точности и шероховатости обработанной поверхности глубину резания назначают в пределах 0,5...2 мм на диаметр, а при обработке с шероховатостью менее **Ra1,25** — в пределах 0,1...0,4 мм.

3. Выбирают подачу (при точении и сверлении — S_0 , мм/об, при фрезеровании — S_z , мм/зуб). При черновой обработке она устанавливается с учетом жесткости технологической станочной системы, прочности детали, способа ее крепления (в патроне, в центрах и др.), прочности и жесткости рабочей части режущего инструмента, прочности механизма подачи станка, а также установленной глубины резания. При чистовой обработке назначение подачи необходимо согласовывать с заданной шероховатостью обработанной поверхности и качеством точности, учитывая при этом возможный прогиб детали под действием сил резания и погрешности геометрической формы обработанной поверхности.

После выбора нормативной подачи выполняют проверочные расчеты. Например, подачу, выбранную для чернового точения с заданной глубиной резания, проверяют по осевой силе резания и прочности механизма подачи станка. При этом для данного обрабатываемого материала определяют

глубину резания и подачу, осевую силу и сопоставляют ее с силой, которую допускает механизм подачи станка и которая указывается в его паспорте. Осевая сила резания должна быть меньше или, в крайнем случае, равна силе, допускаемой механизмом подачи:

$$P_X = C_{P_X} t^{x_{P_X}} S^{y_{P_X}} K_{P_X} \leq P_{CT}$$

Если выбранная подача не удовлетворяет условиям прочности или жесткости инструмента и детали, необходимо понизить ее до уровня допустимой. Уменьшение подачи снижает силу резания, но глубина резания оказывает на силу более значительное влияние. 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 v_T , тогда как при уменьшении подачи v_T возрастает.

Необходимо отметить, что на практике проверочные расчеты по формулам выполняются редко ввиду их сложности. При необходимости используются таблицы предельно допустимых подач, приводимые в ряде справочников.

Принятая подача 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%.

4. Определяют скорость резания. Скорость резания, допустимая режущим инструментом при определенном периоде его стойкости, зависит от глубины резания, подачи, материала режущей части инструмента, его геометрических параметров, обрабатываемого материала, вида обработки, охлаждения и других факторов.

При данных глубине резания, подаче и периоде стойкости можно рассчитать скорость резания:

$$\text{при точении} \quad v = \frac{C_v}{T^m t^{x_v} S^{y_v}} K_v;$$

$$\text{при сверлении} \quad v = \frac{C_v D^{x_v}}{T^m S^{y_v}} K_v;$$

$$\text{при фрезеровании} \quad v = \frac{C_v D^{q_v}}{T^m t^{x_v} S^{y_v} B^{n_v} Z^{r_v}} K_v;$$

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, q_v, n_v, r_v — показатели степени.

Нормативные периоды стойкости принимаются с учетом экономических факторов и производственного опыта эксплуатации инструментов. Определяющими могут являться требования

производительности обработки, ее экономичности, минимума затрат на эксплуатацию инструмента и др. В конкретных условиях работы инструмента периоды стойкости могут быть различными. Однако их значительное увеличение требует снижения скорости резания, а значит, и производительности обработки, что экономически невыгодно.

В справочниках значения скоростей 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 умножают на поправочные коэффициенты, учитывающие свойства обрабатываемого и инструментального материалов, особенности обработки и т.д.

По расчетной скорости резания подсчитывают частоту вращения шпинделя станка: $n = 1000v/(\pi D)$. Полученное значение n уточняют по паспорту станка и принимают ближайшее из имеющихся на станке.

По действительной частоте вращения шпинделя определяют фактическую скорость резания:

$$v_{\phi} = \pi D n_{\phi} / 1000,$$

а при фрезеровании — также действительную минутную подачу $S_M = S_z z n_{\phi}$ с уточнением ее по паспорту станка.

5. При черновой обработке проверяют выбранный режим резания по мощности станка. В этом случае должно соблюдаться соотношение

$$N_p \leq 1,3\eta N_{CT},$$

где N_p — мощность резания, определяемая по таблицам или формулам путем использования значений P_z либо M_k и n (см. тема 2); 1,3 — коэффициент, учитывающий возможность кратковременной перегрузки электродвигателя станка; η — коэффициент полезного действия привода главного движения; N_{CT} — мощность электродвигателя.

Если окажется, что мощности электродвигателя станка, на котором должна производиться обработка, не хватает, надо выбрать более мощный станок. Если это невозможно, необходимо уменьшить выбранные значения v или S . Уменьшение v выгоднее, так как машинное время будет таким же, как и при уменьшении S , но зато период стойкости инструмента значительно возрастает.

6. Определяют основное время каждого прохода (формулы для его расчета при различных видах обработки приводятся в нормативно-справочной литературе):

$$T_o = \frac{l_1 + l + l_2}{nS},$$

где l — длина обрабатываемой поверхности; l_1 ; l_2 — длины соответственно врезания и перебега, определяемые по таблицам.

Пример 1. Рассчитать режим резания при токарной обработке на проход вала из стали 45 НВ 207; диаметр заготовки 80 мм, диаметр детали 72 мм, длина обработки 60 мм, обработка черновая, станок 16К3ОФЗ.

Решение. 1. Выбираем для обработки резец, оснащенный квадратной неперетачиваемой пластиной из твердого сплава Т15К6 с углом в плане $\varphi = 45^\circ$, радиусом вершины $r_\phi = 1,2$ мм.

2. Глубина резания $t = (80 - 72)/2 = 4$ мм.

3. Согласно карте 3.1 [7] выбираем подачу для черновой обработки:

$$S = S_{\text{табл}} K_{S1} K_{S2} K_{S3} K_{S4} = 0,60 \cdot 0,8 \cdot 1,0 \cdot 1,1 \cdot 1,0 = 0,48 \text{ мм/об},$$

где $S_{\text{табл}}$ — табличное значение подачи; $K_{S1} K_{S2} K_{S3} K_{S4}$ — поправочные коэффициенты, учитывающие соответственно габариты станка, твердость обрабатываемого материала, вид обработки и радиус вершины.

Подачу $S = 0,48$ мм/об можно реализовать на станке, поскольку его привод подач бесступенчатый.

4. По карте 3.3 определяем:

$$v = v_{\text{табл}} K_{v1} K_{v2} K_{v3} K_{v4} = 166 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,15 \cdot 1,0 \cdot 1,0 = 191 \text{ м/мин},$$

где $v_{\text{табл}}$ — табличное значение скорости резания; $K_{v1} K_{v2} K_{v3} K_{v4}$ — поправочные коэффициенты, учитывающие соответственно влияние инструментального материала, свойств и твердости обрабатываемого материала, формы пластины, вида обработки и периода стойкости резца (в нашем случае принято $T = 30$ мин).

Тогда частота вращения шпинделя станка $n = 1000 \cdot 191 / (80 \pi) = 760$ об/мин; эту величину обеспечивает бесступенчатый привод главного движения станка.

5. По карте в рекомендациях по рациональной эксплуатации режущего инструмента на токарных станках с ЧПУ, определяем:

$$N_p = N_{\text{табл}} K_N K_{v1} K_{v2} K_{v3} K_{v4} K_{v5} K_{v6} = \\ = 9,8 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,15 \cdot 1,0 \cdot 1,0 = 11,27 \text{ кВт},$$

где $N_{\text{табл}}$ — табличное значение мощности резания; K_N — поправочный коэффициент, учитывающий твердость стали.

В нашем случае $N_p = 11,27 < 1,3 \cdot 22 \cdot 0,8 = 22,9$ кВт.

6. Основное время при обработке вала

$$T_0 = (5 + 60 + 2) / (760 \cdot 0,48) = 0,18 \text{ мин. (1)}$$

Многоинструментная обработка на автоматизированном оборудовании. Выбор наивыгоднейших режимов резания при многоинструментной обработке — сложная задача, так как наряду с учетом особенностей работы каждого отдельного инструмента необходимо провести общий анализ всей наладки, т.е. совокупности инструментов, используемых на станке, и распределения между ними переходов обработки. Общие принципы расчета режима резания в этом случае аналогичны расчетам при одноинструментной обработке.

1. После выбора инструментальных материалов, конструкции и геометрии инструментов для каждого из них назначают наибольшую возможную в данных условиях глубину резания.

2. Выбирают максимально допустимые по технологическим требованиям и конструкции станка подачи, сначала для отдельных инструментов, а затем для всего суппорта или шпинделя. Если подачи нескольких инструментов связаны между собой, принимают наименьшую из них.

3. Выбирают периоды стойкости режущих инструментов. Они должны быть *больше, чем при одноинструментной* обработке, так как в нашем случае значительно увеличиваются затраты времени на смену и подналадку инструментов, их суммарная стоимость и расходы на переточку. В наиболее простом случае, когда одновременно работает n одинаковых инструментов в совершенно одинаковых условиях, принимают $T_{\Sigma} = nT$, где T — оптимальный период стойкости режущего инструмента при одноинструментной обработке, рассчитанный по формулам примера 1. Как правило, на станке одновременно работают различные по конструкции и нагруженности инструменты и определение наивыгоднейшего периода их стойкости сложно и трудоемко. В связи с этим, а также с необходимостью уточнения режимов резания непосредственно в ходе обработки партии деталей обычно используют упрощенные методы расчета. Они базируются на том, что в наладке имеется небольшое количество инструментов с самыми низкими периодами стойкости, тогда как у некоторых инструментов они очень велики. Инструмент, период стойкости которого будет минимальным, называется *лимитирующим*, т.е. ограничивающим режим резания. Такой инструмент поднастраивается и меняется наиболее часто. Связанные с этим простои сильно влияют на производительность станка и стоимость обработки. Поэтому при расчете режимов резания для многоинструментных станков за основу принимается лимитирующий инструмент. Именно для него назначают скорость резания, обеспечивающую требуемый период стойкости. При этом необходимо учитывать, что данный период должен быть значительно выше, чем для одноинструментной обработки, поскольку учитывает сложность наладки и количество входящих в нее инструментов. Для одношпиндельных прутковых токарных автоматов период стойкости принимают до 120 мин машинной работы, а для многошпиндельных — 150 мин. Это составляет соответственно 3-4 и 2-3 замены инструмента в течение рабочей смены.

Как указывалось, табличные значения периодов стойкости измеряются в минутах машинной работы. Это существенное отличие по сравнению с одноинструментной обработкой, когда период стойкости измеряется в минутах времени резания. В первом случае длины рабочих ходов инструмента $L_{p,x}$ могут быть значительно больше, чем длина резания

L_p (рис. 6.1.8). Их соотношение определяется коэффициентом времени резания $\lambda = L_p / L_{p,x} = T / T_M$, где T_M — период стойкости (в минутах машинной работы). Если $\lambda > 0,7$, его можно не учитывать и принимать $T = T_M$. Если же $\lambda < 0,7$, в дальнейших расчетах скорость резания находят для периода стойкости $T = \lambda T_M$.

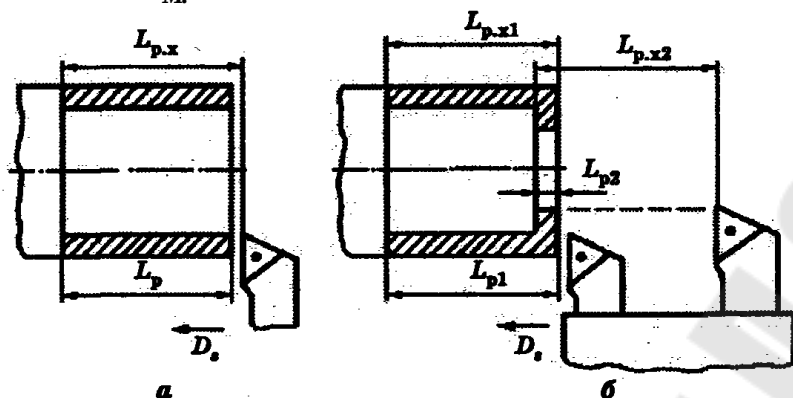


Рис. 6.1.7. Соотношение длин резания и рабочего хода при обработке: *а* — одноинструментной; *б* — многоинструментной

4. Определяют скорость резания, обеспечивающую требуемый период стойкости лимитирующего инструмента, и соответствующую ей частоту вращения шпинделя, которую уточняют по паспорту станка. Расчеты выполняются аналогично расчетам при одноинструментной обработке. В случае использования сразу нескольких лимитирующих инструментов выбирают минимальную частоту вращения.

Если каждому из инструментов наладки может соответствовать своя частота вращения шпинделя, например для агрегатного станка, ее определяют отдельно для каждого инструмента при условии его изолированной работы, приняв период стойкости равным T_M .

При работе на многооперационных станках с ЧПУ применяют два варианта определения v_T . Первый используют для станков с возможностью наблюдения за процессом обработки или станков, снабженных устройствами контроля состояния режущих инструментов. Тогда вся методика назначения режима резания каждым инструментом соответствует случаю одноинструментной обработки.

Второй вариант используют при организации работы станков с минимальным участием оператора и при наличии средств регистрации количества обработанных деталей или времени наработки инструментов на отказ. Если на многооперационном станке с ЧПУ требуется обработать определенную партию деталей, после расчета времени резания каждым инструментом определяют количество q деталей, обрабатываемых им за принятый период стойкости T_M .

$$\tau_p = \sum \frac{L_{pi}}{n_i S_{oi}}; q = \frac{T_M}{\tau_p},$$

где τ_p — время резания i -м инструментом на всех переходах обработки детали; k — количество переходов.

Для лимитирующих инструментов, которые обрабатывают наименьшее количество деталей и вносят наиболее значительный вклад в общее время обработки, задается количество деталей q_T , обрабатываемых за принятый период стойкости, которое кратно объему партии деталей N , причем $q_T \geq q$. При этом предполагают, что нелимитирующие инструменты будут заменены после обработки всей партии деталей (если $q_i \geq 0,8q$), либо одновременно с лимитирующими (если $q_i \leq 0,8q$). Таким образом, производится выравнивание q_T внутри каждой группы инструментов. Затем рассчитывают скорость резания с учетом вероятности безотказной работы инструмента. Для этого пользуются соответствующими поправочными коэффициентами, принимая за исходную вероятность безотказной работы $P = 0,7$. Частота вращения инструмента на первом переходе для данной вероятности:

$$n_{i0,7} = n_i \left(\frac{q}{q_T} \right)^{\frac{m_i}{1-m_i}}$$

где n_i — частота вращения, найденная по методике, рассмотренной в п. 4; m_i — показатель относительной стойкости инструмента при работе на i -м переходе.

5. Определяют основные времена работы каждого инструмента. Если они резко различаются, необходимо принять меры по их выравниванию. Это можно сделать путем перераспределения между инструментами припуска на обработку, изменения структуры переходов, уменьшения подач и частот вращения отдельных суппортов или шпинделей, в которых установлены нелимитирующие инструменты. Интервал варьирования частот вращения шпинделей рекомендуется принимать в следующих пределах:

$$n_1 = \frac{n_{\min} T_{0\max}}{T_{0\min}}; n_2 = \frac{n_{\max} T_{0\min}}{T_{0\max}};$$

где $n_{\min}, n_{\max}$ — соответственно наименьшая и наибольшая частоты вращения, обеспечиваемые станком; $T_{0\min}, T_{0\max}$ — наименьшее и наибольшее основное время для различных инструментов наладки.

6. После корректировки режимов резания выполняют проверочный расчет по мощности резания. Для этого сравнивают сумму мощностей резания всех инструментов, одновременно работающих на станке, с мощностью привода главного движения.

Тема 6.2. Интенсификация и регулирование процесса резания

Основными способами регулирования процесса резания путем воздействия на контактные явления являются:

- применение смазочно-охлаждающих технологических сред (СОТС);
- резание инструментами с повышенными эксплуатационными свойствами;
- использование новых интенсивных способов обработки с дополнительным вводом энергии в зону резания.

По классификации все СОТС по их агрегатному состоянию разделены на четыре типа: газообразные, жидкие, пластичные и твердые.

Газообразные СОТС. В качестве СОТС этого типа применяют нейтральные (азот, аргон, гелий) и активные, кислородосодержащие (воздух, кислород, диоксид углерода), газы. Активные газы не только играют роль охладителя, но и защищают поверхность трущихся металлов от изнашивания, образуя на них оксидные пленки.

В среде кислорода можно затачивать режущий инструмент из инструментальных сталей и твердых сплавов, точить и сверлить кислотостойкие и жаропрочные сплавы, шлифовать специальные стали и сплавы. Однако применение газообразных СОТС не получило широкого распространения в практике.

Жидкие СОТС наиболее распространены. Их принято называть *смазочно-охлаждающими жидкостями (СОЖ)*. Они разделены на классы: масляные, водосмешиваемые (водные), быстрорастворяющиеся и расплавы некоторых металлов.

Масляные СОЖ. Состоят из минерального масла, являющегося базовым, к которому могут быть добавлены антифрикционные, антиизносные и антизадирные присадки, ингибиторы коррозии, антиоксиданты, антипенные и антитуманные присадки.

Минеральное масло в масляных СОЖ занимает 60-95% (в процентах по массе). Обычно это высокоочищенные нафтеновые или парафиновые масла. Иногда в качестве основы для масляных СОЖ используют смесь из нескольких (2-3) минеральных масел. Используют также в качестве базы маловязкие экстракты селективной очистки, очищая их каталитическим гидрированием, что снижает их стоимость. При выборе базовых минеральных масел учитывают, прежде всего, их физико-химические свойства (вязкость, индекс вязкости, групповой углеродный состав) и обусловленные ими смазочные, антиокислительные и другие характеристики, влияющие на процесс трения и износ инструмента.

Синтетические масла из-за их высокой стоимости используют иногда в виде добавок.

Антифрикционные присадки - это обычно технические растительные масла и жиры (рапсовое масло, свиной жир), жирные кислоты и их эфиры, а также полимерные ненасыщенные жирные кислоты. Их содержание обычно составляет 5-25%. В связи с их дефицитностью ведутся работы по замене жировых продуктов естественной природы на синтетические.

Антиизносные присадки - уменьшают износ режущего инструмента при возрастании нагрузке. Из них в составе масляных СОЖ наиболее известны диалкилфосфиты, а также осерненные жиры и полимерные жирные кислоты. Концентрация противоизносных присадок в масляных СОЖ обычно 0,5-5%, она зависит от назначения продукта, а также состава других присадок.

Антизадирующие присадки предотвращают схватывание и износ режущего инструмента при наиболее тяжелых температурных и механических нагрузках. Это чаще всего вещества, содержащие серу, хлор, фосфор. В зависимости от условий применения масляных СОЖ содержание в них серы составляет от 0,5-3% (сульфиды и полусульфиды) до 3-20% (осерненные жиры). Хлоросодержащие противозадирующие присадки менее распространены. Самая распространенная из них - хлорированный парафин. Хлоросодержащие присадки в количестве 3-15% применяют при обработке высоколегированных сталей.

Ингибиторы коррозии предотвращают коррозионное воздействие масляных СОЖ на изготавливаемые детали и детали станка, вызывается продуктами окисления минеральных масел, присадками, а также продуктами их разложения. По склонности к коррозии обрабатываемые материалы различаются весьма широко, и это обстоятельство учитывают того или иного способа противокоррозионной защиты. В ряде случаев достаточно эффективными ингибиторами коррозии являются присадки, используемые для улучшения смазочных свойств СОЖ: полимерные ненасыщенные жирные кислоты, дисульфиды, аминокислоты.

Антипенные присадки добавляют в масляные СОЖ для предотвращения пенообразования. Наибольшее распространение получили диметилсиликоновые полимеры. Требуемые количества этих веществ 0,0005-0,001%.

Антитуманные присадки снижают образование и выделение масляного тумана (аэрозоля) при работе с СОЖ на масляной основе. В качестве антитуманных присадок рекомендуется полиолефины, аттактический полипропилен. Эти присадки обычно вводят в количестве 0.5-3%. Масляные СОЖ обладают хорошими смазывающими свойствами, обеспечивают продолжительный срок службы режущего инструмента, предохраняют обрабатываемый металл и детали станков от коррозии.

Масла без присадок применяют при обработке магния, латуни, бронзы, меди и углеродистых сталей при легких режимах резания. Однако

они мало эффективны при обработке труднообрабатываемых сталей и сплавов, особенно при тяжелых режимах резания.

Недостатками масляных СОЖ являются сравнительно низкие охлаждающие свойства и низкая термическая стабильность, пожароопасность, повышенная испаряемость и высокая стоимость.

Водосмешиваемые СОЖ. Такие СОЖ могут содержать эмульгаторы, нефтяные масла, воду, спирты, гликоли, ингибиторы коррозии, бактерициды, противоизносные, противозадирные и антипенные присадки, электролиты и другие, органические и неорганические продукты. Эти СОЖ применяют в виде эмульсий или истинных водных растворов при абразивной и лезвийной обработке (легкие и средние режимы резания) черных и цветных металлов. Преимуществами водосмешиваемых СОЖ является более высокая, чем у масляных СОЖ, охлаждающая способность, относительно низкая стоимость, пожаробезопасность и меньшая токсичность; недостатки - сравнительно невысокие смазывающие свойства, низкая эффективность на отдельных операциях и недостаточно высокая стабильность свойств во времени. Водосмешиваемые СОЖ разделены на четыре подкласса: эмульгирующиеся (эмульсолы), полусинтетические, синтетические, растворы электролитов.

Эмульгирующиеся СОЖ (эмульсолы) при смешивании с водой образуют эмульсии. В качестве основы эмульсолов используют средневязкие нефтяные масла нафтенового или смешанного типа, содержание которых в эмульсоле может достигать 85%. Применяют эмульсолы в виде 1-5%-ных эмульсий в воде.

Эмульгаторы являются поверхностно-активными веществами (ПАВ) и, кроме уменьшения поверхностного натяжения, они выполняют роль смазочных веществ и ингибиторов коррозии. В качестве эмульгаторов наибольшее распространение в составе эмульсолов получили анионоактивные ПАВ, а также их смеси: калиевые, натриевыми мыла жирных, смоляных и сульфокислот.

Полусинтетические СОЖ принципиально не отличаются от эмульсолов по компонентному составу, однако они существенно отличаются от них по концентрации компонентов. Основу полусинтетических СОЖ составляет вода (до 50%) и эмульгаторы (до 40%). Обязательным компонентом является маловязкое (3-10 кв. мм/с при 50⁰С) нефтяное масло. Полусинтетические СОЖ, как и эмульсолы, могут содержать биоциды, противоизносные и противозадирные присадки. Их используют в виде 1-10%-ных водных растворов. Синтетические СОЖ представляют собой смесь водорастворимых полимеров, поверхностно-активных веществ, ингибиторов коррозии, биоцидов, антипенных присадок и воды. В их состав для повышения смазывающих свойств вводят противоизносные и противозадирные присадки. Синтетические СОЖ могут

быть приготовлены в виде порошков. Их применяют в виде 1-10% водных растворов. По универсальности, продолжительности сохранения эксплуатационных свойств синтетических СОЖ, как правило, превосходят эмульсии.

Быстроиспаряющиеся СОЖ. Основу данных СОТС составляют быстроиспаряющиеся галогенпроизводные углероды. Испаряясь, они охлаждают режущий инструмент и обрабатываемое изделие и оставляют на трущихся поверхностях тонкие смазывающие слои присадок, входящих в их состав. Быстроиспаряющиеся СОТС применяют при обработке резанием труднообрабатываемых сплавов и пакетов из пластин разнородных материалов на операциях сверления, развертывания, нарезания резьбы и протягивания.

Пластичные СОТС. обычно представляют собой пластичные смазки. Их используют в мелкосерийном производстве при нарезании резьбы (метчиками и плашками), сверлении, протягивания и развертывания, при полировании и обработке металлов напильниками. Применение пластичных СОТС ограничивается трудностью введения их в зону резания, невозможностью сбора, очистки и повторного применения. Пластичные СОТС разделены на следующие классы: смазки на углеводородной основе (парафин, воск и некоторые полимеры), мыльные (натриевые, литиевые, кальциевые, бариевые, свинцовые и др.) и неорганические (глина, слюда, асбест и др.) загустители.

Твердые СОТС. По химическому составу подразделены на три класса: неорганические продукты слоистой структуры (тальк, графит, слюда, дисульфид молибдена и др.); органические соединения (воски, мыла, твердые жиры, полимеры); мягкие металлы (олово, свинец, медь). Применяют их в особо трудных условиях (при высоких температурах и нагрузках), а также в тех случаях, когда другие типы СОТС не эффективны. Твердые смазки наносят в качестве поверхностных покрытий на режущий инструмент или обрабатываемый металл. По применению все СОТС разделены на две группы - массового и специального применения. СОТС массового назначения пригодны для ряда операций обработки металлов резанием при различных режимах. Они в свою очередь разделены на три подгруппы: обычные, универсальные и многоцелевые. Обычные обеспечивают выполнение нескольких операций обработки резанием той или иной группы черных или цветных металлов, универсальные - широкий круг операций обработки резанием черных и цветных металлов. К СОТС специального назначения отнесены газообразные, пластичные и твердые смазочно-охлаждающие технологические среды.

Все виды СОТС независимо от области их применения должны удовлетворять следующим основным требованиям:

— не снижать эксплуатационных характеристик деталей, изготовленных при их применении, прежде всего коррозионную стойкость и прочность;

- быть устойчивыми при эксплуатации и хранении (бактериологическая стойкость, морозостойкость);

- не воспламеняться при температурах, сопровождающих процесс резания;

- иметь удовлетворительные санитарно-гигиенические свойства (не оказывать аллергического, дерматологического или иного вредного воздействия на организм человека);

- не оказывать коррозионного действия на инструмент, узлы и механизмы станка.

Технологической среды в процессе резания осуществляют следующие:

1. смазочное действие;

2. охлаждающее действие;

3. диспергирующее действие;

4. моющее действие.

Смазывающее действие СОЖ. Смазывающее действие СОЖ проявляется преимущественно в зоне контакта резца и стружки, а также контакта резца и заготовки. Оно обусловлено способностью СОЖ вступать в физическое, химическое и физико-химическое взаимодействие с активированными поверхностями контактной зоны и образовывать на них гидродинамические, физические (адсорбционные) и химические смазочные пленки. В зависимости от условий резания такие пленки могут образовываться порознь или одновременно. Физические и химические смазочные пленки принято называть граничными. Их толщина колеблется от нескольких десятков до нескольких сотен ангстрем. Сопротивление сдвигу у них выше, чем у гидродинамических пленок. В случае образования при резании металлов гидродинамических смазочных пленок (например, обработка меди при низких скоростях) трущиеся поверхности разделены слоем СОЖ в несколько микрон и более. Здесь вязкость СОЖ имеет преобладающее значение и должна быть оптимальной. Иногда вязкость может быть компенсирована серо-, хлор- или фосфорсодержащими присадками.

Адсорбционные смазочные пленки образуются при малых давлениях и низких температурах. Поверхностно-активные молекулы, содержащиеся в СОЖ, адсорбируются слоями на контактирующих металлических поверхностях. Толщина пленки может включать от нескольких до 500 молекулярных слоев. Такая пленка выдерживает большие нормальные нагрузки, однако, слабо сопротивляется действию касательных напряжений. Чем выше устойчивость граничной пленки к действию нормальных и чем

ниже к действию касательных напряжений, тем меньше коэффициент трения и тем выше смазывающая способность среды. Наиболее прочно адсорбируются на поверхности металла молекулы олеиновой кислоты, некоторых растительных масел и синтетических ПАВ. Поэтому они широко используются в композициях масляных СОЖ. Присутствие влаги и кислорода ускоряет процессы хемосорбции. Существенную роль при образовании пленок играет температура, при ее повышении рост пленок уменьшается, а скорость образования химических пленок увеличивается. При операциях с высоким выделением тепла более эффективны химические смазывающие пленки, образуемые на контактирующих поверхностях за счет противоизносных и противозадирных присадок. В зоне контакта происходит распад молекул присадок с образованием атомов и радикалов, которые вступают в химическую реакцию с металлом, образуя смазочный слой.

Смазывающее действие СОЖ проявляется еще и в том, что углерод, кислород, сера, фосфор и другие элементы, входящие в состав, в условиях высоких давлений, напряжений и температур не только реагирует с поверхностью металла с образованием граничной смазочной пленки, но и диффундируют в тончайшие поверхностные слои трущихся металлических поверхностей, образуя эвтектические сплавы с более низкими коэффициентами трения. В результате чего облегчаются процессы трения и пластической деформации металла.

Многими исследованиями установлено положительное влияние смазывающего действия СОЖ на процессы, предотвращающие налипание и наростообразование на лезвии инструмента, изменяющие форму стружки и длину контакта стружки с передней поверхностью инструмента, в результате чего уменьшаются теплообразование, усилия резания и шероховатость обрабатываемой поверхности. Смазывающее действие СОЖ зависит от операции и режима резания, свойств обрабатываемого и инструментального материалов и определяется в основном скоростями образования и изнашивания граничных смазочных пленок, а также их составом, строением и свойствами.

Охлаждающее действие СОЖ. При резании основная часть механической энергии преобразуется в теплоту. Охлаждающее действие СОЖ основано на законах теплообмена. Нагретые до высоких температур режущий инструмент, заготовка и стружка передают путем конвективного теплообмена смазочно-охлаждающей среде часть тепла. Кроме того, теплоотвод при резании может осуществляться вследствие теплопередачи излучением, испарением среды и протекания химических реакций, происходящих при поглощении тепловой энергии. Теплоотводы, связанные с излучением, испарением и химическими реакциями, невелики. Поэтому при оценке охлаждающего действия СОЖ ограничиваются рассмотрением конвективного теплообмена, который зависит, главным образом, от

теплофизических свойств и гидродинамических условий подачи жидкости. На теплообмен наиболее сильно влияют вязкость, теплопроводность, теплоемкость, плотность и смачиваемость СОЖ, а также разность температур охлаждаемой поверхности и потока жидкости.

В процессе резания наибольшему воздействию высокой температуры подвергается инструмент. Исследования показывают, что применение смазочно-охлаждающей среды не препятствует возникновению высокой температуры в инструменте. Однако действие СОЖ существенно уменьшает область нагрева инструмента. При этом подача эмульсии под давлением на вспомогательную заднюю поверхность инструмента более эффективна, чем ее полив свободно падающей струей на переднюю поверхность инструмента. Для ряда операций обработки металлов резанием эффективность охлаждающего действия СОЖ повышается при подаче жидкости в распыленном состоянии, под давлением или через внутренние каналы в инструменте по сравнению с подачей СОЖ поливом свободно падающей струей.

Однако охлаждающее действие СОЖ может иметь и отрицательные последствия. Так, например, при фрезеровании (прерывистое резание) твердосплавным инструментом с высокой скоростью резания, применение СОЖ приводит к значительным колебаниям температуры режущей части фрезы и уменьшению ее стойкости. Кроме того, интенсивное охлаждение поверхности обрабатываемого изделия приводит, как правило, к возникновению в металле внутренних напряжений растяжения, что ухудшает эксплуатационные свойства изделия.

Диспергирующее действие СОЖ. Под этим действием СОЖ подразумевается их способность облегчать деформацию, разрушение и дробление (диспергирование) металла, т.е. оказывать действие, способствующее образованию новой поверхности. В присутствии ПАВ облегчается зарождение и распространение микротрещин в металле. Полярные молекулы продвигаются по стенкам образующихся трещин до тех пор, пока их размеры не станут больше размеров трещин. В результате в самых узких местах микротрещин возникают дополнительные расклинивающие давления, вызываемые адсорбционными слоями, что приводит к "охрупчиванию" металла и его разрушению. Хрупкость металла может повышаться за счет диффузии атомов и ионов СОЖ в деформируемые слои. В результате этого процесса металл в зоне деформации быстрее достигает предельной прочности и разрушается при меньших затратах энергии.

Моющее действие СОЖ. В процессе резания металла образуются стружка и шлам, состоящий из мелкодисперсной стружки, частиц износа инструмента и трущихся деталей станка, окалины, пыли, грязи, продуктов термоокислительной деструкции компонентов СОЖ и жизнедеятельности

микроорганизмов. Твердые коллоидные частицы шлама проникают в микронеровности обрабатываемой заготовки, деталей станков и инструмента, где прочно удерживаются электростатическими и механическими силами. Скопление частиц шлама приводит к снижению стойкости инструмента и ухудшению качества обрабатываемой поверхности. Поэтому СОЖ должны смыть и унести крупную стружку или металлические опилки, предотвратить образование лакообразных отложений и нагара на поверхностях изделия и инструмента, нагретых до высоких температур. Моющее действие СОЖ представляет собой совокупность физико-химических процессов, приводящих к очистке поверхностей обрабатываемой заготовки, инструмента и деталей станка от шлама. Смыв и эвакуация крупной стружки или продуктов шлифования, накапливающихся в зоне резания, является одной из важных функций СОЖ. Смывающее действие в значительной степени зависит от количества СОЖ, подаваемой в зону резания, скорости потока и метода подачи жидкости. Эффективность смывающего действия СОЖ повышается с введением в ее состав моющих веществ.

Эффективность эксплуатации металлообрабатывающего оборудования во многом зависит от правильного выбора и применения СОЖ.

При хонинговании большинства металлов используются маловязкие масляные СОЖ с хлоросодержащим или серо- и хлоросодержащими присадками (ОСМ-1). Хонингование при легких режимах осуществляется с применением маловязкого масла с добавками растительных или животных жиров (ВИ-2).

Шлифование различных материалов производят в основном с помощью водных СОЖ (Аквол-2, Аквол-6, Аквол-15). Однако при шлифовании нержавеющей и жаропрочных сталей и сплавов серосодержащие и хлоросодержащие масляные жидкости (ОСМ-3). Маловязкие масляные СОЖ (ОСМ-4) широко применяют при отделочном шлифовании цветных металлов.

При силовом и скоростном шлифовании металлов в основном находят применение серосодержащие или хлоросодержащие масляные СОЖ (МР-10, Укринол-14) в зависимости от обрабатываемого материала и режима резания. Цветные металлы и легкие сплавы лучше обрабатывать с применением эмульгирующихся, полусинтетических СОЖ.

Обработка цветных металлов и углеродистых сталей на токарных автоматах ведется с применением масляных СОЖ (ОСМ-1).

При зубообработке в основном распространены различные виды масляных СОЖ (МР-5У). Эмульгирующиеся (в том числе с активными присадками) нашли применения при нарезании зубьев на деталях из цветных и легких металлов и сплавов, а также на низкопрочных сталях.

На операциях нарезания резьбы и протягивания в большинстве случаях наиболее эффективны масляные СОЖ (МР-99, МР-7), содержащие активные элементы: серу и/или хлор. Водные СОЖ целесообразно применять только при обработке низкопрочных сталей, цветных и легких металлов и их сплавов, а также при нарезании резьбы в деталях из сталей и сплавов (Аквол-10м, Аквол-1).

Обработку титановых сплавов на операциях шлифования, точения и фрезерования производят с применением водных СОЖ (Аквол-10м, Аквол-2). При сверлении, работе на станках - автоматах, глубоком сверлении, зубообработке, нарезании резьбы и протягивании используются специальные масляные СОЖ Т (ОСМ-5) и эмульгирующиеся жидкости, активированные противоизносными и противозадирными присадками.

При обработке на станках с ЧПУ и на технологических модулях гибких автоматизированных производств используют, в основном, следующие виды СОЖ: Аквол-10м, Аквол-14, Карбомол П-1, Аквол-1, Аквол-2, Э-2, ЭТ-2, НГЛ-205 - все из подклассов эмульсий, синтетических и полусинтетических СОЖ.

Аквол-10м - концентрат на гликолевой основе, содержит анионоактивные и неионогенные эмульгаторы и незначительное количество жировых присадок. Аквол-10м предназначен для приготовления синтетических СОЖ с широкой областью применения.

Аквол-14 - представляет собой концентрат на основе полиакиленгликолей, содержит трибополимеризирующие присадки и добавки, придающие СОЖ необходимый комплекс свойств. При смешивании с водой образует прозрачные, бесцветные или слегка окрашенные растворы. Применяют при обработке резанием черных металлов и сплавов.

Карбомол П-1 - сбалансированная смесь эмульгатора с минеральным маслом, которая используется на операциях лезвийной обработки.

Укринол-14 - средневязкая смесь минеральных масел, содержащая хлорные, фосфорные и жировые присадки. Смесь применяются при скоростном, силовом и глубинном шлифовании инструментальных сталей.

МР-10 (ТУ 38 101973-85) - средневязкая смесь неактивного вида, содержащая антифрикционные, противоизносные, противозадирные присадки. Применяется при силовом и скоростном шлифовании сталей.

ОСМ-1 (ТУ 38 УССР 201228-81) - маловязкая смесь неактивного вида, содержащая противозадирные и другие присадки. Применяется при обработке чугунов, легированных, конструкционных и инструментальных сталей на операциях сверления, развертывания, фрезерования и шлифования, а также при обработке коррозионностойких, жаропрочных, жаростойких сталей и сплавов на операциях фрезерования и шлифования.

МР-7 - осерненное минеральное масло средней вязкости. Применяют при средних и тяжелых режимах резания сталей и сплавов на токарных

автоматах и отдельных операциях сверления, глубокого сверления отверстий диаметром более 30 мм, точения, фрезерования, развертывания, протягивания, резьбо- и зубонарезания.

В условиях работы автоматизированного производства выбор видов СОЖ и контроль их качества должны быть автоматизированы (с помощью ЭВМ и других технических средств) и осуществляться в отдельной подсистеме, входящей в автоматизированное производство наряду с другими подсистемами и взаимодействующая с ними.

Это ситуация выдвигает новые требования к СОЖ: оптимизация товарного состава СОЖ, обеспечивающих максимальное число различных операций обработки, а также необходимость оперативного контроля и коррекции эксплуатационных свойств СОЖ, влияющих на надежность работы всего производства.

Оптимизация состава СОЖ предполагает использование такого их ассортимента, чтобы обеспечивался минимум приведенных затрат.

При применении СОЖ одного типа можно использовать централизованную систему подачи СОЖ. Эти системы применяются для обеспечения жидкостями автоматических линий и гибких производственных систем. СОЖ подается к станкам непосредственно из централизованной установки. Отработанные жидкости возвращаются в установку по подземным трубопроводам. Применение централизованной системы исключает необходимость иметь на каждом станке насос, фильтры и другое оборудование для подачи СОЖ, сокращает простои оборудования и дает возможность поддерживать качество жидкостей в процессе их эксплуатации. Современные централизованные системы автоматически выполняют операции приготовления, подачи, охлаждения, стабилизации качества, очистки и регенерации СОЖ. Но они могут ограничивать производительность обработки и в некоторых случаях понижать качество обработанной поверхности из-за использования одного типа СОЖ.

Оптимальный ассортимент СОЖ должен включать жидкости как универсальные (для широкого круга операций обработки резанием различных обрабатываемых материалов), так и специализированные (применяемые на отдельных операциях или при обработке только одного материала, или решения других специальных задач).

Автоматический выбор СОЖ основан на поиске марок СОЖ, отвечающих необходимым требованиям.

Последовательность выбора:

1. выбор из общего массива справочных данных, определяемыми заданными условиями механической обработки в конкретных условиях (вид операции, обрабатываемый и инструментальный материал, режимы резания, геометрические параметры режущего инструмента и др.);

2. определение наличия универсальных СОЖ в полученном массиве;
3. определение количества возможно совместимых СОЖ;
4. расчет оптимального числа марок СОЖ.

Контроль СОЖ осуществляется путем встраивания в систему подачи СОЖ автоматической измерительной системы состояния СОЖ.

Способы ввода технологической среды в зону резания следующие:

1. свободно падающей струей;
2. напорной струей;
3. струей воздушно-жидкостной смеси /в распыленном состоянии/;
4. через каналы в теле режущего инструмента.

Подача СОЖ чаще всего осуществляется свободнопадающей струей (поливом) (рис. 6.2.1). Свободно падающая струя истекает из сопел различных конструкций под давлением 0,03-0,1 МПа, (т.е. под действием силы тяжести) и обильно поливает зону резания.

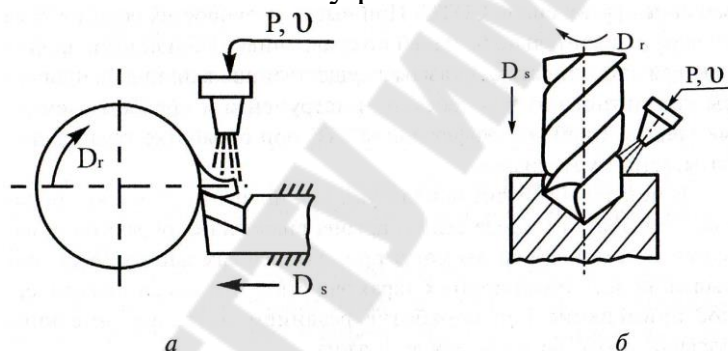


Рис. 6.2.1. Подача СОЖ свободно падающей струей (а) и через сопловые насадки (б)

Широко практикуется подача СОЖ напорной струей под давлением 0,1-2,5 МПа (рис. 6.2.2). На операциях глубокого сверления давление струи СОЖ достигает 10 МПа. Напорную струю можно подавать как в зону обработки (со стороны задней грани инструмента), так и по каналам в теле инструмента. При подаче СОЖ в зону обработки скорость напорной струи достигает 40-60 м/с.

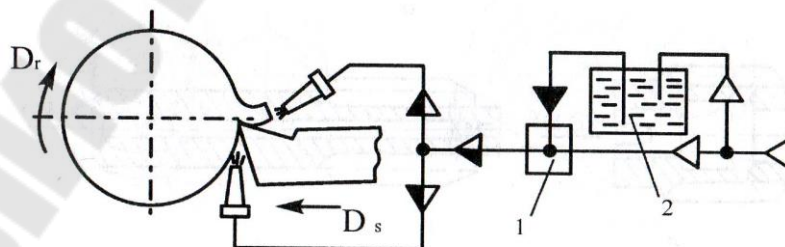


Рис. 6.2.2. Установка для получения и подачи распыленной СОЖ в зону резания: **1** - смесительная камера; **2** - емкость

Недостатки подачи СОЖ высоконапорной струей следующие:

1. трудность обеспечения в производственных условиях нужного направления струи СОЖ на режущую кромку инструмента;
2. необходимость тщательной очистки СОЖ, чтобы исключить засорение сопла;
3. необходимость оснащения станка специальной насосной станцией;
4. сильное разбрызгивание жидкости.

Подача СОЖ в распыленном состоянии осуществляется путем смешивания СОЖ и воздуха и в виде аэрозоли направляют в зону резания (рис. 6.2.3). Эффективность действия СОЖ при такой подаче можно объяснить повышением физической и химической активности СОЖ, по сравнению с охлаждением нераспыленной струей. К преимуществам этой подачи СОЖ следует отнести чрезвычайно малые расходы жидкости 400-500 г/ч водной СОЖ и 0,5-3 г/ч распыленные СОЖ. Применяют распыленные СОЖ в следующих случаях: на операциях, где применение СОЖ поливом невозможно; при обработке некоторых труднообрабатываемых материалов, когда полив не эффективен; при необходимости оздоровления условий труда; для уменьшения температурных деформации деталей в процессе обработки. Аэрозоли с успехом применяют на агрегатных станках, автоматических линиях и станках с ЧПУ, в том числе многооперационных.

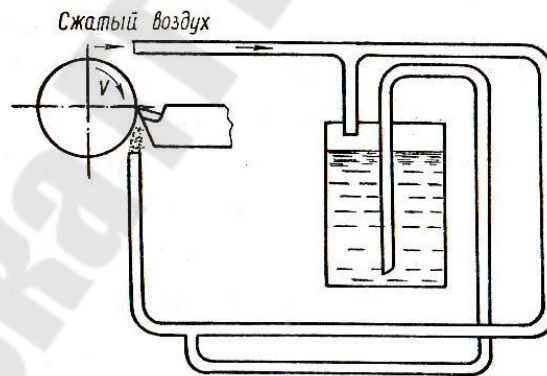


Рис. 6.2.3. Подача СОЖ в распыленном состоянии

Подача СОЖ по каналам в теле инструмента весьма эффективна, но осуществима для ограниченной номенклатуры инструментов. Такая технология подачи СОЖ получила распространение при обработке глубоких отверстий спиральными сверлами (рис. 6.2.4, а), твердосплавными сверлами одностороннего резания (рис. 6.2.4, б), ружейными и кольцевыми сверлами, метчиками, протяжками. Для подвода СОЖ к вращающимся инструментам с внутренними каналами применяют специальные патроны и маслоприемники.



Рис. 6.2.4. Подача СОЖ через каналы в теле инструмента с выходом в зону резания: *а* — спиральное сверло; *б* — эжекторное сверло

Глубокие отверстия сверлят с принудительным наружным или внутренним отводом стружки и подводом СОЖ, применяя при этом специальные режущие инструменты

Наибольшие трудности возникают при выборе технологии подачи СОЖ на операциях обработки глубоких отверстий мелкогабаритным инструментом, не содержащим внутренних каналов. В этих случаях целесообразно подавать в зону резания несколько струй жидкости равномерно по конусу, ось которого совпадает с осью режущего инструмента, а вершина располагается в зазоре между кондукторной втулкой и обрабатываемой деталью. При обработке глубоких отверстий перспективна также подача СОЖ импульсным (ударным) методом, так при ее подаче с частотой 10-13 Гц по сравнению с подачей непрерывной напорной струи, возможно, повышение в 2-2,5 раза производительности обработки и улучшение дробления и отвода стружки.

Тема 6.3. Резание инструментами с повышенными эксплуатационными свойствами

Способы улучшения режущих свойств инструментов. Особенности физических процессов резания инструментами с покрытиями. Вибрационное резание.

В современном инструментальном производстве широко используются различные способы улучшения режущих свойств инструментальных материалов, которые условно можно разделить на четыре большие группы:

- *механические* — алмазная заточка, дробеструйная обработка поверхности, обкатка и тренировка инструмента;
- *термические и металлургические* — высокотемпературная закалка твердых сплавов, обработка холодом, введение в материал специальных присадок, улучшающих режущие свойства инструмента;
- *физико-химические* — азотирование и плакирование рабочих поверхностей инструмента, плазменное азотирование и борирование,

электроискровое легирование концентрированными пучками высоких энергий (электронные пучки и лазерное излучение), ионная имплантация;
- нанесение износостойких покрытий.

Механические методы. Алмазная обработка обеспечивает высокую производительность заточки, хорошее качество поверхности и существенное повышение стойкости твердосплавного инструмента. Повышение стойкости обусловлено изменениями в тонкой структуре и созданием в поверхностном слое инструмента остаточных напряжений сжатия.

Дробеструйная обработка и другие способы ударного воздействия на поверхность инструмента применяются наряду с алмазной заточкой. В результате происходит округление режущей кромки, исключаяющее ее микровыкрашивание при резании. Создающиеся в поверхности инструмента напряжения сжатия залегают на глубину, большую, чем при алмазной заточке

Суть процесса *тренировки* инструмента заключается в том, что перед эксплуатацией инструмента на нормативных режимах резания ему дают поработать на «щадающих» режимах. В результате этого инструментальный материал как бы вскрывает свои резервы. Происходит упорядочение структуры, примеси, сегрегированные по границам зерен, диффундируют вместе со связкой в зерна карбидов. В результате прочностные характеристики инструмента возрастают. Процесс обкатки можно стимулировать введением в зону резания дополнительного контролируемого тепла (путем электроконтактного нагрева), что само по себе приводит к повышению стойкости твердосплавного и быстрорежущего инструмента.

Термические и металлургические методы. К металлургическим методам можно отнести введение в небольших количествах присадок, улучшающих свойства инструментального материала. Так, добавление азота и алюминия в быстрорежущую сталь повышает ее твердость и красностойкость. Одним из вариантов улучшения качества быстрорежущих сталей является изменение содержания в них углерода против традиционного. Так, увеличение в стали Р6М5 содержания углерода с $C = [(0,82—0,9)\%]$ до $(1,0—1,1)\%$ обеспечивает повышение твердости и стойкости инструмента.

К группе термических методов относится обработка инструмента при температурах ниже нуля (криогенная обработка), когда стальной инструмент после закалки охлаждается в среде жидкого азота и выдерживается при такой температуре в течение одного часа. Благодаря более полному переводу остаточного аустенита в мартенсит и исправлению возможных отклонений режима термообработки быстрорежущих сталей (перегрев при закалке, недостаточный отпуск и т.д.), обработка холодом позволяет довести количество остаточного аустенита до 1,35—0,5% и

увеличить твердость быстрорежущего инструмента до 66—67 **HRC**₉. По исследуемым данным, стойкость стального инструмента после обработки холодом повышается в 1,5—3,8 раза, при этом снижаются усилия резания и шероховатость обработанной поверхности. Так же установлено положительное влияние криогенной обработки и на стойкость твердосплавных резцов.

Физико-химические методы. К физико-химическим (химико-термическим) методам относятся методы, основанные на твердофазовом, жидкостном и газофазовом насыщении поверхностей инструмента. Наиболее распространенными из них являются:

1) *Цианирование* — насыщение поверхностного слоя готовых инструментов углеродом и азотом одновременно, обеспечивающее повышение твердости поверхностного слоя до 70—73 **HRC**₉ и теплостойкости примерно на 50°C, в результате чего период стойкости инструментов возрастает в 1,5—3 раза.

2) *Сульфидирование* — образование в поверхностном слое сернистых соединений железа (**FeS**), уменьшающих силы трения при обработке и повышающих в 1,5—2 раза износостойкость инструмента.

3) *Диффузионное хромирование* — нанесение на поверхность слоя хрома толщиной 3—5 мкм с твердостью около 70 **HRC**₉. При этом увеличивается износостойкость инструмента, уменьшается схватывание особенно при обработке легких сплавов на основе алюминия, мягких вязких сталей и пластмасс.

4) *Азотирование* (в плазме тлеющего разряда), обеспечивающее в зависимости от скорости насыщения азотом, регулирование структуры и свойств нитридных слоев, что увеличивает их твердость в поверхностном слое глубиной до 20 мкм и повышает износостойкость инструмента в 2—3 раза.

5) *Обработка перегретым паром* — благодаря образованию пленки **Fe₃O₄** толщиной 2—5 мкм уменьшает адгезию между обрабатываемым и инструментальными материалами; последующий дополнительный отпуск снимает остаточные напряжения от шлифования и заточки.

При электроискровом легировании обеспечивается высокая прочность сцепления нанесенного материала с основой и повышение стойкости инструмента и деталей машин до 2—8 раз. К недостаткам метода следует отнести высокую трудоемкость легирования и нестабильность качества наносимого слоя покрытия.

Физические методы улучшения режущих свойств. К физическим методам улучшения режущих свойств инструментальных материалов относятся «внешние» энергетическое воздействие на материал: облучение

электронами высоких энергий и γ -квантами, ионная имплантация, лазерное облучение и др.

При облучении металлов изменяются их физико-механические свойства, возрастают прочность и твердость, снижается пластичность за счет формирования в поверхностных слоях дислокационной структуры (взаимодействия исходных вакансий с радиационными). В результате улучшаются антифрикционные свойства.

Сущность процесса ионной имплантации состоит в том, что атомы (молекулы) вещества ионизируются на заряженные ионы, затем напряженностью электрического поля им сообщается энергия, необходимая для внедрения (имплантации) в поверхность твердого тела. В результате имплантации происходит изменение механических, физических и химических свойств облученного материала.

Особенности физических процессов резания инструментами с покрытиями заключается в том, что при резании инструментами с различными покрытиями возникает ряд особенностей, которые заключаются в следующем: сильное изменение условий внешнего трения приводит к значительному уменьшению длины полного и пластического контакта стружки с передней поверхностью, уменьшению размеров переходной пластически деформированной области. Наличие покрытия препятствует диффузионному взаимодействию инструментального и обрабатываемого материалов. Это увеличивает угол сдвига, уменьшает деформацию стружки и затрачиваемую на нее работу, а в итоге снижает энергозатраты на процесс формирования стружки.

Покрытие на 20...40 % снижает касательные напряжения на передней поверхности, тогда как нормальные напряжения изменяются в зависимости от соотношения нормальной силы и площади контакта. При значительном уменьшении длины контакта стружки с передней поверхностью максимальные контактные напряжения для инструмента с покрытием могут оказаться больше, чем без покрытия.

Увеличение радиуса округления режущей кромки при нанесении покрытия увеличивает упругое последствие, а, значит, и длину контакта по задней поверхности.

С нанесением покрытия уменьшаются высота и длина подошвы нароста, значительно сужается диапазон скоростей устойчивого наростообразования. Скорость резания, при которой образуется нарост максимальной высоты, смещается в область более высоких значений.

Тепловое состояние режущего инструмента является своеобразным индикатором, отражающим характер процесса резания. При наличии на контактных площадках инструмента сплошного покрытия снижается работа деформации и трения на передней и задней поверхностях, а, следовательно, понижается интенсивность трех основных источников теплоты. Кроме того,

покрытие, значительно отличаясь по своим теплофизическим характеристикам от инструментального материала, может изменять и регулировать направление и интенсивность тепловых потоков в инструмент, деталь, стружку и окружающую среду. В частности, увеличивается количество теплоты, отводимой со стружкой, и уменьшаются тепловые потоки в деталь и инструмент. Значительный разогрев стружки, несомненно, свидетельствует о температурном разупрочнении срезаемого слоя и снижении сопротивления сдвигу.

При нанесении покрытий на режущую часть твердосплавной пластины ее тепловое состояние существенно изменяется. Температура инструмента снижается, а изотерма с максимальной температурой смещается в сторону режущей кромки и к задней поверхности (рис. 6.3.1). Последнее обстоятельство вызвано рассмотренными выше изменениями условий стружкообразования.

Такой характер расположения изотерм в режущей части инструмента позволяет объяснить факт снижения склонности твердосплавного инструмента к лункообразованию и тенденцию к преобладающему изнашиванию задней поверхности резца.

С помощью покрытия замедляется развитие очагов активного изнашивания передней и задней поверхностей инструмента. Отсутствуют проточкины и «усы» у краев контактных площадок инструмента. Вследствие этого устраняются источники интенсивного трения и тепловыделения.

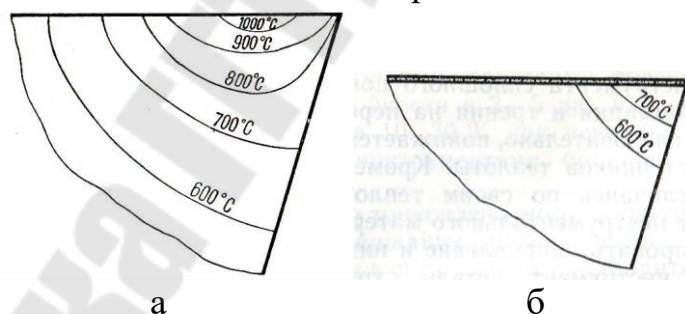


Рис. 6.3.1. Температурное поле резца из твердого сплава ВК6 (а) и ВК6+TiN (б) на передней поверхности при точении стали 35ХГСА (НВ 200) при $S = 0,45$ мм/об, $t = 2$ мм, $v = 70$ м/мин

Процесс изнашивания быстрорежущих инструментов с покрытиями протекает в три стадии (рис. 6.3.2).

В период приработки инструмента (стадия I) покрытие полностью сохраняет свою сплошность на передней и задней поверхностях инструмента и эффективно снижает интенсивность тепловыделения. Однако в результате действия адгезионно-усталостных процессов и срывов нароста происходит разрушение покрытия с образованием сетки хрупких трещин (стадия II). Но даже частично разрушенное покрытие продолжает сдерживать развитие очагов изнашивания по контактным площадкам. В

дальнейшем разница между инструментами с покрытием и без него исчезает (стадия III) и наступает катастрофическое изнашивание.

Покрyтия на твердых сплавах не изменяют характер изнашивания, но распространяют его на область более высоких скоростей за счет снижения уровня термомеханической напряженности в зоне резания. При скоростях резания 20... 100 м/мин наблюдается адгезионное изнашивание, а при 150 м/мин и выше — диффузионное, причем покрытие значительно повышает сопротивление твердосплавной матрицы диффузионному растворению в обрабатываемом материале.

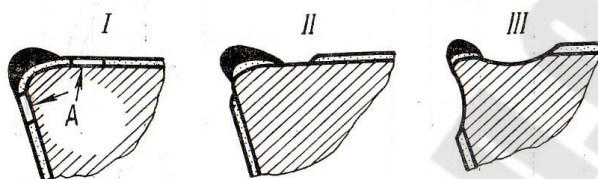


Рис. 6.3.2. Схема разрушения покрытия TiN на инструментах из быстрорежущей стали в условиях активного наростообразования (А — зоны активных адгезионно-усталостных процессов)

За счет изменений интенсивности изнашивания инструменты с покрытием имеют в 2,5-5 раз более высокие периоды стойкости, чем инструменты без покрытий.

Использование покрытий снижает уровень остаточных напряжений, степень наклепа, уменьшает вероятность структурно-фазовых превращений в поверхностном слое детали, несколько снижает шероховатость обработанной поверхности.

Одним из методов интенсификации процесс резания является использование вибраций. Вибрационное резания заключается в том, что на движение, обеспечиваемое кинематической схемой обработки, накладывается дополнительное движение инструмента или заготовки с определенной частотой и амплитудой. Влияние вибраций на процесс резания рассматривается в двух аспектах: как метод стабильного дробления стружки на токарных и сверлильных операциях при обработке вязких материалов, в особенности на автоматических линиях, станках с ЧПУ, и как средство воздействия на контактные процессы в зоне резания.

Для реализации первого направления используются низкочастотные механические, пневматические и гидравлические вибраторы с частотой вынужденных колебаний $f = 30—150$ Гц и амплитудой $A = 0,1—1,2$ мм. Несмотря на периодичность нагрузки на лезвие, ухудшение шероховатости и снижение долговечности некоторых узлов станка, низкочастотные вибрации обеспечивают устойчивое стружкодробление, из-за чего отпадает необходимость в стружколомающих уступах, лунках на передней поверхности инструмента.

Для улучшения обрабатываемости труднообрабатываемых сталей и сплавов, различного сорта керамики применяют высокочастотные (ультразвуковые) колебания с частотой более 20кГц и амплитудой 10—15 мкм, для чего используют магнитострикционные и другие типы вибраторов.

Исследованиями вибрационного резания занимались ученые В.Н. Подураев, Я.И. Марков.

В результате установлены общие физико-механические особенности вибрационного резания:

- периодические изменения мгновенных скоростей главного и (или) вспомогательного движений резания, а также углов инструмента;
- циклические силовые и тепловые нагрузки на инструмент и обрабатываемую деталь;
- снижение коэффициентов и сил трения по передней и задней поверхностям инструмента;
- повышение эффективности применения СОТС из-за их лучшего проникновения в зону резания.

В практике резания приняты следующие виды колебаний (направления наложения вибраций): осевые, тангенциальные, радиальные, крутильные (для осевого инструмента) и комбинированные.

Вибрационное резание с осевыми колебаниями в направлении продольной подачи при точении обеспечивает эффективное дробление стружки, получение шероховатости $Ra = 2,5—5$ мкм, сохранение точности обработки, периода стойкости инструмента как при обычном резании.

При наложении осевых колебаний (рис. 6.3.3) изменяется скорость вспомогательного движения резания (подачи) за один цикл колебания инструмента и углы резания при сравнительно малом изменении значений результирующей скорости резания.

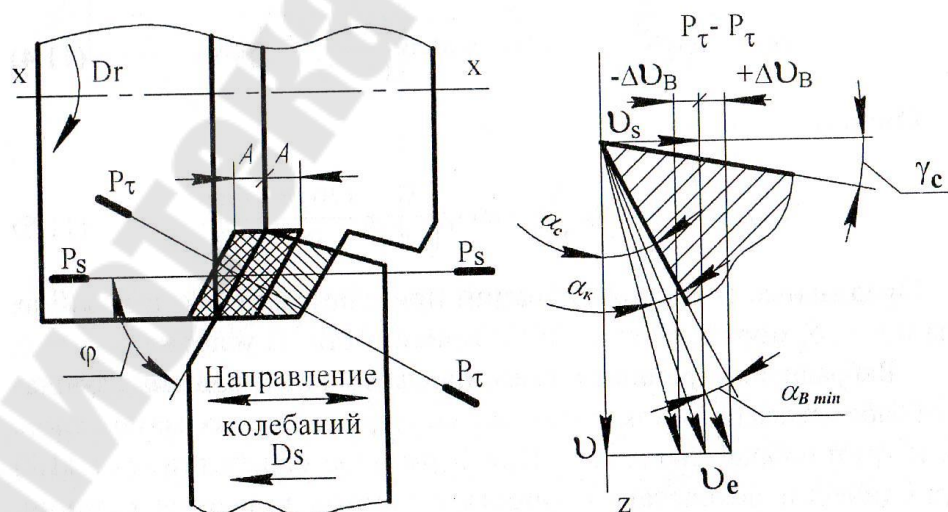


Рис. 6.3.3. Кинематическая схема вибрационного резания

Мгновенное значение скорости при резании с вибрациями

$$v_e = v_e \pm \Delta v_e = v_e \pm 0,12\pi f A,$$

где Δv_e — прирост скорости движения режущей кромки в направлении вибраций, м/мин; f — частота вибраций, Гц; A — амплитуда вибраций, мм. Отсюда

$$v_e = \sqrt{v^2 + (\Delta v_B + v_s)^2} = \sqrt{\left(\frac{\pi D n}{1000}\right)^2 + \left(\frac{S_0 n}{1000} \pm 0,12\pi f A\right)^2},$$

где n — частота вращения обрабатываемой детали, об/мин; D — диаметр детали, мм; S_0 — подача на оборот, мм/об.

Изменение скорости резания существенно влияет на величины углов резания. Минимальный задний угол при вибрационном резании с осевыми колебаниями равен (рис. 6.3.3):

$$\alpha_{a\min} = \alpha_c - \alpha_k - \Delta\alpha_a,$$

где α_c , α_k и $\Delta\alpha_a$ — задний угол в статике (угол заточки), кинематический задний угол и его изменение при наложении вибраций соответственно.

$$\alpha_c = \arctg \frac{S_0}{\pi D}; \Delta\alpha_a = \arctg \left(\frac{v_a + v_a}{v} \right) \sin \varphi.$$

Предельные значения вибраций при данном угле φ и режимах резания v, S_0 определяют по этой зависимости из условия $\alpha_{a\min} = 0$.

Вибрационное резание с тангенциальными колебаниями улучшает обрабатываемость, как обычных конструкционных материалов, так и труднообрабатываемых. При этом виде обработки (рис. 6.3.4) периодически возрастает скорость главного движения резания. Мгновенная скорость резания при наложении вибраций:

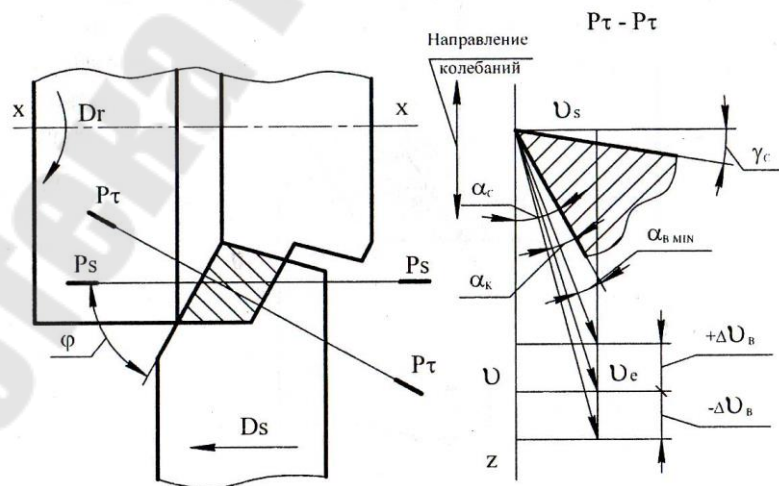


Рис. 6.3.4. Кинематическая схема вибрационного резания наложением тангенциальных колебаний

$$v_e = \sqrt{(v \pm \Delta v_d)^2 + v_s^2} = \sqrt{\left(\frac{\pi D n}{1000} \pm 0,12\pi f A\right)^2 + \left(\frac{S_0 n}{1000}\right)^2}. \quad (6.3)$$

Минимальный задний угол при вибрационном резании с тангенциальными колебаниями:

$$\alpha_{a\min} = \alpha_c - \alpha_k - \Delta\alpha_a$$

$$\alpha_c = \arctg \frac{S_0}{\pi D}; \Delta\alpha_a = \arctg \left(\frac{v_a}{v \pm \Delta v_a} \right) \sin \varphi \quad (6.4)$$

Снимаемое сечение среза, подача и глубина резания при этом методе обработки с вибрациями практически остаются неизменными.

Установлено, что радиальные вибрации в радиальном направлении (в направлении глубины резания) отрицательно влияют на процесс резания, так как ухудшается шероховатость обработанной поверхности (рис. 6.3.5). Условия работы режущей кромки затрудняются из-за того, что нагрузка при дополнительном колебательном движении воспринимается вершиной резца и вспомогательной режущей кромкой. В результате повышается износ и вероятность выкрашивания режущих кромок твердосплавного инструмента. Поэтому такая кинематическая схема вибрационного резания находит практическое применение только при ультразвуковых частотах колебаний с минимальной амплитудой.

Эффективность действия ультразвука на процесс резания зависит от многих факторов: величины амплитуды и частоты колебаний и их направления, физико-механических и теплофизических свойств обрабатываемого и инструментального материалов, скорости резания, значений подачи и глубины резания. Наибольший эффект улучшения качества поверхности, уменьшения сил резания и повышения точности обработки наблюдается при возбуждении ультразвуковых тангенциальных колебаний при резании вязких материалов с небольшими окружными скоростями ($v < 20$ м/мин), небольшими подачами $S_0 < 0,4$ мм/об) и малыми глубинами резания ($t < 2$ мм).

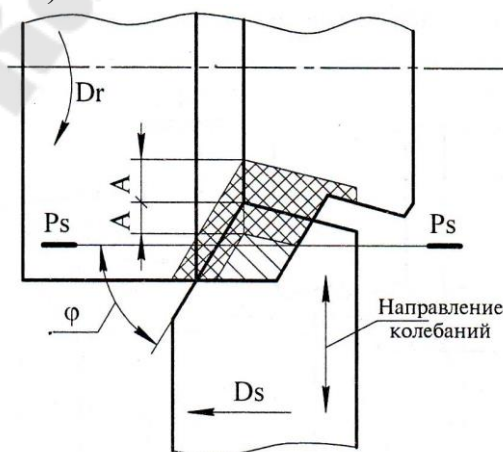


Рис. 6.3.5. Кинематическая схема вибрационного резания с наложением радиальных колебаний

Резание с ультразвуковыми колебаниями наиболее эффективно при работе с невысокими скоростями резания и малыми сечениями срезаемого слоя не только для жаропрочных материалов, но и для точения вязких материалов, сверления, развертывания и зенкерования отверстий, обработки внутренних резьб метчиками, стальных и чугунных деталей.

Причины повышения стойкости инструмента при резании с ультразвуковыми колебаниями:

- ультразвуковые колебания создают циклические динамические нагрузки и обусловленные ими силы знакопеременные напряжения в материале обрабатываемой детали, приводят к локализации пластической деформации и к образованию стружки на более ранней стадии деформации;
- ультразвук способствует периодическому изменению направлений сил трения на контактных поверхностях инструмента,
- уменьшает сопротивление схода стружки, препятствует образованию застойной зоны и нароста;
- ультразвуковые тангенциальные колебания с амплитудой 0,5— 3,0 мкм демпфируют автоколебания на операциях точения жаропрочных сталей и сплавов и при сверлении нержавеющей стали;
- ультразвук дополнительно формирует в зоне резания импульсный тепловой источник, мощность которого пропорциональна амплитуде колебательной скорости;
- ультразвук обеспечивает кинематическое заострение режущего клина, повышает фактический передний угол инструмента, снижая силы трения и резания;
- ультразвуковые колебания способствуют диспергированию СОЖ и увеличивают ее охлаждающий эффект при одновременном улучшении условий ее проникновения к задней поверхности инструмента.

РАЗДЕЛ VII

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

Тема 7.1. Методы, технология и оборудование физико-химической обработки материалов.

Электроэрозионные технологии получили широкое распространение. В первую очередь это связано с новыми конструкторскими решениями ряда изделий сложнейшей формы, малых и больших размеров, деталей из сверхпрочных материалов, обладающих высокой твердостью, большой вязкостью, плохой обрабатываемостью резанием.

В настоящее время процессы механической обработки не дает возможности повышению производительности при получении требуемых качественных характеристик у обработанных деталей. Альтернативой механической обработке является электроэрозионная обработка.

Электроэрозионные технологии применимы во всех отраслях промышленности. При этом прогресс некоторых отраслей напрямую связан с активным применением электроэрозионных процессов на этапах не только технологической подготовки производства, но и при серийном производстве различных деталей. Но особенно эффективны технологии электроэрозионной обработки в инструментальном производстве, поскольку для производства любого изделия необходима технологическая оснастка: штампы, пресс-формы, формы для литья, специальный инструмент. Изготовление такой оснастки на обычном металлорежущем оборудовании чрезвычайно трудоемко и сопряжено с использованием дополнительно дорогих ручных слесарно-доводочных работ.

Физическая основа электроэрозионной обработки заключается в изменении формы, размеров, шероховатости и свойств поверхности заготовки под воздействием электрических разрядов в результате электрической эрозии (ГОСТ 25331-82). Под электрической эрозией понимают разрушение поверхности электродов, сопровождающееся съемом металла при прохождении между электродами электрических разрядов. При этом различают электрод-инструмент и электрод-заготовку. Для осуществления процесса между электродами всегда должен быть зазор, который определяется как межэлектродный промежуток.

Съем металла при электроэрозионной обработке осуществляется рабочими импульсами тока. Рабочий импульс – импульсный разряд, производящий съем металла вследствие электрической эрозии и характеризующийся прохождением через межэлектродный зазор импульса электрического тока под напряжением, изменяющимся во время импульса.

Обработка материала может осуществляться в газовой среде или жидкости. Выделяют следующие основные процессы, протекающие при электроэрозионной обработке: электрические, тепловые, газодинамические, термомеханические.

Обработка материала в газовой среде происходит под действием микроразрядов возникающих при сближении электрода-инструмента с заготовкой.

Первой стадией электрического процесса является проба газовой среды в результате образования зоны с высокой напряженностью электрического поля. Наибольшая напряженность поля имеет место на участках поверхностей, характеризующихся наличием выступов, шероховатостей на инструменте и заготовке.

Вторая стадия процесса характеризуется образованием канала проводимости. Вырывающиеся электроны из наиболее выступающих участков поверхности катода устремляются к аноду, т. е. образуется электрический ток. При столкновении электронов с молекулами газа происходит ионизация газовой среды в узкой цилиндрической области (канал проводимости), содержащей ионы и электроны. Лавина электронов несёт значительное количество энергии, которая высвобождается на материал анода (заготовки) в виде тепловой энергии на поверхности заготовки, в результате чего образуется лунка.

Третьей стадией процесса электрической эрозии будет прекращение электрического тока. Межэлектродное пространство наэлектризовывается для очередного разряда.

Процесс электроэрозии в жидкой среде имеет свои особенности. Около канала проводимости образуется газовый пузырь из паров жидкости и металла. Вследствие высокого давления ($2 \cdot 10^7$ Па) канал проводимости стремится расшириться, сжимая окружающую жидкую фазу. Вследствие возникающей инерции, газовый пузырь и окружающая жидкость неподвижны. Затем начинается их расширение. Граница поверхности канала проводимости движется с высокой скоростью, которая может достигать 150...200 м/с. На наружной границе канала образуется фронт уплотнения, в котором давление скачкообразно меняется от исходного в жидкости до высокого на границе. Температура в канале проводимости может достигать 40000°C.

Заключительной стадией является прекращение электрического тока, отрыв ударной волны от газового пузыря и продолжение его расширения по инерции. Ударная волна гасится окружающей жидкостью. В углублениях (лунках) электродов остаётся жидкий металл, который вытекает и выбрасывается.

Весь процесс электроэрозионной обработки характеризуется сложными явлениями различного характера: процессами в канале разряда и

на электродах; тепловыми процессами; газо- и гидродинамическими явлениями; термомеханическими процессами и др. И все это обеспечивает получение за каждый разряд единичного следа на обрабатываемой поверхности – единичной лунки (рис.7.1.1.).

Единичные лунки характеризуются радиусом R_0 , глубиной h_l и их соотношением $K = R_0 / h_l$.

Условно можно допустить, что после первого прохода на поверхности Д (рис. 7.1.1, а) появляется волна углублений (лунок) с радиусом R_0 . При этом удаляется материал заготовки в объеме каждой лунки, определенной глубиной h_l .

При втором проходе (рис. 7.1.1, б), если разряды приходятся на вершины первоначальной волны, происходит уже сьем слоя металла величиной Z с образованием поверхности с шероховатостью

$$R_{max} = R_0 - Z_{\text{в}}.$$

Размер образуемой лунки во многом зависит от энергии воздействующего импульса. Для определения параметров шероховатости R_z при массированном воздействии разрядов можно использовать эмпирическую формулу

$$R_z = \frac{\beta^2}{3k^3 \sqrt{W_u}}, \text{ мкН},$$

где β – коэффициент перекрытия лунок; k – коэффициент, зависящий от материала электрода и длительности импульса; W_u – энергия импульса, Дж.

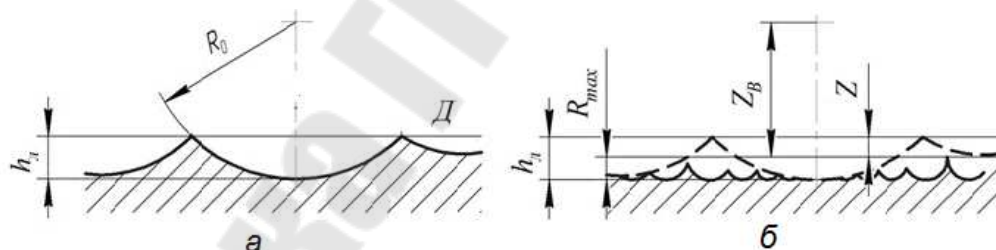


Рис. 7.1.1. Параметры лунки, полученной при единичном разряде в процессе первого (а) и второго (б) проходов

Обработку поверхности материала при электроэрозии можно представлять как последовательное воздействие на эту поверхность электрических импульсов различной мощности, в результате, которого удаляются последовательно слои материала (рис. 7.1.2, а, в, г).

При электроэрозионной обработке используются два вида разряда: *искровой* и *дуговой*. При искровой обработке удаление материала происходит за счет серии импульсов, действующих на смежные участки. Поэтому форма и размеры лунки будут отличаться от углубления после единичного разряда. Диаметр канала проводимости при искровом разряде меньше, чем при дуговом. Поэтому при искровом разряде концентрация

энергии выше и металл с поверхности удаляется в результате плавления и испарения. Искровой разряд используется чаще всего при чистовой обработке.

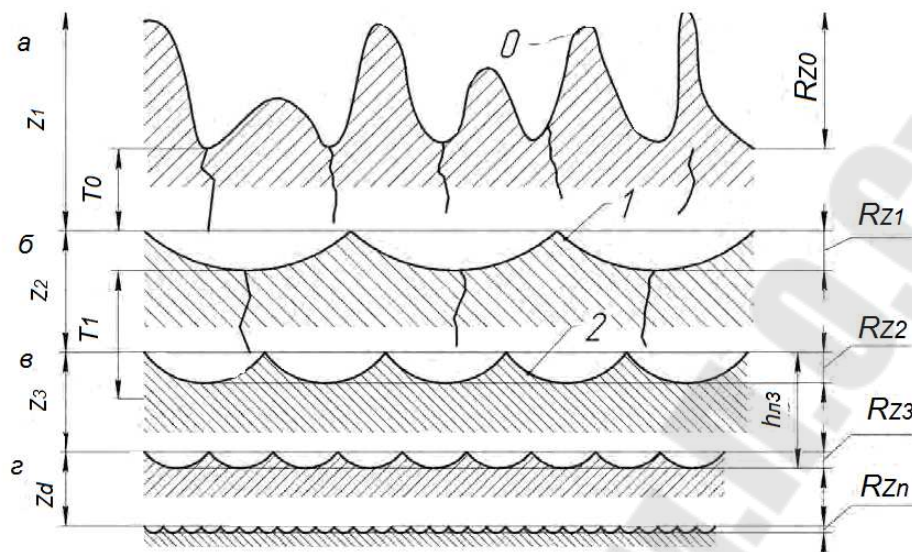


Рис. 7.1.2. Схема удаления материала заготовки последовательными проходами

С увеличением частоты электроискровые разряды сливаются, и возникает электрическая дуга. При дуговом разряде температура в канале проводимости ниже на $5 \cdot 10^3 - 6 \cdot 10^3$ °С по сравнению с искровым зарядом. В результате резко снижается перегрев материала и переход его в парообразное состояние. Удаление материала при дуговом разряде происходит в капельножидком состоянии. Дуговой разряд применяется при черновой обработке.

Качество поверхности деталей, подвергнутых электроэрозионной обработке, характеризуется шероховатостью, физико-химическими и физико-механическими свойствами поверхностного слоя.

В общем случае поверхностный слой после электроэрозионной обработки условно можно разделить на следующие зоны (рис. 7.1.3): **1** – зону насыщения элементами рабочей жидкости; **2** – зону отложения материала электрода-инструмента; **3** – белый слой, образованный из расплавленного материала-заготовки; **4** – зону термического влияния; **5** – зону пластической деформации.

Между зонами нет четкой границы. В большинстве случаев зоны перекрывают друг друга. Каждая зона имеет свои особенности. При этом каждая зона, даже незначительной толщины, играет весьма важную роль.

Зона 1 – зона насыщения элементами рабочей жидкости.

Вследствие мощного теплового воздействия при выделении электрической энергии рабочая жидкость разлагается.

Отдельные её элементы проникают в поверхностный слой, диффундируют в него и образуют химические соединения.

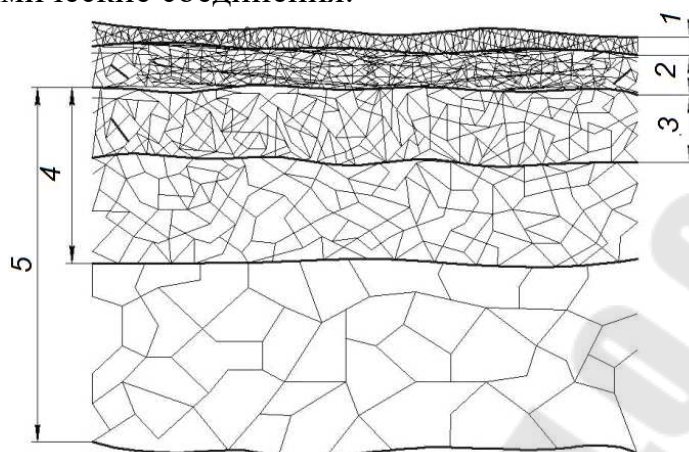


Рис. 7.1.3. Схематичное расположение зон поверхностного слоя, подвергнувшегося электроэрозионной обработке

Вследствие хрупкости и неравномерной плотности поверхностный слой может быть дефектным. Он является причиной снижения прочностных свойств основного металла. При механических знакопеременных нагрузках именно в поверхностном слое возникают трещины, которые могут распространяться в глубь детали.

При изготовлении деталей, работающих с большими нагрузками, этот слой необходимо удалять одним из способов отделочной обработки.

Зона 2 – зона отложения материала электрода-инструмента. Образование этой зоны вызвано переносом частиц материала электрода-заготовки парами на поверхность обрабатываемого изделия. Материал электрода-инструмента может не только концентрироваться на поверхности изделия, но и диффундировать в более глубокие слои и образовывать там различные фазы – твердые растворы, соединения и т. д.

При использовании электрода-инструмента из графитизированного материала углерод диффундирует внутрь обрабатываемой детали и образует там карбидные соединения. При использовании медных электрод-инструментов поверхность может быть покрыта тонким слоем меди. Кроме того, медь может проникать в зону расплавленного материала, образуя отдельные включения.

Зона 3 – белый слой. После удаления микропорций металла на поверхности заготовки остается зона со структурой, резко отличающейся от исходной. Белый слой имеет мелкозернистую структуру, обладающую высокой химической стойкостью. На микрошлифах этот слой имеет вид белых полос, откуда он и получил свое название. Толщина слоя колеблется от десятых долей до 1,5 мм.

Зона 4 – зона термического влияния значительно по размерам превышает белый слой. На её структуру значительное влияние оказывает

материал обрабатываемой заготовки, его исходное состояние, свойства рабочей среды, а так же режим обработки. Глубина структурных изменений определяется толщиной слоя металла заготовки, температура в которой превышает температуру структурных изменений. Зона термического влияния имеет закаленные участки с мелкозернистой структурой, участки вторичной закалки, которые зачастую чередуются с участками отпуска.

Зона 5 – зона пластической деформации. В процессе электроэрозионной обработки поверхность металла испытывает значительные ударные воздействия, связанные с перемещением волны напряжений:

- от расширения и сжатия металла при нагреве и охлаждении заготовки под воздействием электрического разряда;
- от давления газа, образовавшегося в результате испарения рабочей жидкости;
- от возникающих электростатических и электромагнитных сил, а так же от протекающих структурных изменений и других факторов.

Зона пластической деформации проявляется в виде измельчения зерен, образования больших дислокаций, а так же изменения параметров кристаллической решетки.

Глубина зоны пластической деформации зависит так же от химического состава.

Рассмотренные изменения структуры поверхностного слоя и связанные с ним пластические деформации оказывают существенное влияние на степень *наклёпа и микротвердости*.

На изменение *микротвердости* поверхностного слоя, а так же толщины наклепа значительное влияние оказывают свойства рабочей жидкости, охлаждающей поверхность лунки после прохождения импульса тока.

Установлено, что с ростом вязкости рабочей жидкости уменьшается скорость отвода тепла от охлаждающей поверхности. Кроме того, при использовании различных масел на охлаждаемой поверхности единичных лунок образуется газопаровая пленка, обуславливающая пленочное кипение. При последующем понижении температуры до комнатной наступает теплообмен с умеренной скоростью охлаждения (75-10 °C/c).

Для получения высокой однородной твердости необходимо быстрое охлаждение поверхности единичной лунки при её высоких температурах. Этим требованиям может удовлетворять смесь масла с водой.

При температуре поверхности единичной лунки ниже температуры кипения масла, но выше температуры кипения воды, масло конденсируется и покрывает охлаждаемую поверхность. В этот период скорость охлаждения нагретой поверхности будет определяться охлаждающей способностью

масла. В итоге микротвердость поверхностного слоя будет соответствовать микротвердости, полученной после электроэрозионной обработки в воде.

При нагреве в процессе электроэрозионной обработки имеет место интенсивный локальный нагрев поверхностного слоя, качество которого будет определяться величиной внутренних напряжений, возникающих в результате значительного градиента температур, и структурными превращениями. При определённых условиях напряжения могут превышать предел прочности обрабатываемого материала, что приведёт к образованию микротрещин.

При охлаждении поверхностного слоя заготовки существенно меняется структура и свойства. Возможности воздействия на качество поверхности определяются подбором состава рабочей жидкости, а так же условиями осуществления процесса электроэрозии.

Основными параметрами импульса являются: длительность, амплитуда, частота энергии импульсов; мощность обработки, износ электродов.

Длительность импульса τ_u — это время действия импульса электрического тока. При электроэрозионной обработке используются импульсы продолжительностью $10^{-7} - 10^{-1}$ с.

При обработке твёрдых сплавов длительность импульсов сокращается на 2...3 порядка.

Пауза τ_n — промежуток времени между двумя последовательными импульсами.

Период T — промежуток времени, через который наблюдается повторение начала или окончания импульсов

$$T = \tau_u + \tau_n.$$

Концентрация энергии определяется величиной скважности, которая представляет отношение периода повторений импульсов T . к длительности импульсов τ_u :

$$q = \frac{T}{\tau_u}.$$

При $q = 1$ импульсы тока действуют непрерывно, и поэтому тепловая энергия непрерывно подводится к обрабатываемому материалу. Целесообразно, чтобы процесс образования отдельной лунки заканчивался несколько раньше начала воздействия следующего импульса. Поэтому диапазон скважностей обычно находится в пределах 1–30. При $q > 30$ считают, что на обрабатываемую поверхность действуют не периодические, а одиночные импульсы.

Оптимальная длительность импульса равна

$$\tau_u = 1,27 \cdot \frac{\left[\kappa_M \cdot C \cdot \rho \cdot t_{пл} \cdot \left(1 + \frac{q_{пл}}{C \cdot t_{пл}} \right)^2 \right]}{B_0^2} \cdot W_i^{2/3},$$

где K_m – коэффициент, зависящий от свойств материала см/дж; C – теплоёмкость, Дж/К; ρ – плотность, кг/м³; $t_{пл}$ – температура плавления материала, °С; $q_{пл}$ – тепловой поток, Вт; B_0 – коэффициент, зависящий от теплофизических констант; W_i – энергия импульса, Дж.

Амплитуда импульса силы тока колеблется в широком интервале от долей ампера до десятков тысяч ампер. Амплитуда колебаний напряжения импульса изменяется в более узком диапазоне от десятков до нескольких сотен вольт.

Частота f импульсов определяется количеством импульсов в единицу времени

$$f = \frac{1}{T}.$$

При электроэрозионной обработке диапазон частот изменяется в диапазоне $10^2 \dots 2 \cdot 10^6$ Гц.

Для осуществления электроэрозионной обработки импульсные разряды должны соответствовать определённой форме: неполярные, симметричные и несимметричные знакопеременные. В каждой из приведённых групп различают импульсы синусоидальные, трапецеидальные, прямоугольные, треугольные и т. д. (рис. 7.1. 4).

Энергия импульса – это работа A_i , совершаемая единичным импульсом, которая изменяется в пределах от 1,001...50 Дж.

Мощность обработки W численно равна произведению энергии импульса W_i на частоту их следования f , т. е.

$$W = W_i \cdot f.$$

Скорость съёма Q процесса электроэрозионной обработки оценивается объёмом или массой материала, удаляемого в единицу времени. В зависимости от величин, выражающих количество материала (объём или масса) различают объёмную или массовую скорость съёма.

В общем случае скорость съёма можно представить в виде зависимости от энергии импульсов

$$Q = k \cdot f \cdot W_i, \text{ мм}^3/\text{мин},$$

где k – коэффициент, учитывающий теплофизические свойства обрабатываемого материала.

В зависимости от режимов электроэрозионной обработки (отделочной, чистовой, черновой) скорость съёма может изменяться в довольно широких пределах. Так, при малых энергиях и длительности импульсов, высокой частоте, характерных для отделочных и чистовых режимов, скорость съёма составляет 20–800 мм³/мин; при работе на черновых режимах (большие энергии и длительность импульсов, меньшая

их частота следования) скорость съёма значительно возрастает и составляет 12000–25000 мм³/мин.

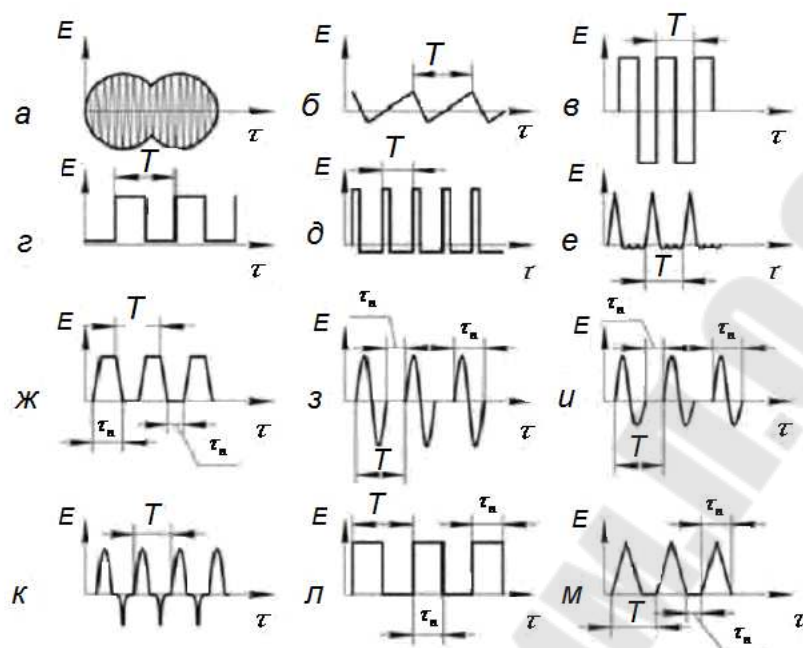


Рис. 7.1.4. Формы электрических импульсов: а – высокочастотные импульсы, модулированные по синусоидальному закону;

б – пилообразные импульсы; в – прямоугольные импульсы;

г – прямоугольные импульсы с постоянной составляющей;

д – несимметричные знакопеременные прямоугольные импульсы;

е – несимметричные знакопеременные импульсы;

ж – синусоидальные трапецидальные униполярные импульсы;

з – симметричные знакопеременные импульсы;

и – несимметричные знакопеременные импульсы;

к – знакопеременные симметричные несинусоидальные импульсы;

л – синусоидальные прямоугольные униполярные импульсы;

м – синусоидальные треугольные униполярные импульсы;

E – напряжённость электрического поля;

τ – время; T – период повторения импульсов;

τ_u – длительность импульса; τ_n – время паузы

Износ электрода – количество материала, отделившееся от электрода-инструмента в процессе электроэрозионной обработки. В зависимости от величин, выражающих количество материала (объём, масса, длина), различают следующие виды износа: объёмный, массовый, линейный.

Энергия импульса – это работа A_i , совершаемая единичным импульсом, которая изменяется в пределах от 1,001...50 Дж.

Мощность обработки W численно равна произведению энергии импульса W_i на частоту их следования f , т. е.

$$W = W_i \cdot f.$$

Скорость съёма Q процесса электроэрозионной обработки оценивается объёмом или массой материала, удаляемого в единицу времени. В зависимости от величин, выражающих количество материала (объём или масса) различают объёмную или массовую скорость съёма.

В общем случае скорость съёма можно представить в виде зависимости от энергии импульсов

$$Q = k \cdot f \cdot W_i, \text{ мм}^3/\text{мин},$$

где k – коэффициент, учитывающий теплофизические свойства обрабатываемого материала.

В зависимости от режимов электроэрозионной обработки (отделочной, чистовой, черновой) скорость съёма может изменяться в довольно широких пределах. Так, при малых энергиях и длительности импульсов, высокой частоте, характерных для отделочных и чистовых режимов, скорость съёма составляет 20–800 мм³/мин; при работе на черновых режимах (большие энергии и длительность импульсов, меньшая их частота следования) скорость съёма значительно возрастает и составляет 12000–25000 мм³/мин.

Износ электрода – количество материала, отделившееся от электрода-инструмента в процессе электроэрозионной обработки. В зависимости от величин, выражающих количество материала (объём, масса, длина), различают следующие виды износа: объёмный, массовый, линейный.

Относительный объёмный износ электрода-инструмента – отношение износа электрода-инструмента, к количеству материала, удаляемого за это же время с электрода-заготовки

$$V_{об} = \frac{V_{эи}}{V_{эз}} \cdot 100 \%,$$

где $V_{эи}$ – объём износа электрода-инструмента; $V_{эз}$ – объём удалённого металла электрода-заготовки.

Относительный линейный износ, %

$$V_{лин} = \frac{\Delta l_{эн}}{l_{отв}} \cdot 100 \%,$$

где $\Delta l_{эн}$ – изменение линейного размера электрода-инструмента; $l_{отв}$ – глубина прошитого отверстия.

Износ электроэрозионных инструментов зависит от материала, из которого он изготовлен, от параметров электрического импульса, площади обрабатываемой поверхности, скорости прокачки жидкости. При обработке медными или латунными электродами относительный износ может

составлять 45...140 %. При обработке меднографитовыми электродами относительный износ составляет 0,1...4 %.

Электроэрозионная обработка разделяется на основные виды обработки: отрезка, вырезание, объёмное копирование, прошивание, шлифование, доводка, маркирование, упрочнение (ГОСТ 25331-82).

Отрезка – электроэрозионная обработка, при которой заготовка разделяется на две части. Отрезка осуществляется плоским электродом, диском, проволокой или лентой. Отрезка плоским электродом производится путём поступательного перемещения электрода-инструмента со скоростью $V_{п.эи}$ в направлении электрода-заготовки, которая остается, неподвижна (рис. 7.1.5, а). Отрезку плоских заготовок целесообразно осуществлять до половины высоты, затем заготовку переворачивают на 180° и дальнейшую обработку выполняют с противоположной стороны.

Отрезка плоским диском (рис. 7.1.5, б) производится в результате поступательного движения электрода-инструмента при его одновременном вращательном движении. Электрод-заготовка неподвижно или закреплена на рабочем столе или совершает вращательное движение.

Отрезку круглых заготовок целесообразно осуществлять при их вращательном движении. Это позволяет существенно повысить производительность. Диски из листовой стали толщиной до 1 мм имеют наружный диаметр до 1000 мм. Для предотвращения коробления дисков в конструкции станков предусматриваются направляющие. Время получения одной заготовки из жаропрочных сплавов снижается по сравнению с механическим резаньем в 8-10 раз.

При отрезании проволокой или лентой (рис. 7.1.5, в) удаётся снизить ширину паза по сравнению с резкой плоским электродом. Для мелких деталей используют латунную ленту толщиной 0,1 мм; для крупных применяют стальную ленту толщиной не более 0,3 мм.

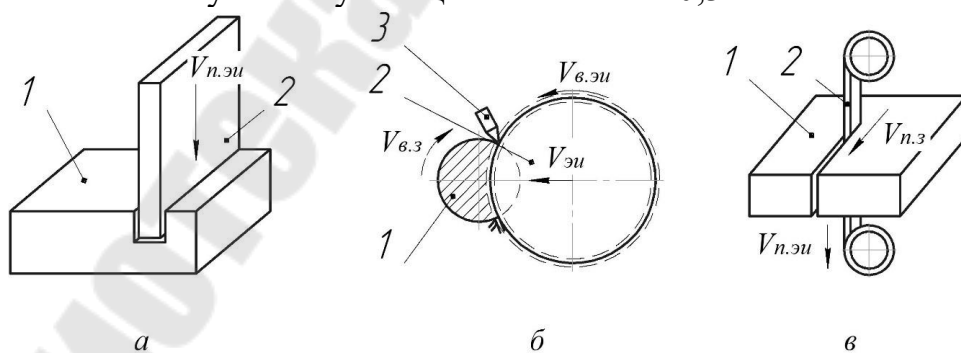


Рис. 7.1.5. Схемы отрезки плоским электродом (а), плоским диском (б), проволокой или лентой (в): 1 – заготовка; 2 – электрод-инструмент; 3 – сопло; $V_{п.эи}$, $V_{п.з}$ – соответственно скорости поступательного движения электрода-инструмента и заготовки; $V_{в.эи}$, $V_{в.з}$ – соответственно скорости вращательного движения электрода-инструмента и заготовки

Процесс отрезки выполняется в ванне, заполненной жидкостью, или жидкость подают в ванну поливом из сопла. Применяется электроэрозионная отрезка для получения заготовок из труднообрабатываемых материалов.

электроэрозионное вырезание – процесс, при котором электрод-инструмент в виде непрерывно перемещающейся проволоки при движении подачи осуществляет обход заготовки по заданной траектории, образуя поверхность заданного контура (рис. 7.1.6).

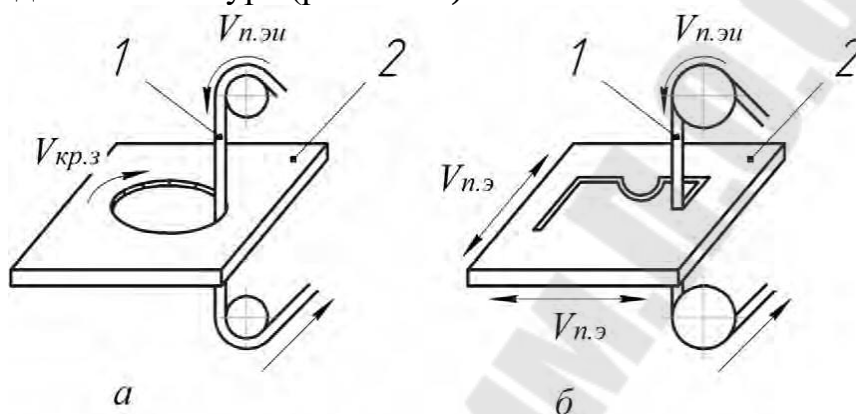


Рис. 7.1.6. Схемы вырезания проволокой круглого (а), профильного отверстия (б): 1 – электрод-инструмент; 2 – заготовка; $V_{н.э}$, $V_{н.з}$ – соответственно скорости поступательного перемещения электрода-инструмента и заготовки; $V_{кр.з}$ – скорость кругового движения заготовки

Применяется вырезание при изготовлении деталей для вакуумной и электронной техники; в инструментальном производстве при изготовлении матриц, пуансонов, копиров, шаблонов, цанг, лекал, фасонных резцов и т. д.

Электроэрозионное прошивание – обработка, при которой электрод-инструмент, углубляется в электрод-заготовку, образует отверстие постоянного сечения. Прошивание круглых прямолинейных отверстий (рис. 7.1.7) осуществляется в процессе поступательного движения электрода-инструмента или электрода-заготовки. Для стабилизации процесса на электрод-инструмент дополнительно может накладываться вибрация.

Прошивание отверстий с криволинейной осью в общем случае обеспечивается поступательной подачей вдоль криволинейной оси электрода-инструмента. На рис. 7.1.7 (б) представлена схема прошивания отверстия с осью, изогнутой по окружности.

При обработке внутреннего контура в заготовке должно быть выполнено технологическое отверстие для ввода проволочного электрода-инструмента.

Применяется прошивание для получения отверстий, щелей, каналов сложного профиля в заготовках из труднообрабатываемых материалов.

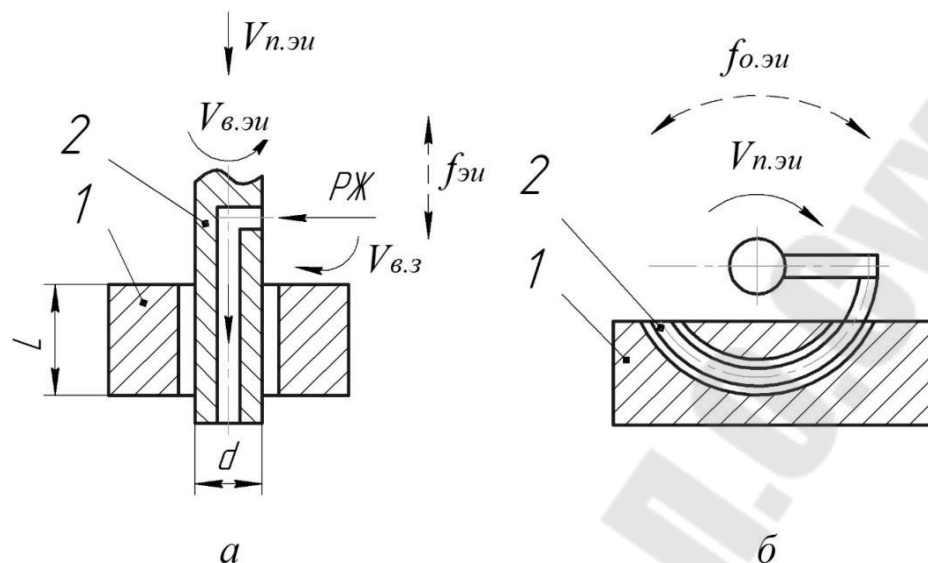


Рис. 7.1.7. Схемы прошивания круглых (а) и криволинейных (б) отверстий: **1** – заготовка; **2** – электрод-инструмент; $V_{п.эи}$ – скорость поступательного движения электрода инструмента; $V_{в.эи}$, $V_{в.з}$ – соответственно скорости вращательного движения электрода-инструмента и заготовки; $V_{о.эи}$ – скорость осцилляции электрода-инструмента; $f_{о.эи}$ – частота колебаний электрода-инструмента

Электроэрозионное объёмное копирование – обработка, при которой на электроде-заготовке отражается форма поверхности инструмента. Объёмное копирование осуществляют по одноконтурной или многоконтурной схемам. Обработку мелких деталей производят по одноконтурной схеме (рис. 7.1.8, а). Подача электрода **2** осуществляется поступательно. Для стабилизации обработки электроду дополнительно может сообщаться вибрационное или осциллирующее движения.

Обработку крупногабаритных изделий осуществляют по многоконтурной схеме. Электроды могут состоять из отдельных секций, изолированных друг от друга прокладкой (рис. 7.1.8, б). При раздельном расположении секций электродов процесс реализуется на многошпиндельных станках с автоматическими регуляторами подач, вибраций и осцилляций (рис. 7.1.8, в).

Объёмное копирование применяется в инструментальном производстве для обработки формообразующих элементов ковочных штампов, литейных форм, пресс-форм и т. д.

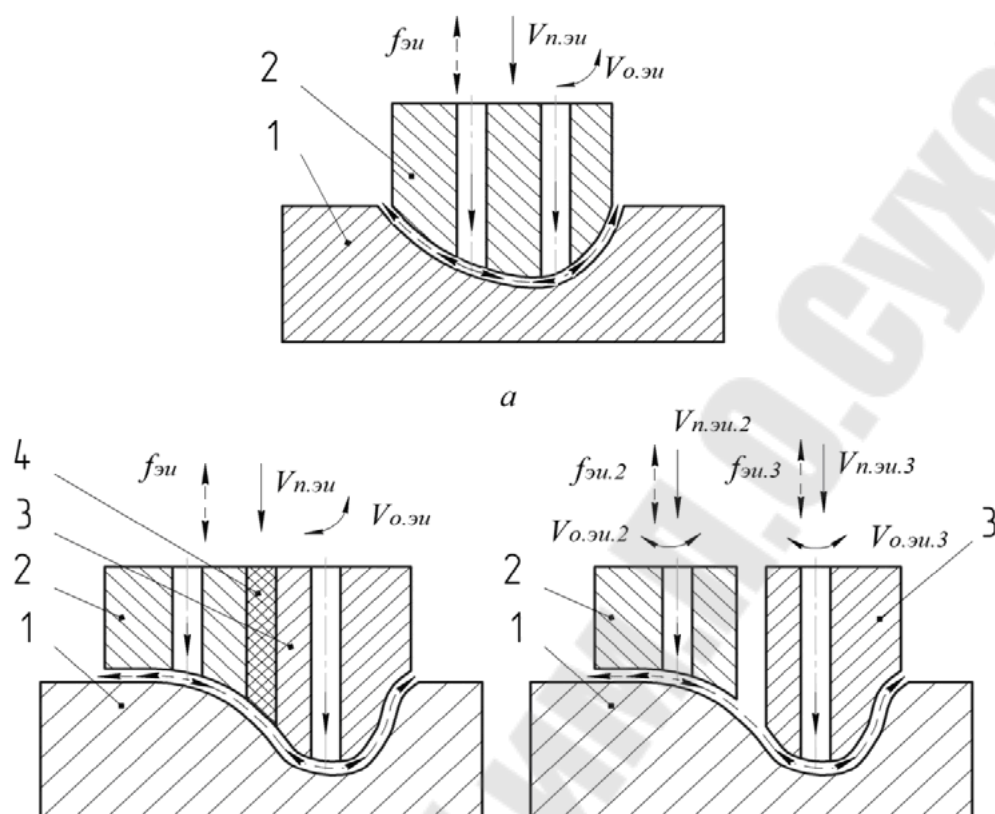


Рис. 7.1.8. Схемы объёмного копирования по одноконтурной схеме (а) и многоконтурной (б, в): 1 – заготовка; 2,3 – электроды-инструменты; 4 – прокладка; $V_{п.эи}$, $V_{п.эи.2}$, $V_{п.эи.3}$ – скорости поступательного перемещения электродов; $V_{о.эи}$, $V_{о.эи.2}$, $V_{о.эи.3}$ – скорости осцилляции электродов; $f_{эи}$, $f_{эи.2}$, $f_{эи.3}$ – частоты колебаний электродов

Для электроэрозионной обработки используют электроды-инструменты. В процессе изготовления инструменту придают форму, обратную форме поверхности обрабатываемой заготовки. Для подвода рабочей жидкости в электродах выполняют отверстия, которые располагают симметрично относительно оси детали (рис. 7.1.9 а). Если площадь обрабатываемой поверхности более $5 \cdot 10^3 \text{ см}^2$, то для снижения массы электродов их выполняют пустотелыми (рис. 9, б).

При черновой обработке сквозных отверстий инструмент выполняют в виде стержней (рис. 7.1.9, в). При выполнении прецизионных отверстий черновую обработку осуществляют стержневой частью электрода, а чистовую обработку – ступенчатой частью электрода (рис. 7.1.9, г). Каждая ступень по мере внедрения инструмента в деталь последовательно переключается с режима на режим: черновой, чистовой, доводочный.

С целью уменьшения влияния боковых разрядов на точность отверстия электроды могут выполнять с обратным конусом (рис. 7.1.9, д). По этой же причине электрод может быть выполнен ступенчатым с минимальной высотой боковой поверхности (рис. 7.1.9, е).

Обработку отверстий малого диаметра осуществляют проволокой или ступенчатым электродом (рис.7.1.9, ж, з). Формообразование решёток и сеток осуществляется выступами на торцевой части электрода (рис.7.1. 9, и).

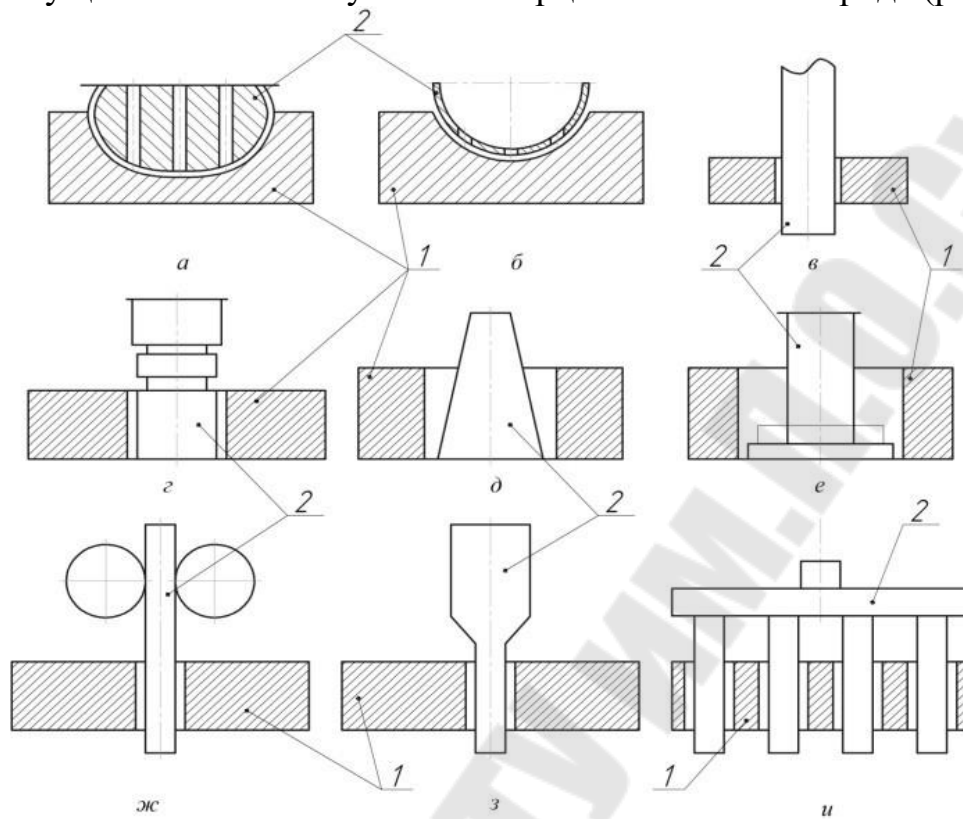


Рис. 7.1.9. Формы электродов-инструментов

Материалы для электродов-инструментов должны обеспечить устойчивость процесса обработки, получение изделий заданной геометрической формы требуемого качества, обладать высокой эрозионной стойкостью, низкой стоимостью, технологичностью при обработке.

Таким условиям удовлетворяют следующие материалы.

При отрезке и вырезке:

- латунная проволока, имеющая наиболее низкую из применимых материалов стоимость и малый износ;
- медно-цинковая проволока, позволяющая увеличить съём материала по сравнению с латунной проволокой благодаря более высокой теплопроводности медного покрытия;
- молибденовая проволока, обеспечивающая получение тонкого среза за счет высоких механических характеристик и эрозионной стойкости.

При прошивании и объёмном копировании:

- электролитическая медь, наиболее часто применяемая и обеспечивающая наилучшие условия для обработки за счет высокой теплопроводности;

- композиции меди с вольфрамом, имеющие высокую стоимость, но незаменимые при обработке твердых сплавов, титана, вольфрама благодаря высокой теплопроводности и эрозионной стойкости;

- медные сплавы, обладающие, по сравнению с чистой медью, более высокой обрабатываемостью резанием и улучшенными литейными свойствами;

- серый чугун – используемый при обработке твердосплавных заготовок вращающимся электродом-инструментом;

- первичный алюминий и алюминиевые сплавы, используемые для предварительной обработки отверстий и полостей из сталей жаропрочных материалов.

Из графитовых материалов и их композиций наиболее широко используются:

- графит, обеспечивающий вследствие высокой эрозионной стойкости больший по сравнению с электродами из меди съём материала и более широкий диапазон шероховатости поверхности;

- графито-полимерные композиции для изготовления сложных по форме электрод-инструментов.

При назначении материала подбирают такие пары материалов электрода и заготовки, которые обеспечивают максимальную эрозию материала заготовки при минимальном износе электрода-инструмента и максимальную производительность процесса.

Широко используются следующие сочетания материалов электрода-инструмента и заготовки:

- медь-сталь;
- медь-медные сплавы;
- медь-жаропрочные сплавы на никелевой основе;
- углеродистая или низколегированная сталь;
- графит – жаропрочный или коррозионностойкие стали;
- алюминий-стали и жаропрочные сплавы на никелевой основе;
- мелкодисперсный графиттитан;
- мелкодисперсный графит-сталь;
- медно-вольфрамовые композиции;
- чугун-твёрдый сплав.

С точки зрения обеспечения стабильности эрозии материала заготовки, возможности подвода большой мощности к обрабатываемой поверхности для различных групп обрабатываемых материалов предпочтительным является чистая медь. Для изготовления электродов-инструментов используются прутки, трубы, листовые заготовки.

В основном электроэрозионная обработка осуществляется в *рабочих жидкостях*. На рабочие жидкости возлагаются следующие функции: электроизоляция, ионизация, охлаждение и промывка. В соответствии с

функциями, жидкости должны удовлетворять определенным требованиям: обеспечение высоких технологических показателей; стабильность свойств при термическом воздействии электрических разрядов; низкой коррозионной активностью к материалам электродов и заготовки; высокой температурой вспышки, низкой испаряемостью и хорошей фильтруемостью.

В качестве рабочих жидкостей используются жидкие нефтепродукты: трансформаторное и промышленное масла, керосин, смесь керосина с различными маслами. Применяют рабочую жидкость, состоящую из воды и масла, которая готовится с помощью устройств ультразвукового или механического перемешивания. Применяются специальные рабочие жидкости на основе углеводородного сырья с самыми различными добавками, отвечающие всем требованиям электроэрозионной обработки и резко повышающие его качественные характеристики. Наиболее известны рабочие жидкости РЖЗ, РЖ8, РЖ8у.

Вид и состояние рабочей жидкости оказывают существенное влияние на технологические показатели электроэрозионной обработки. Уже на стадии пробоя проявляется диэлектрическая прочность рабочей среды и её вязкость. Вязкость определяет время формирования токопроводных частиц в «мостик», по которому происходит пробой рабочей среды. На стадии электрического разряда, когда происходит съём металла, протекают процессы разложения рабочей среды, окисления, полимеризации и конденсации углеводородов, накапливаются слоистые и асфальтовые сгустки, сажа, различные соли, кислоты, частицы обрабатываемого материала и материала электродов.

Испаряясь с поверхности электродов, химические элементы рабочей среды под действием разряда вступают в соединение с окисными пленками, покрывающими электроды, и образуют новые химические соединения. Эти новые образования имеют различную прочность, термостойкость и электрическую активность. Они изменяют тепловой баланс разряда, что сказывается на скоростях удаления материала с заготовки и эрозионном износе инструментов.

На стадии удаления продуктов эрозии и продуктов распада из зоны разряда, особое значение имеет вязкость рабочей среды. С увеличением вязкости степень захвата продуктов эрозии увеличивается, и процесс их удаления улучшается.

Одновременно с помощью рабочей среды охлаждается рабочая зона и предотвращается оплавление поверхности электродов. С ростом температуры рабочей жидкости и изменением её свойств несколько изменяются и теплофизические характеристики электродов. Поэтому все современные станки обязательно имеют в своём составе: системы тщательной очистки рабочей жидкости; устройства охлаждения; системы контроля температуры и поддержки температуры в заданных пределах;

устройства экспресс-контроля некоторых физических характеристик рабочей жидкости и др.

Технологические основы электроэрозионной обработки заключается в следующем, обработку применяют преимущественно на заключительных операциях чаще всего после термической обработки. Операции разделяются на черновые и чистовые. Каждая операция выполняется за несколько переходов. Количество переходов при черновой обработке зависит от предъявляемых требований к размерной точности и параметрами шероховатости поверхности после чистовой обработки.

Количество черновых переходов выбирается с таким расчетом, чтобы обработка производилась в режиме максимальной производительности и с минимальным износом электрода-инструмента, и на последнем черновом переходе была достигнута шероховатость, которая при чистовой обработке будет соответствовать величине, установленной чертежом изделия. Для выполнения электроэрозионной обработки целесообразно использовать два электрод-инструмента, один из которых предназначен для черновой обработки, а второй – для чистовой.

Чистовая обработка выполняется за несколько переходов. Определяющим фактором является шероховатость поверхности.

Количество переходов при чистовой обработке ограничивается 6–12. Чистовая обработка производится на мягких режимах последовательным переходом через ряд ступеней режимов в высокочастотный диапазон следования импульсных режимов.

В большинстве случаев при чистовой обработке изделия подвергаются полированию и выхаживанию. Количество переходов при доводке поверхностей заранее определить затруднительно. Ориентируются на достижение необходимого результата по шероховатости поверхности. Время обработки при доводке определяется технологическими возможностями применяемого оборудования.

Производительность процессов электроэрозионной обработки определяется объёмом или массой материала, удалённого с заготовки в единицу времени ($\text{мм}^3/\text{мин}$ или $\text{г}/\text{мин}$). Производительность обработки зависит от обрабатываемости материала, подводимой мощности, площади обработки, характеристики импульсов.

Количественным критерием обрабатываемости при электроэрозионной обработке принят коэффициент обрабатываемости, определяемый отношением производительности обработки материала заготовки к производительности обработки стали 45 при одинаковых условиях реализации процессов. Значение коэффициентов обрабатываемости для различных материалов приведены в таблице 10. Из приведённой таблицы следует, что при увеличении площади обрабатываемой поверхности параметры шероховатости увеличиваются.

Это объясняется ухудшением условий удаления продуктов электроэрозии, а так же влиянием электростатического электричества, накапливаемого в заготовке.

Параметры микронеровностей для различных материалов после электроэрозионной обработки составляют:

- электроискровой режим при обработке твёрдых сплавов Ra 0,2–0,3 мкм;
- электроискровой режим при обработке сталей Ra 0,3–0,6 мкм;
- электроискровой режим при доводке сталей Ra 0,04–0,08 мкм;- электроимпульсный режим Ra 10–20 мкм и более.

Качество обработки поверхности определяется также глубиной дефектного слоя или слоя термического влияния. Возникающие вследствие термических эффектов микротрещины могут существенно влиять на эксплуатационные характеристики деталей из жаропрочных и твёрдых сплавов.

В процессе электрического разряда происходит проникновение элементов материала электрода-инструмента и рабочей среды в расплав обрабатываемого материала. Это приводит к микролегированию поверхностного слоя.

Глубина зоны термического влияния h определяет размеры толщины слоя обрабатываемого материала, подверженного воздействию тепла и термомеханических явлений:

$$h = 4\sqrt{\pi\lambda_T\tau_n/C\rho} - Rz, \text{Bm/м} \cdot \text{к},$$

где λ_T – коэффициент теплопроводности; τ_n – длительность импульса, мкс; C – теплоёмкость, Дж/К; ρ – плотность материала, кг/м³; **Rz** – параметр шероховатости, мкм.

Если учесть остаточные напряжения и упругие деформации, то размеры зоны увеличатся.

В зависимости от режимов обработки размеры зоны термического влияния могут изменяться в пределах: отделочные и чистовые режимы 0,08–0,35; при черновой обработке 0,02–1 мм.

Точность при электроэрозионной обработке размеров это степень приближения формы и размеров к идеальным. Отклонение реальных размеров от идеальных называют погрешностью, которую в общем случае можно представить в виде

$$\Delta_{\text{сум}} = \Delta_{\text{ст}} + \Delta_T + \Delta_{\text{настр.}} + \Delta_{\text{пр}},$$

где $\Delta_{\text{ст}}$, Δ_T – соответственно погрешности, вызванные неточностью изготовления станка и нагревом электрода-инструмента; $\Delta_{\text{настр.}}$ – погрешности, вызванные неточностью расположения электрода-инструмента и заготовки; $\Delta_{\text{пр}}$ – погрешность, обусловленная процессом обработки.

Погрешности, вызванные неточностью изготовления станка, оценивают по нормам геометрической точности. Современные электроэрозионные установки обеспечивают геометрическую точность обработки заготовки в пределах $\pm 0,5$ мкм.

В зависимости от параметров разрядов (длительности и энергии) различают две основные разновидности электроэрозионной обработки:

- электроискровая обработка, основанная на использовании импульсных искровых разрядов малой длительности (от долей мкс до нескольких сотен мкс) и малой энергии разряда;
- электроимпульсная обработка, основанная на использовании импульсных дуговых (стационарных) разрядов большой длительности (от сотен мкс до десятков тысяч мкс) и большой энергии разряда.

На рис. 7.1.10 приведена схема электроискрового метода обработки. При соприкосновении электрода-инструмента **3** с контактом **2** конденсатор **4** заряжается от источника тока **1**. При перемещении электрода **3** вниз при зазоре 5...100 мкм под действием электрического поля от катода к аноду проскакивают электроны, которые ионизируют молекулы воздуха и, тем самым создают узкий канал, проводящий ток. В процессе ионизации возрастающая плотность тока в канале достигает некоторого предела, и при сближении электрода **3** с электродом-деталью **5** до образования зазора **6**, измеряемого в микронах (0,1...1 мкм), происходит разрядка конденсатора в виде кратковременной искровой вспышки между электродами. Искровой разряд продолжается всего 10^{-4} ... 10^{-8} секунды, мгновенная температура в канале проводимости поднимается до 6000...10000°C и более, а плотность тока превышает 10000 А/мм².

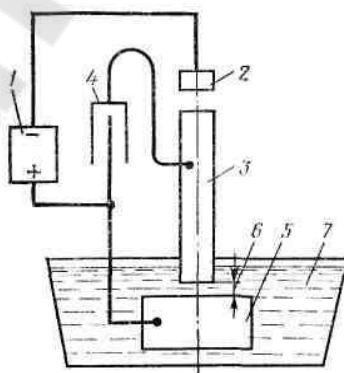


Рис. 7.1.10. Принципиальная схема электроискровой обработки

Под воздействием высокой температуры, создаваемой электрическими разрядами, возникающими при движении электрода вниз, происходит плавление и частичное испарение металла с образованием углубления в обрабатываемой детали. При этом электрод-инструмент, сохраняя межэлектродный промежуток, постепенно углубляется в

обрабатываемую деталь и придает ей форму, соответствующую форме электрода-инструмента.

Электроискровую обработку обычно производят в условиях, когда электрод-деталь включен на анод (плюс), а электрод-инструмент – на катод (минус), при этом происходит наиболее быстрое разрушение металла детали. Во избежание переноса расплавленного металла с детали на инструмент процесс обработки производится в диэлектрической жидкости 7 (керосине, машинном или трансформаторном масле). В этих условиях расплавленные частицы металла, смываясь жидкостью, остывают в ней и в застывшем состоянии в форме мельчайших шариков падают на дно ванны.

Электроды-инструменты изготавливают из латуни, медно-графитовой массы, меди и других токопроводящих материалов. Производительность электроискровой и электроимпульсной обработок металлов, шероховатость и точность обработанных поверхностей определяются мощностью и длительностью электрических разрядов, т.е. электрическим режимом работы.

Электроискровую обработку проводят на черновых, чистовых и отделочных режимах. Выбранный режим определяет производительность процесса и шероховатость обработанной поверхности. Рабочее напряжение на электродах составляет 25...200 В. При черновом режиме энергия единичного импульса примерно равна 0,5...5 Дж, сила тока в цепи разряда >100 А, емкость конденсаторов >100 мкА. При отделочном режиме энергия единичного импульса равна 0,005...0,05 Дж, сила тока ниже 10 А, емкость конденсаторов менее 10 мкм. Малая мощность и кратковременность разрядов являются условиями для получения обработанной поверхности до 6...9-го квалитетов точности и шероховатости ($R_a = 2,5...0,40$ мкм). При мягком режиме работы уменьшается съем металла. Электроискровым методом можно обрабатывать ограниченную поверхность (250...1500 мм²); производительность процесса составляет 35...1200 мм³/мин.

Электроискровым методом можно получить хорошую поверхность, но не обладает достаточной производительностью. Кроме того, при этом методе износ инструмента относительно велик (достигает 100% от объема снятого материала). Метод используется в основном при прецизионной обработке небольших деталей,

Электроискровым методом получают сквозные отверстия любой формы поперечного сечения, глухие отверстия и полости, фасонные отверстия и полости по способу трепанации, отверстия с криволинейными осями, вырезают заготовки из листа при использовании проволочного или ленточного инструмента электрода, выполняют плоское, круглое и внутреннее (*e*) шлифование, разрезают заготовки, клеймят и т. д.

Электроимпульсная обработка металлов представляет собой разновидность электроэрозионной обработки. По сравнению с

электроискровой обработкой процесс характеризуется увеличением мощности единичных разрядов, длительностью импульсов, обратной полярностью (анод-инструмент, катод-заготовка), применением пониженных напряжений и относительно большими значениями средних токов. В результате производительность процесса по сравнению с электроискровой обработкой во многих случаях в 8...10 раз выше. Этот метод позволяет производить обработку на больших площадях (до 240 см²) с высокой производительностью (до 5000 мм³/мин); шероховатость обработанной поверхности на 1...3 класса ниже, чем при обработке электроискровыми методами (рис. 7.1.11).

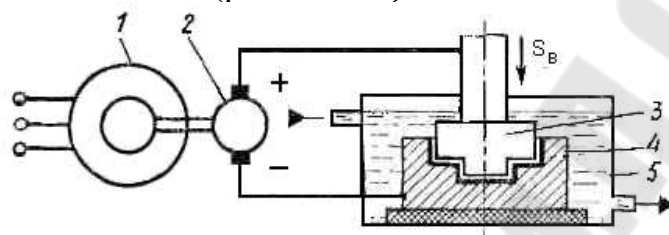


Рис. 7.1.11. Схема электроимпульсной обработки

На рис. 7.1.11 приведена одна из схем электроимпульсного метода обработки металлов. Электрод-инструмент **3** и электрод-деталь **4**, погруженные в ванну **5** с жидкостью, присоединяются к импульсному генератору постоянного тока **2**, приводимому в действие от электродвигателя **1**. Жидкой средой служат масла низкой вязкости (индустриальное, трансформаторное), керосин и др. В межэлектродном пространстве возникают электрические разряды определенной длительности, сопровождающиеся выделением теплоты. Под воздействием теплоты происходит разрушение металла на поверхности электродов. Электрические режимы назначают в зависимости от характера обработки и от площади обрабатываемой поверхности. При площади обрабатываемой поверхности 20...240 см² черновую обработку осуществляют при токе 50...500 А, а чистовую – при 5...50 А. Верхнее значение напряжения составляет 24...26 В, а нижнее – 11...12 В.

Недостатком электроискрового и электроимпульсного методов обработки является малая стойкость электрода-инструмента, который приходится заменять после обработки 5...10 деталей.

Электроимпульсную обработку проводят на специальных электроимпульсных станках, на которых обрабатывают пресс-формы, вырубные просеченные и чеканочные штампы и прошивают отверстия любой конфигурации в закаленных деталях.

Наиболее целесообразной областью применения электроимпульсных режимов является предварительная обработка заготовок сложнопрофильных деталей (штампы, турбины, лопатки и т.д.), изготовленных из труднообрабатываемых сплавов и сталей.

Электромеханическая обработка — это вид обработки поверхности деталей, основанный на одновременном термическом и механическом воздействии на поверхностный слой обрабатываемой детали. В результате значительно изменяются физико-механические свойства поверхностного слоя, повышается износостойкость и микротвердость. К ним относят: электроконтактную, электроабразивную, магнитоимпульсную и ультразвуковую обработку материалов.

Электрогидравлическая обработка это возникновение высокого давления в результате действия высоковольтного электрического разряда между погруженными в непроводящую жидкость электродами называется электрогидравлическим эффектом (ЭГЭ).

Теория электрогидравлического эффекта заключается в возникновении высокого давления в результате действия высоковольтного электрического разряда между погруженными в непроводящую жидкость электродами и называется электрогидравлическим эффектом (ЭГЭ). Результатом энергии импульсной ударной волны, распространяющейся вокруг канала разряда в рабочей среде, является давление до 300 МН/м^2 .

Электрический разряд в жидкости - это способ преобразования электрической энергии в механическую, которое совершается без промежуточных звеньев и с высоким КПД. Электрическая схема электрогидравлического эффекта показана на рис. 7.1.12 Элементами схемы являются повышающий трансформатор-Т, выпрямитель-В, накопитель энергии-С, формирующий промежуток-ФП и разрядный промежуток-РП.

Высоковольтный искровой разряд в жидкости характеризуется очень быстрым преобразованием запасенной в накопителе электрической энергии в тепловую, световую, механическую и т. д. В момент пробоя практически несжимаемая жидкость вызывает электрогидравлический удар, что еще больше усиливает действие электрического взрыва. В процессе образования и развития искрового канала в жидкости выделяют следующие три стадии.

1. При появлении высокого напряжения в разрядном промежутке жидкости в течение некоторого времени t_1 напряжение на нем остается практически постоянным. Затем в зависимости от параметров контура и начального напряжения оно резко падает.

Образование канала разряда при высоких напряжениях на рабочих электродах обусловлено появлением лидеров, которые вызывают потоки электронных лавин, срывающихся с отрицательного электрода и устремляющихся к положительному электроду. В начале пробоя образуется несколько лидерных каналов, которые затем сливаются в один общий канал.

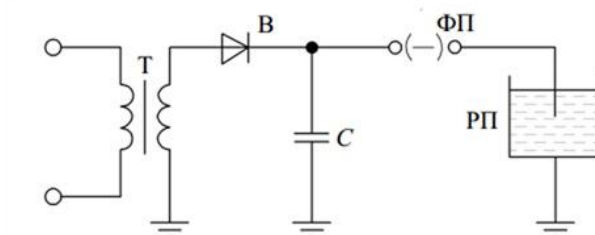


Рис. 7.1.12. Электрическая схема электрогидравлической обработки

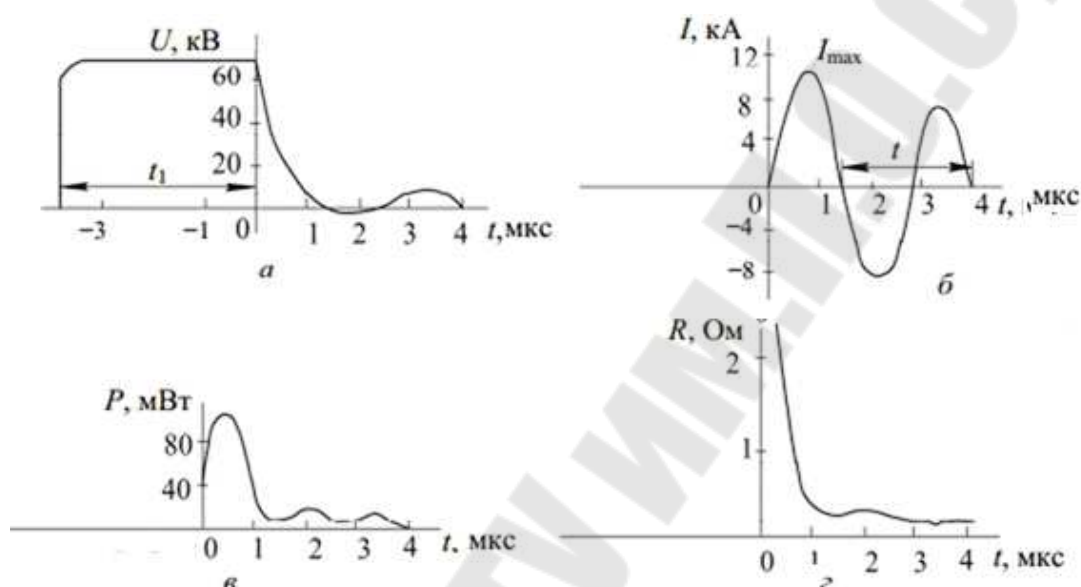


Рис. 7.1.13. Зависимости напряжения (а), тока (б), мощности (в) и сопротивления (г) канала разряда от времени

Промежуток времени t_1 характеризует лидерную стадию разряда и определяется электрохимическими свойствами жидкости, напряжением, формой и размерами электродов. Чем больше уровень напряжения, меньше длина рабочего промежутка и площадь положительного электрода, тем меньше t_1 . На рис. 7.1.13 представлены зависимости тока, напряжения, мощности и сопротивления канала разряда от времени.

Лидерная, или стримерная, стадия продолжается от момента приложения напряжения к разрядному промежутку до образования токопроводящего канала между электродами.

2. Яркая вспышка - результат пробоя межэлектродного промежутка. Во время вспышки выделяется большая часть запасенной в конденсаторе энергии. Эта стадия ограничивается малым временем протекания и значительным световым излучением. После пробоя межэлектродного промежутка его сопротивление резко падает, а ток при этом резко возрастает. Плотность тока в канале разряда достигает до 10^6 А/см² и выше. Плотность выделяющейся в канале энергии очень велика, это приводит к разогреву окружающей среды, ее диссоциации и ионизации. В результате вспышки в канале разряда образуется плазма температурой 15 000-20 000 К.

Спонтанный нагрев плазмы разрядным током вызывает повышение давления в канале и его расширение. Мгновенное расширение канала в прилегающей жидкости вызывает ударную волну, распространяющуюся от канала разряда в виде зоны сжатия с крутым передним фронтом. Фронт ударной волны, сначала неотделимый от стенки канала, через некоторое время отделяется от нее, так как скорость распространения ударной волны в среде существенно выше скорости расширения канала разряда. При удалении фронта волны от канала скорость ее распространения приближается к звуковой, а давление на фронте волны падает из-за рассеивания энергии.

3. При снижении тока в разрядном контуре и достаточной мощности источника искровой разряд может перейти в стадию дугового разряда. Это приводит к уменьшению плотности тока в канале и температуры плазмы в нем. При дуговом разряде ток поддерживается за счет термоэлектронов катода. В канале образуется пар за счет превращения остывающей плазмы в пар и испарения части жидкости из окружающих канал разряда слоев. Канал разряда превращается в парогазовую сферу. По мере увеличения газовой сферы давление в ней понижается и становится меньше гидростатического. Окружающие газовую сферу слои воды продолжают двигаться по инерции. По достижении максимального размера сфера начинает сжиматься. Таких циклов «расширение - сжатие» может быть несколько.

Первоначальная форма канала разряда, возникшего в результате высоковольтного пробоя жидкости, зависит от формы лидера, замыкающего электроды. Поэтому такой канал почти всегда искривлен. Возникающий разряд с помощью взрывающейся проволоочки образует канал, который имеет форму прямого цилиндра со сферическими торцами.

Стартовый диаметр канала при высоковольтном пробое воды составляет несколько десятых долей миллиметра. При возбуждении же разряда проволочкой начальный диаметр канала разряда зависит от диаметра проволоочки. Материал используемых проволочек и их размеры заметно влияют как на значение, так и на характер выделяемой энергии при высоковольтном разряде в жидкости.

При увеличении диаметра проволочки максимум мощности электрического разряда растет до определенного значения, а затем убывает.

Исходный материал и размеры технологических проволочек влияют на гидродинамические параметры разряда, на давление и скорость образующейся при разряде ударной волны.

Размер проволочек обусловлен оптимальными параметрами разряда, как по электрическим, так и по гидродинамическим показателям процесса.

Магнитно-импульсная обработка металлов основывается на электромеханическом взаимодействии между вихревыми токами, наведенными в стенках обрабатываемой детали при пересечении их

силовыми магнитными линиями импульсного магнитного поля, и самим магнитным потоком.

Магнитоимпульсная обработка (рис. 7.1.14) применяется для пластического деформирования металлов и сплавов (обжатие и раздача труб, формовка трубчатых и листовых заготовок, калибровка и т.п.). Обработка основана на непосредственном преобразовании энергии меняющегося с большой скоростью магнитного поля, возбуждаемого, например, при разряде батареи мощных конденсаторов **2** на индуктор **1**, в механическую работу при взаимодействии с проводником-заготовкой.

Преимуществом данного метода считается: отсутствие движущихся и трущихся частей в установках; высокая надежность и производительность; легкость управления и компактность; наличие лишь одного инструмента – матрицы или пуансона (роль другого выполняет поле). К недостаткам можно отнести: относительно невысокий КПД; затруднение обработки заготовок с отверстиями и пазами; ограниченность толщины заготовки.

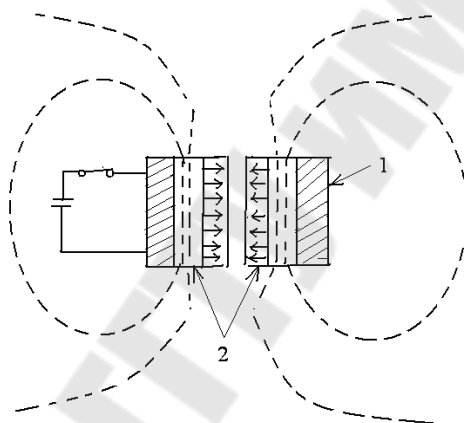


Рис. 7.1.14. Схема магнитоимпульсной обработки: **1** – индуктор; **2** – заготовка

Электроконтактная обработка основана на введении в зону механической обработки электрической энергии — возбуждении мощной дуги переменного или постоянного тока (до 12 кА при напряжении до 50 в) между, например, диском, служащим для удаления материала из зоны обработки, и изделием (рис. 7.1.15). Применяется для обдирки литья, резки и других видов обработки, аналогичных по кинематике движений почти всем видам механической обработки. Преимущества метода — высокая производительность (до 10^6 мм³/мин) на грубых режимах, простота инструмента, работа при относительно небольших напряжениях, низкие удельные давления инструмента — 30—50 кН/м² (0,3— 0,5 кгс/см²) и, как следствие, возможность использования для обработки твёрдых материалов инструмента, изготовленного из относительно мягких материалов. Недостатки — большая шероховатость обработанной поверхности, тепловые воздействия на металл при жёстких режимах.

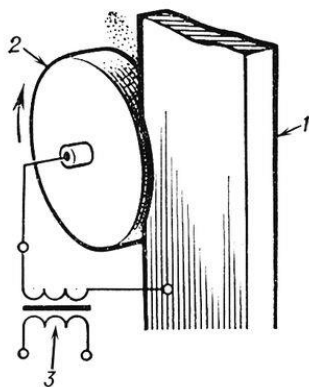


Рис. 7.1.15. Принципиальная схема электроконтактной обработки: 1 — заготовка; 2 — диск; 3 — источник питания

Разновидностью электроконтактной обработки является электроабразивная обработка — обработка абразивным инструментом (в т. ч. алмазно-абразивным), изготовленным на основе проводящих материалов. Введение в зону обработки электрической энергии значительно сокращает износ инструмента.

Электроконтактные станки по кинематике не отличаются практически от соответствующих металлорежущих станков; имеют мощный источник тока.

Разновидностью электроконтактной обработки является *электроабразивная обработка* — обработка абразивным инструментом (например, алмазно-абразивным), изготовленным из электропроводящих материалов. Благодаря введению в зону обработки электрической энергии значительно сокращается износ инструмента.

При электроабразивной обработке съём металла осуществляется микрорезанием в условиях непрерывного эрозионного воздействия на рабочую поверхность круга-инструмента. Электрические разряды, генерируемые либо непосредственно между заготовкой и инструментом, либо между инструментом и специальным дополнительным электродом, обеспечивают вскрытие новых рабочих абразивных зерен, удаление стружки с поверхности инструмента (ликвидацию «засаливания») и разрушение стружки в объеме рабочей зоны. Эрозионный характер процесса носит упорядоченный характер, так как его интенсивность может регулироваться в достаточно широких пределах, что обеспечивает значительное повышение и стабилизацию во времени режущей способности инструмента, повышение в десятки раз периода его стойкости, снижение затрат мощности на трение.

Ультразвуковой размерной обработкой называют направленное разрушение твердых и хрупких материалов с помощью инструмента (рис. 7.1.16).

Ультразвуковая размерная обработка включает: размерную обработку сверхтвердых и хрупких материалов (сверление отверстий сложного

профиля, шлифование, полирование, наклеп, волочение проволоки, прокатка фольги и т. д.); лужение и паяние металлов, керамики, стекла и т.п.; сварку ультразвуком металлов и полимеров. В частности, ультразвуковая обработка твердых и хрупких материалов может выполняться на ультразвуковых станках. Сущность этого способа обработки основана на долбящем действии абразивной суспензии (смеси антикоррозийной жидкости с абразивными частицами во взвешенном состоянии) и кавитационных процессах в суспензии, которые значительно ускоряют направленное разрушение обрабатываемого материала. Суспензия не только передает энергию от вибрирующего с ультразвуковой частотой (выше 18 кГц) инструмента абразивным зернам, но и содействует удалению из рабочего зазора продуктов разрушения обрабатываемого материала (рис. 7.1.16, б).

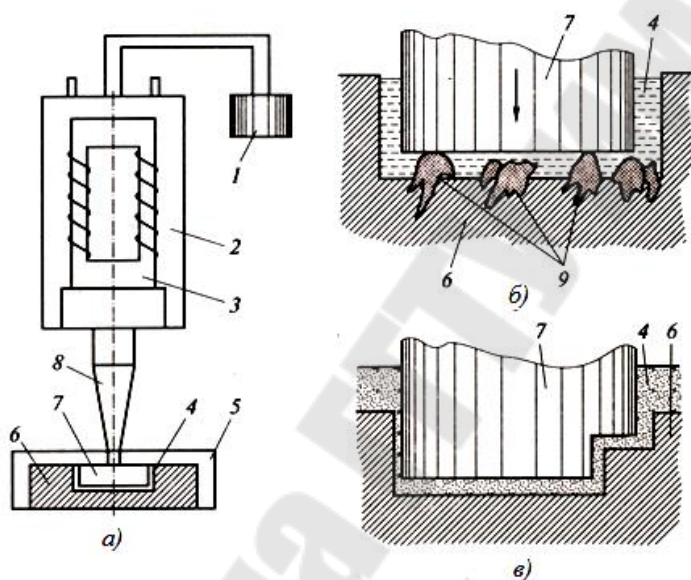


Рис. 7.1.16. Схема ультразвуковой размерной обработки прошиванием (долблением): а – принципиальная схема ультразвуковой установки; б – схема съема материала при ультразвуковом прошивании; в – схема копирования профиля инструмента в заготовке: **1** – генератор тока повышенной частоты; **2** – корпус магнитосриктора с охлаждающей водой; **3** – магнитостриктор (пакет с обмоткой); **4** – зазор, заполненный суспензией абразива; **5** – ванна; **6** – обрабатываемая заготовка; **7** – инструмент; **8** – концентратор-волновод (трансформатор амплитуды); **9** – частички абразивных зерен

Абразивная суспензия подается в зону обработки свободно, под давлением или отсасывается из зоны обработки через отверстия в инструменте или обрабатываемой заготовке. Массовая концентрация абразива выбирается в пределах 30–40 % при свободной подаче абразивной

суспензии и 20–25 % при подаче ее под давлением и отсосе. В качестве абразива применяют карбиды бора, кремния и алмазные порошки зернистостью 3–10 по ГОСТ 3647-80

Механические колебания инструмента с ультразвуковой частотой получают путем преобразования электрических колебаний в специальном электромеханическом преобразователе (рис. 7.1.16, а). Преобразователь состоит либо из набора пластин магнитострикционного материала (никеля, пермендюра*), обладающего способностью изменять свои линейные размеры в переменном магнитном поле, либо из пьезокерамических пластин, изменяющих свои линейные размеры в переменном электрическом поле. Для питания преобразователей ультразвуковых станков используют высокочастотные генераторы мощностью 0,05–2,5 кВт, работающие с частотой 22 или 44 кГц.

**Примечание:* Пермендюр (англ. permendur: permeability — «проницаемость»; durable — «прочный») — сплав железа (47-50 %) с кобальтом (48-50 %), с небольшой добавкой ванадия (1,5-2 %).

Ультразвуковая обработка применяется для формообразования деталей из твердых и хрупких материалов: стекла, керамики, германия, кремния, феррита, рубина, твердого сплава, алмаза и др.

Инструменты для ультразвуковой обработки изготавливают из углеродистых сталей 45, 40Х, У8А, У10А, 65Г и др.

При обработке твердых сплавов ультразвуковая обработка может быть совмещена с электрохимическим анодным растворением.

Ультразвуковая обработка обеспечивает объемную скорость съема при обработке стекла до 100 м³/с и твердого сплава до 10 м³/с, при этом обеспечивается шероховатость обработанной поверхности Ra = 0,32–0,16 мкм. Относительный износ инструмента колеблется от 0,5–1 % (при обработке стекла, мрамора, кремния) до 40–60 % (при обработке твердых сплавов).

Ультразвуковую обработку обычно применяют для изготовления высадочных и чеканочных неразъемных твердосплавных штампов, вырезания заготовок из германия, кремния, керамики, кварца для полупроводниковых и других приборов, получения из оптического стекла заготовок сложных фасонных линз, клеймения, нанесения надписей и рисунков, обработки алмазных и твердосплавных волокон, фильер и др.

Тема 7.2. Лучевые методы обработки

К лучевым методам обработки относится обработка материалов электронным пучком и световыми лучами. Лучевая обработка, основанная на съеме материала при воздействии на него концентрированных лучей с высокой плотностью энергии. Она применяется для обработки

токопроводящих и не токопроводящих материалов. Как и при электроэрозионной обработке, съем металла, осуществляется при преобразовании этой энергии непосредственно в зоне обработки в тепло. Эти методы не требуют применения специального инструмента, обеспечивающего подведение энергии к месту обработки.

Электронно-лучевой называют обработку, при которой для технологических целей используют острогофокусированный пучок электронов, движущихся с большой скоростью.

Метод электроннолучевой обработки (ЭЛО) основан на использовании тепла, выделяющегося при резком торможении потока электронов на поверхности обрабатываемой заготовки. При электроннолучевой обработке деталь помещают в герметическую камеру, в которой благодаря непрерывной работе вакуумных насосов обеспечивается высокая степень разрежения (до 10^{-7} Па). Поскольку электроны не изменяют химических свойств твердого тела, то обработка ими в вакууме является существенным достоинством этого метода, так как при обработке не происходит химического загрязнения материала заготовки.

Существенным для использования в технике электронного луча для обработки материалов является простота получения большого количества свободных электронов. Если нагреть в вакууме металлическую, например танталовую или вольфрамовую, проволоку, то с ее поверхности излучаются электроны (термоэлектронная эмиссия), число и скорость которых зависят от температуры нагрева.

Кинетическая энергия этих электронов, беспорядочно движущихся в пространстве, окружающем эмиттер, сравнительно невелика. Ее можно существенно повысить путем ускорения движения электронов в определенном направлении воздействием электрического поля, создаваемого высокой разностью потенциалов между эмиттером, являющимся в данном случае катодом и анодом.

Съем металла с поверхности за счет испарения и взрывного вскипания - физическая основа размерной ЭЛО. Пары материала, покидая зону обработки, производят давление - отдачу, углубляя зону расплава. В связи с этим при ЭЛО возможно получить глубокое ("кинжальное") проплавление или сварку соединений, а, при размерной ЭЛО - глубокие отверстия. Для этого используют специальное устройство - электронную пушку, (рис. 7.2.1) которое вместе с электронно-оптической системой создает острогофокусированный пучок электронов, излучаемых катодом, ускоряемый в вакууме электрическим полем с разностью потенциалов до 150 кВ. Скорость электронов при этом может достигать 100 тысяч км/с и более.

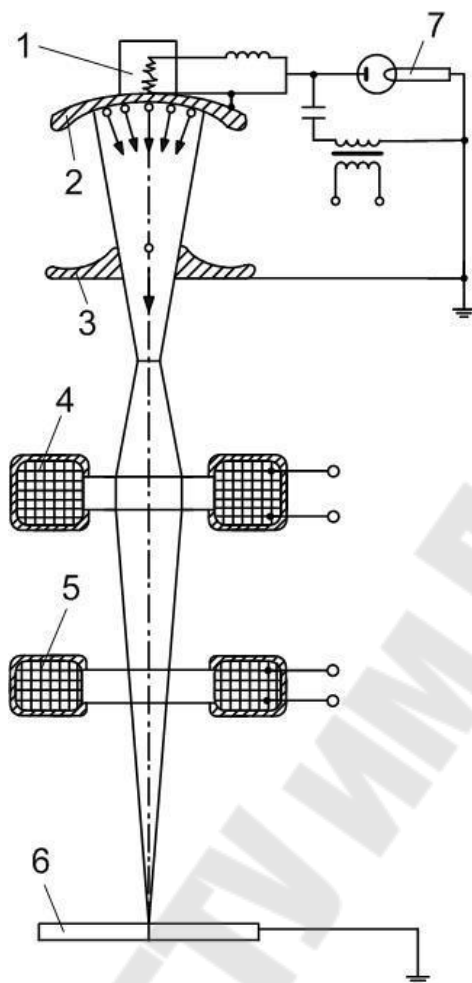


Рис. 7.2.1. Схема электроннолучевой пушки: **1** – катод; **2** – прикатодный электрод; **3** – ускоряющий электрод; **4** – магнитная линза; **5** – отклоняющая система; **6** – изделие; **7** – высоковольтный источник

Пушка имеет катод **1**, который нагревается до высоких температур проходящим током или путем бомбардировки электронами вспомогательного катода. Раскаленный катод испускает (эмитирует) свободные электроны. Катод изготавливают из тугоплавких металлов или специальной керамики.

Катод размещен внутри прикатодного электрода **2**, изготовленного из нержавеющей стали. На некотором удалении от катода находится ускоряющий электрод (анод) **3** с отверстием. Между катодом и анодом создается электрическое поле высокой напряженности, в результате чего электроны, вылетевшие с катода, ускоряются. При катодный и ускоряющий электроды имеют форму, обеспечивающую такое строение электрического поля между ними, которое фиксирует электроны в пучок диаметром, равным диаметру отверстия в аноде. Положительный потенциал ускоряющего электрода может достигать нескольких десятков тысяч вольт, поэтому электроны, эмитированные катодом, на пути к аноду приобретают

значительную скорость и энергию. После ускоряющего электрода электроны движутся равномерно.

Питание пушки электрической энергией осуществляется от высоковольтного источника **7** постоянного тока. Электроны имеют одинаковый заряд, поэтому они отталкиваются друг от друга, в результате чего диаметр электронного луча увеличивается, а плотность энергии в луче уменьшается.

Для увеличения плотности энергии в луче после выхода электронов из первого анода электроны фокусируются магнитным полем в специальной магнитной линзе **4**, представляющей собой катушку, питаемую электрическим током. Фокусировка электронов в пучок минимального размера происходит на некотором удалении от магнитной линзы, в области которой осуществляется электроннолучевая обработка. Сфокусированные электроны ударяются с большой скоростью о малую ограниченную площадку на изделии **6**, и их кинетическая энергия превращается в теплоту, нагревая металл до очень высокой температуры.

Для перемещения луча по поверхности обрабатываемого объекта на пути электронов помещают магнитную отклоняющую систему **5**, с помощью которой может отклонить луч по любой траектории и с любой частотой. Эти системы используют для точного установления луча по стыку (при сварке), интенсивного перемещения металла (при сварке и металлическом плавлении), отклонении луча на значительное расстояние (при напылении).

Размерная обработка производится с помощью остросфокусированных потоков электронов. Она основана на интенсивном испарении материалов из зоны воздействия пучка с минимальным образованием жидкой фазы. Этот вид обработки используется для формирования планарных изображений, подгонки электрических номиналов элементов тонкопленочных схем, обработки изделий из таких материалов, как кремний, германий, керамика, ферриты, керметы и т. д. Мощность установок для этих целей в непрерывном режиме обычно не превышает 1 кВт, а в импульсном - 15 кВт.

При больших плотностях мощности и ускоряющих напряжениях порядка 100 - 175 кВ в зоне обработки возникают очень высокие температуры и все известные материалы при таких условиях плавятся и затем испаряются.

Можно также получать покрытия из труднолетучих и тугоплавких материалов: Al_2O_3 , SiO_2 , стекла и карбидов тугоплавких металлов.

Для формирования потока электронов и транспортировки его к объекту необходим вакуум. Внутри электронных пушек - на уровне $10^{-3} \dots 10^{-4}$ Па, а в технологических камерах 10^{-2} - 10^{-3} Па.

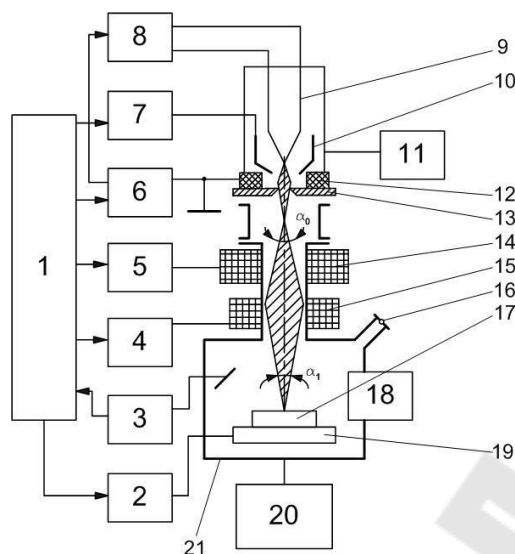


Рис. 7.2.2. Типовая схема электроннолучевой технологической установки: **1**- управляющая ЭВМ; **2** - управляющее устройство перемещения объекта; **3** - контрольное устройство; **4** - блок отклонения луча; **5** - блок фокусировки; **6** - высоковольтный выпрямитель; **7** - блок питания модулятора; **8** - блок питания катода; **9** - катод электронной пушки; **10** - модулятор; **11** - система откачки пушки; **12** - изолятор; **13** - анод; **14** - фокусирующая магнитная катушка; **15** - катушка отклонения луча; **16** - система визуального контроля зоны обработки; **17** - объект; **18** - вакуумный шлюз; **19** - механизм крепления и перемещения объекта; **20** - система откачки рабочей камеры; **21**- рабочая камера

Так как электронный луч очень чувствителен к электрическим и магнитным полям, то в электронных установках должна быть предусмотрена стабилизация ускоряющего и фокусирующих напряжений, сил токов питания фокусирующих и отклоняющих магнитных систем. Схема электроннолучевой технологической установки показана на рис. 7.2.2.

В зависимости от конструкции электронной пушки, поток электронов может быть сформирован в виде луча круглого сечения, ленты, клина, кольца, иметь различную энергию в выбранном диапазоне, быть стационарным или импульсным.

Эмиттером электронов в пушках с небольшими силами тока пучка служат *металлические* (вольфрамовые и танталовые) *термокатоды* прямого действия, конструктивно выполняемые в виде V-образных проволочек, стержней, спиралей, таблеток.

Повысить концентрацию электронов можно, если сжать плазму стенками сужающегося полого электрода или воздействовать на нее магнитным полем, концентрируя зону разряда в малом объеме. Такое двойное контрагирование плазмы происходит в дуоплазматронах. В них

разряд зажигают между термокатодом или холодным полым катодом и анодом, в котором имеется эмиссионное отверстие диаметром 0,3 - 2 мм.

Конструктивно такая электронная пушка оформляется в камере 1 (рис. 7.2.3), откачиваемой отдельно от рабочей камеры установки. В камере через высоковольтный изолятор 4 закреплены в катодный узел со сменной вольфрамовой спиралью 2, водоохлаждаемый промежуточный электрод 5 и основной анод 3. Промежуточный электрод и корпус анода изготовлены из стали, и служат магнитопроводами.

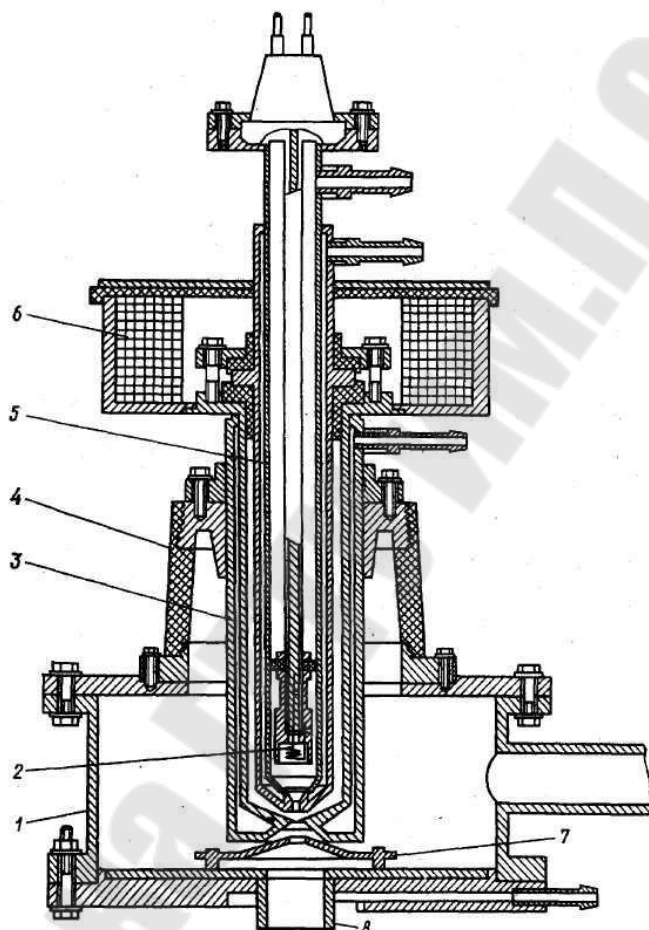


Рис. 7.2.3. Конструкция дуоплазmatронной плазменной электронной пушки: 1 - камера; 2 - спираль; 3 - основной анод; 4 - изолятор; 5 - промежуточный анод; 6 - катушка; 7 - вытягивающий электрод; 8 - вакуумный патрубок

Магнитное поле создается катушкой 6. В зазоре по оси между анодом и промежуточным электродом обеспечивается резко неоднородное магнитное поле для сжатия плазмы. Рабочий газ (аргон) подается в полость промежуточного электрода через регулируемый натекаль с расходом порядка $10 \text{ см}^3/\text{ч}$, при этом в разрядной камере давление составляет 5 - 10 Па.

Максимальное давление ограничено возможностью пробоя, а минимальное - погасанием дуги.

При включении напряжения между термокатодом и промежуточным электродом внутри последнего зажигается несамостоятельный разряд. Он инициирует образование дугового разряда между основным анодом и катодом после включения анодного напряжения. Плазма дуги сжата в канале промежуточного электрода и затем в разрыве магнитной цепи на выходе из него.

Со стороны плазмы анод окружен слоем пространственного заряда. Этот заряд формирует границу плазмы, и она не выходит значительно за пределы эмиссионного отверстия. Магнитное поле с индукцией порядка 0,2 Тесла сконцентрировано в малом зазоре между цилиндрическим промежуточным электродом и анодом. Поле дополнительно сжимает плазменный разряд, увеличивая концентрацию $10^{\cdot}$ заряженных частиц до 6^{-14} см⁻³. В зависимости от силы тока разряда, вытягивающего напряжения и расстояния между анодом и ускоряющим электродом, форма границы плазмы в области эмиссионного отверстия может быть плоской, выпуклой или вогнутой. Последняя форма способствует начальной фокусировке электронного потока.

Степень ионизации рабочего газа в этой области близка к 100%. Для извлечения электронов с границы плазмы и начального формирования потока используется конический вытягивающий электрод 7. Обычно он заземлен, а все детали дуоплазматрона находятся под высоким отрицательным потенциалом.

Поток электронов выходит в камеру через вакуумный патрубок 8, где он фокусируется магнитной линзой и отклоняется полем катушек.

Типовой режим работы рассмотренного источника: сила тока разряда дуги 0,1—12 А при напряжении горения дуги 50—150 В; сила тока пучка до 1,5 А при вытягивающем напряжении до 30 кВ. Даже при относительно малых токах разряда (2—1,5 А) и расходах газа плотность тока с границы плазмы составляет 25—100 А/см², а общий ток - единицы ампер. Используя анодные и вытягивающие системы с большим количеством отверстий, из плазменных эмиттеров можно извлекать токи силой до тысяч ампер.

К установкам ЭЛО материалов в вакууме относятся устройства для зонного переплава (очистки), выращивания монокристаллов, легирования полупроводников, сварки, нагрева с целью модифицирования структуры, испарения и для размерной обработки.

В промышленности эксплуатируются плавильные установки с различными узлами для создания мощного электронного пучка кольцевыми катодами, радиальными электронными излучателями и аксиальными пушками. В них подлежащий плавке металл вводится в вакуумную камеру с давлением порядка 10^{-2} — 10^{-3} Па, расплавляется электронным потоком и

каплями стекает в водоохлаждаемый кристаллизатор, где кристаллизуемый слиток постепенно вытягивается из камеры.

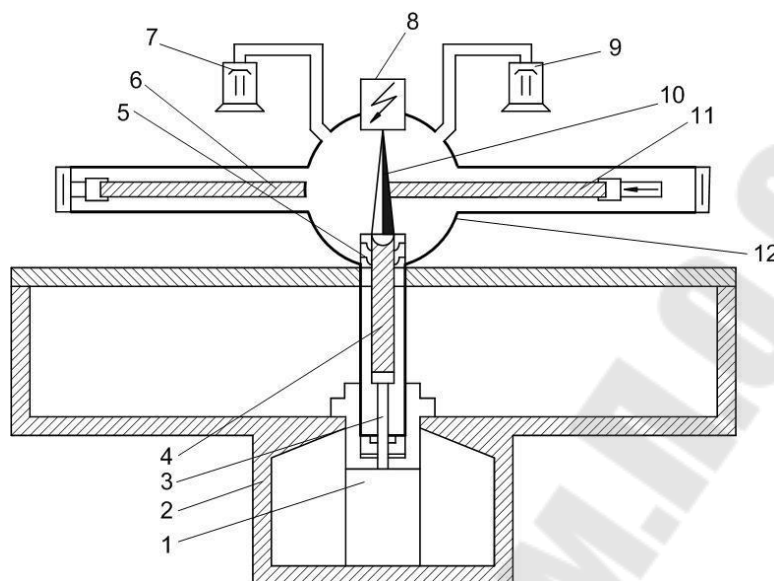


Рис. 7.2.4. Схема электроннолучевой установки для вакуумного переплава металлов: **1**- привод перемещения слитка; **2**- корпус; **3**- подвижный шток; **4**- переплавленный слиток; **5**- кристаллизатор; **6**- резервный металл для переплавки; **7,9**- насосы; **8**- электронная пушка; **10**- электронный луч; **11**- переплавляемый металл; **12**- вакуумная камера

Наибольшее распространение для выполнения термических процессов получили установки с аксиальными пушками. Возможность отдельной откачки их объемов до высокого вакуума, удаленность эмиттера электронов от зоны обработки и применение систем сканирования лучом позволяют выполнять операции при высоких ускоряющих напряжениях и больших удельных мощностях. Такая установка изображена на рис. 7.2.4.

Электроннолучевая сварка осуществляется путем образования локализованного расплава на стыке двух материалов или деталей с последующим его затвердеванием и образованием неразъемного соединения. Это единственный вид сварки, позволяющий осуществить практически все виды сварных швов, при этом в изделиях меньше проявляются термические напряжения и коробление. Глубина швов может значительно превосходить их ширину, составляющую в ряде случаев единицы микрометров. Однако проведение высококачественной электроннолучевой сварки требует точной подгонки кромок деталей свариваемого изделия.

Для сварочных процессов используют пушки небольшой мощности, обычно 1—3 кВт, хотя имеются и установки мощностью 250 и 1000 кВт для сварки легированных сталей толщиной 150...200 мм, обеспечивающие высокие скорости процесса и соотношение глубины шва к его ширине 25:1.

Зона термического влияния шва при этом в 40 раз меньше, чем при многопроходной дуговой сварке под слоем флюса.

Нанесение покрытий методом ЭЛО осуществляется путем испарения материалов. Различают их по способу испарения: с использованием водоохлаждаемого тигля, автотигельные, бестигельные с испарением металла с поверхности свободно висящей капли (капельный анод). Возможно, испарение одновременно из нескольких тиглей, расплавы в которых находятся при разных температурах.

Устройство распыления должно обеспечивать равномерное распределение плотности конденсирующихся паров с целью получения пленок равных толщин на значительных площадях. При этом концентрация загрязнений в конденсате должна быть минимальной.

Простота управления электронным пучком во времени и пространстве позволяет точно дозировать количество энергии, подводимой к расплаву.

Следовательно, прямой нагрев поверхности испаряемого материала таким пучком открывает широкие возможности регулирования скорости испарения и распределения плотности парового потока в пространстве перед мишенью.

Электроннолучевой испаритель (рис. 7.2.5) состоит из трех основных частей: электронной пушки, отклоняющей системы и водоохлаждаемого тигля.

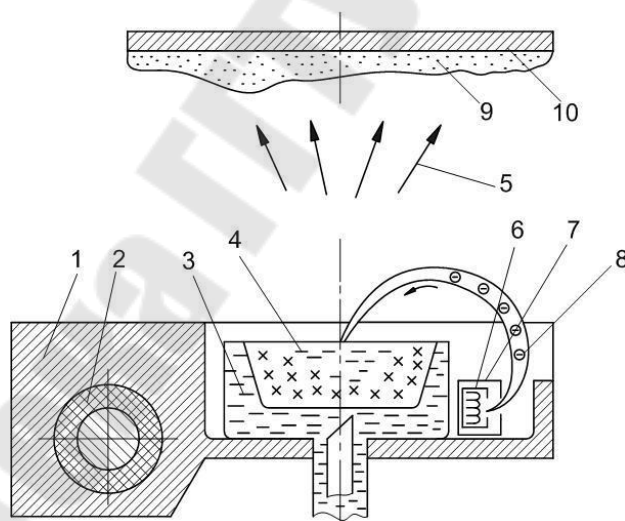


Рис. 7.2.5. Электроннолучевой испаритель:

- 1** - полюсный наконечник; **2** – электромагнит; **3** - водоохлаждаемый тигель;
4 - испаряемый материал; **5** - поток наносимого материала;
6- термокатод; **7** - фокусирующая система; **8** - электронный луч;
9- покрытие; **10**- подложка

Отклоняющая система предназначена для создания магнитного поля, перпендикулярного направлению скорости движения электронов, выходящих из фокусирующей системы пушки, и состоит из полюсных

наконечников **1** и электромагнита **2**. Между полюсными наконечниками расположены водоохлаждаемый тигель **3** и электронная пушка. Отклоняя электронный луч магнитным полем, его направляют в центральную часть водоохлаждаемого тигля **3**. В месте падения луча создается локальная зона испарения вещества из жидкой фазы. Нагретый электронной бомбардировкой материал **4** испаряется, и поток паров **5** осаждается в виде тонкой пленки **9** на подложке **10**. Изменяя ток в катушке электромагнита **2**, можно сканировать лучом вдоль тигля, что предотвращает образование "кратера" в испаряемом материале

Лазерная технология основана на том, что монохроматическое высококонцентрированное излучение, генерируемое оптическим квантовым генератором (ОКГ), направляется оптической системой на обрабатываемое изделие. В зоне локализации излучения возникают высокие температура и давление, приводящие к испарению и эвакуации материала из зоны обработки. Диаметр светового пятна можно изменять от единицы до нескольких сотен микрон. Обработка может осуществляться в воздухе и вакууме как в импульсных, так и непрерывном режимах. В первом случае используются твердосплавные ОКГ, во втором – газовые. С помощью лазерного луча могут быть получены отверстия, прорезы и щели диаметром или шириной 0,01...1 мм при глубине до нескольких миллиметров.

Лазерный луч формируется и концентрируется на обрабатываемом изделии, вызывая нагрев, плавление, испарение или взрывное разрушение материала (рис. 7.2.6).

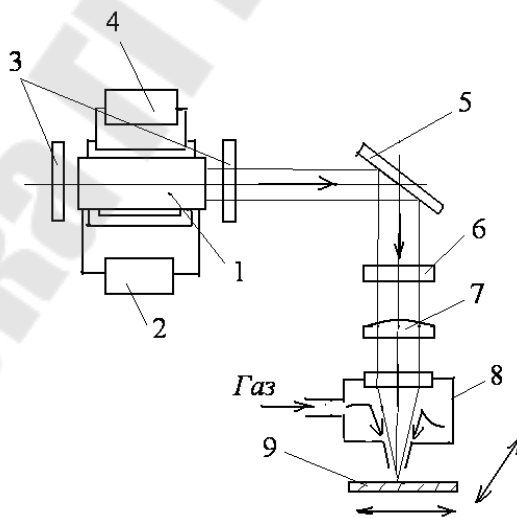


Рис. 7.2.6. Схема лазерной обработки: **1**- активная среда; **2** – система накачки активной среды; **3** – резонатор; **4** – система охлаждения; **5** – зеркало; **6** – заслонка; **7** – фокусирующая система; **8** – система подачи газа; **9** – обрабатываемая деталь

В зоне излучения **1, 2** форма и диаметр светового пятна изменяются (от системы отражателей и зеркал **3, 5, 6, 7**) от единиц до сотен

микрометров, и, в зависимости от температуры, благодаря системе охлаждения **4** и давлению **2**, развиваемому на поверхности материала изделия **9**, возможны исполнения вариаций различных видов лазерной обработки (прошивка отверстий, резание, сварка, термообработка и т.п.).

В зависимости от диаметра отверстий и их глубины производительность может меняться от 5 до 500 отверстий в минуту.

Лазерная обработка применяется преимущественно для изготовления отверстий в алмазных волокнах, металлических диафрагмах приборов и др.

За последнее десятилетие в технологии лазерной микрообработки произошли усовершенствования. Появился широкий спектр лазерных источников, имеющих различные длины волны, длительности импульса, энергии и частоты импульсов. Появились генераторы, способные создавать сверхкороткие импульсы: наносекундной (10–9 с), пикосекундной (10–12 с) и фемтосекундной (10–15 с) длительности. Именно такие импульсы показывают высокую эффективность при микрообработке. Наибольшее распространение пока получили генераторы наносекундных импульсов.

Наносекундные лазеры применяются для текстурирования жестких дисков и печатных плат, маркировки кремниевых пластин, создания микросхем методом стереолитографии (SLA-технология), прошивки отверстий в топливных форсунках.

Преимущество лазерной обработки короткими импульсами заключается в контролируемом разрушении при разумной скорости обработки. Другим несомненным преимуществом является возможность обработки материалов независимо от их электропроводности.

Например, обработка керамики: взаимодействие твердой керамики с высокоинтенсивными наносекундными импульсами сильно отличается от взаимодействия с металлами. Лазерная обработка керамики является сложной задачей из-за большого рассеяния светового потока. Порог абляции выше, чем в металлах в 2...10 раз. Сочетание короткого импульса и короткой длины волны имеет лучшие показатели обработки, при этом в таких керамических материалах, как глинозем и нитрид кремния, не наблюдается следов плавления после их обработки. Хотя керамика склонна к образованию трещин от термических напряжений, этого эффекта можно избежать путем выбора оптимальных режимов обработки, сохраняя температуру материала на низком уровне. Чаще всего это достигается за счет исключения возможности образования интенсивной плазмы. Время воздействия этой плазмы на материал больше, чем воздействие лазерного импульса. При более длительных импульсах (микро- и миллисекунды) механизм разрушения материала включает процесс плавления. Поэтому использование режима плавление — разрезание материала сочетают с воздействием газовой струи высокого давления. Этот метод характеризуется

высокими скоростями обработки, но оставляет остекленный слой, который является источником микротрещин.

На рис. 7.2.7 показан пример прошивки массива отверстий диаметром 40 ± 1 мкм высокой плотности в глиноземе (алюмокерамике) толщиной 250 мкм с шагом 60 мкм. Прошивка осуществлялась импульсами в 20 нс лазером на парах меди мощностью 3 Вт с частотой импульсов 10 кГц. Этот тип лазера демонстрирует способность создавать массивы отверстий высокой плотности в керамике без трещин. Подобные массивы отверстий в керамических материалах используются в платах для тестовых полупроводниковых датчиков.

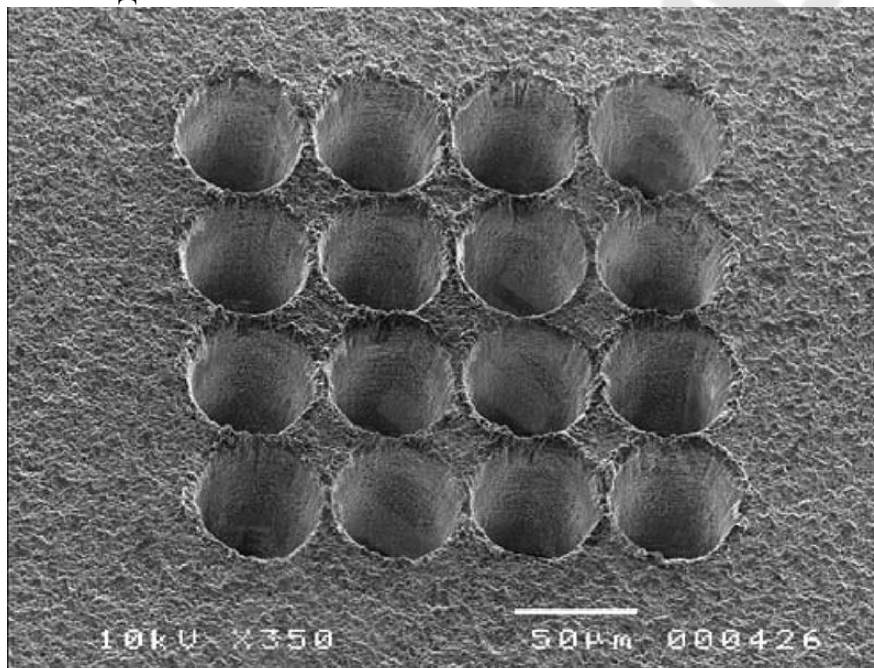


Рис. 7.2.7. Пример прошивки массива отверстий диаметром 40 ± 1 мкм высокой плотности в глиноземе (алюмокерамике).

Метод прямого воздействия лазерным лучом является гибким инструментом для микрообработки. Деталь, демонстрирующая возможности лазерного сверления и фрезерования, представлена на рис. 7.2.8. Она была изготовлена из пластины глинозема толщиной 0,3 мм и обработана за одну операцию. Фаски величиной 45° вдоль края были обработаны с контролем глубины абляции путем регулировки количества подаваемых импульсов.

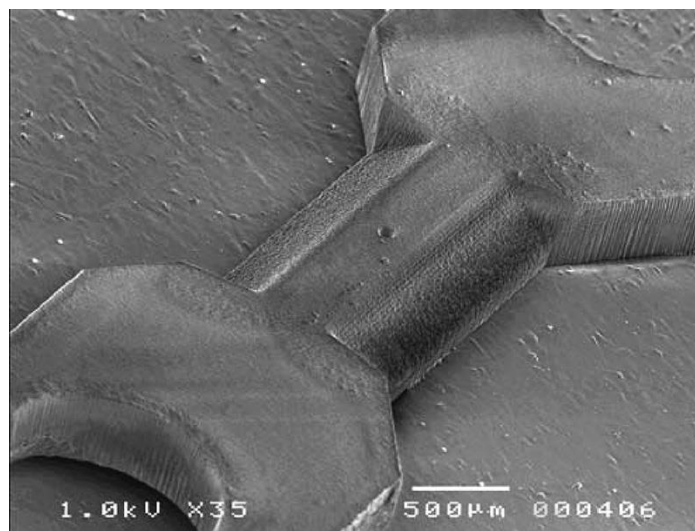


Рис. 7.2.8. Деталь, демонстрирующая возможности лазерного сверления и фрезерования

Одним из недостатков лазерной прошивки отверстий является конусность. В результате исследований определили оптимальные режимы прошивки отверстий в пластине из оксида циркония для достижения минимальной величины конусности и зоны термического воздействия. Конусность и зона термического воздействия увеличиваются с увеличением тока лампы по линейной зависимости. Оптимальные значения были достигнуты при минимальном значении тока в 17А. Минимальная конусность, т. е. отношение диаметра отверстия на входе к диаметру отверстия на выходе, составляет 0,04. При увеличении или уменьшении частоты импульсов конусность увеличивается.

Плазменную обработку металлов осуществляют с помощью струи плазмы. Сжатая электрическая газовая дуга обдувается, формируется плазменный поток. Дуга прогревается и становится ионизированной, то есть возникают частицы, имеющие положительный и отрицательный заряд. Как правило, температура на поверхности потока плазмы составляет 15000 градусов по Цельсию.

Плазменная очистка — это процесс удаления всех органических веществ с поверхности образца с помощью ионизированного газа, называемого плазмой. Обычно она выполняется в вакуумной камере с использованием кислорода, аргона или даже воздуха. Плазменные технологии уже более 30 лет являются важным инструментом в производстве микроэлектронных устройств.

Плазма содержит положительные ионы, электроны, атомы или молекулы нейтрального газа, УФ-излучение, а также возбужденные газовые атомы и молекулы, которые могут переносить большое количество внутренней энергии. Выбирая газовую смесь, мощность, давление и т. д., возможно точно настроить или определить влияние плазмы на поверхность.

Данные свойства плазмы активно используются для изменения свойств поверхности материалов с целью улучшения соединения, склеивания, окраски, нанесения покрытий. Обработывая детали с помощью плазмы, мы очищаем и активируем поверхность, улучшая ее адгезионные характеристики. С помощью можно легко обрабатывать термочувствительные материалы.

Плазменная обработка поверхности модифицирует свойства поверхности без изменения свойств самого материала: можно создать гидрофобную, гидрофильную поверхность, поверхность с необходимыми свойствами. Данные процессы возможны в результате формирования на поверхности объекта слоев «плёнки» с определенными химическими свойствами. Выбирая правильные параметры обработки, можно сделать: плазменную очистку, плазменную активацию поверхности, плазменное осаждение, плазменное травление.

Плазма обладает рядом уникальных свойств, которые привели к ее широкому применению при производстве различных материалов:

1. возможность обрабатывать сложные 3D-объекты и микроканалы;
2. возможность обрабатывать проводники, полупроводники и изоляторы и пр.;
3. экологически чистая технология, без отходов химикатов;
4. гибкая настройка «настройка» процесса для придания поверхности специфических свойств;
5. способность обрабатывать чувствительные к температуре материалы;
6. низкая стоимость обработки;
7. возможность производить продукцию с высокой добавленной стоимостью по отношению к продукту и др.
8. особенности процессов плазменной обработки металлов. Для начала следует отметить, что плазменную резку в зависимости от способа обработки подразделяют на поверхностную и разделительную. Поверхностный способ не получил широкого распространения.

В производстве чаще всего прибегают к разделительной технологии. Для резки поверхностным методом потребуются плазменная дуга и струя. В первом случае металл подсоединяется к электрической цепи. При работе по второму варианту дуга образуется между электродами. При этом сам лист к электрической цепочке не присоединяется.

Производительность резки плазмой значительно превышает производительность кислородной резки. Тем не менее, для резки титановых и остальных деталей с большой толщиной рекомендуют остановиться на резке с использованием кислорода.

Для цветных металлов, а в особенности алюминия, обязательна плазменная резка. Плазменная обработка объективно менее опасна для человека (не используется сжатый кислород или горючий газ) и окружающей среды.

Кроме того, только эта технология позволяет выполнять фигурную резку металла. Одну и ту же работу техникой плазменной обработки металла в сравнении с газовой резкой выполняют быстрее.

Плазма образуется из активных (кислород) и неактивных (водород, азот и другие) газов. С помощью активных газов можно вырезать черные металлы (медь, сталь, алюминий). Неактивные газы применяют в случаях, когда требуется произвести нарезку цветных металлов.

В целях облегчения процесса резки металлов были разработаны полуавтоматы, а также мобильные инструменты. Весь ассортимент современного оборудования для плазменной обработки металлов можно увидеть на выставочной экспозиции. Переносные машины нуждаются в сжатом воздухе, а полуавтомату требуется газ.

Особенности плазменной обработки поверхности.

Плазменная обработка поверхности металлов – разделительная и поверхностная резка, нанесение покрытий, наплавка и сварка, для которых применяется ионизированный газ. Получают данное агрегатное состояние вещества изотермическим нагревом аргона, водорода, азота или кислорода.

Температура перехода газа в плазму 5 тыс. К, при этом разрушается внешняя оболочка атомов, и освобождаются электроны, ионизируя среду.

Плазменная обработка поверхности – обязательная составляющая подготовительных процессов перед ультразвуковой сваркой, которая влияет на:

- прочность шва;
- соединение с адгезивами и компаундами;
- качество последующих этапов технологического цикла.

Основной фактор, влияющий на эксплуатационные характеристики выпускаемого продукта, – прочность соединительного шва.

Допустимые значения данного показателя обеспечивают 4-ре компонента:

- характеристики соединяемых материалов;
- диаметр проводника;
- выбранный режим сварки;
- чистота поверхности.

Обработка загрязненного материала (с неорганическими включениями или органическими следами фоторезиста или жиров) в серийном производстве становится причиной регулярных сбоев в работе оборудования и недостаточной надежности соединения.

Плазменная обработка поверхности или очистка применяется с целью предотвращения:

1. *отслоения приваренного контактного вывода.* Данная проблема особенно актуальна для УЗ-сварки золотых контактов, когда никель мигрирует из нижнего слоя наружу через тонкую оболочку Au и препятствует процессу соединения.

2. *вырождение контакта.* Кроме более активных металлов, снижают стойкость шва газовые включения – пустоты и фтористые соединения.

3. *образования окислов.* Алюминий и медь окисляются в атмосфере и без плазменной обработки не поддаются УЗ-сварке или образуют слабое соединение.

Чистка ионизированным газом модифицирует поверхность, в частности корректирует химический состав, коэффициенты гидрофильности и адгезии, оставляя первичными объемные характеристики. Изменения материала зависят от применяемого газа (Ar, O₂, NO, NH₃).

Кислород убивает органику, но неприменим для активных металлов, которые разрушаются при контакте с плазмой.

Ионизированный аргон ликвидирует механические загрязнения и укрупняет фактуру, что положительно отражается на надежности интерметаллического соединения.

Чаще всего на производстве применяют смесь из данных газов. На примере изображен контакт после плазменной обработки Ar/O₂ (90%/10%), который позволил повысить значение усилия на отрыв с 4-х до 10 гр.

Преимущества применения плазменной обработки поверхности.

Рентабельность закупки оборудования плазменной очистки для предприятий, на которых ультразвуковая сварка, – часть технологического процесса (выпуск светодиодных модулей, микросхем) – экономически обоснована:

- предотвращается неприварка и подъем шва;
- сокращение количества ослабленных контактов;
- минимальный и усредненный показатель прочности шва повышается;
- уменьшение мощности сварочного оборудования от 10%, без влияния на итоговое качество соединения.

Этап создания проволочных выводов – не единственный, требующий предварительной плазменной очистки.

Flip-chip-контакты закрепляются адгезивом, так же, как и стандартные микросхемы покрываются аналогичными составами перед установкой кремниевого кристалла.

Заливочные компаунды используются для герметизации и нанесения люминофора в светодиодах.

Методы электрохимической обработки используются для поверхностной обработки материалов.

Электролитическое полирование. Электрохимполировка – это процесс, с помощью которого вы можете производить полировку металлической поверхности. Думать о замене механической очистки этим процессом неправильно: эта технология может быть использована как процесс финишной обработки для маленьких изделий нерегулярных и сложных форм. Полировка может представлять собой отличную опору для производства, поскольку она определяет кристаллическую структуру, подходящую для сварки, наиболее эффективным способом работы решетчатых сил. С этой точки зрения процесс называется "глянцевое травление". Как и все анодные процессы, электрохимическое полирование тесно связано со структурой на основе металла. Если в нем присутствуют дефекты и примеси, эффект электролитической полировки может иметь пятна, ямочки и каверны.

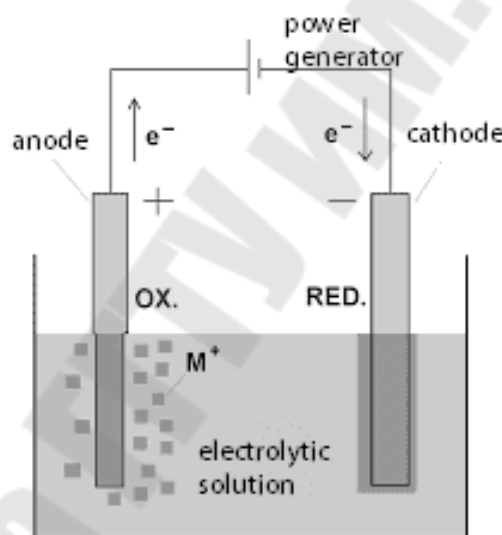


Рис. 7.2.9. Электролизер для полировки сталей

Электролизер, показанный на рис. 7.2.9, объясняет, как происходит процесс электрополировки. Изделие из нержавеющей стали, используемое для получения зеркальной поверхности, определяется анодом, при этом катодом может быть такой металл, как свинец, медь и т. д. Во время процесса благодаря прохождению тока в определенных электролитических растворах происходит селективное анодное растворение по поверхности из нержавеющей стали, которая постепенно становится более гладкой.

Параметры, регулирующие процесс электрополировки (рис. 7.2.10):

- плотность тока;
- вольтаж;
- тип электролитического раствора;
- температура;
- перемешивание жидкости;

- катодный материал;
- размер и форма электродов;
- расстояние между анодом и катодом;
- расположение изделий.

Все эти параметры влияют на срок службы и внешний вид поверхности нержавеющей стали. Например, температура должна поддерживаться постоянной, а перемешивание должно быть таким, чтобы не вызывать локальный нагрев.

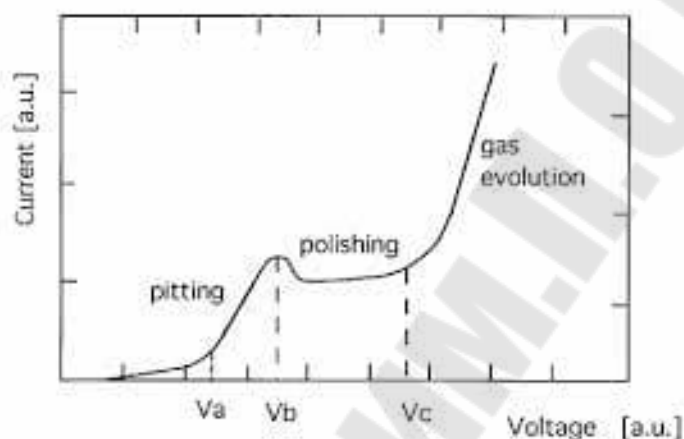


Рис. 7.2.10. Электрические параметры электрополировки

Как видно на рис. 7.2.10, для достижения правильной электрополировки электрические параметры должны совпадать в диапазоне V_c - V_b . При более низких значениях напряжения они вызывают анодную коррозию, детали обычно становятся непрозрачными и подвергаются коррозии. При более высоких значениях, чем V_c , образуются газообразные вещества, которые изменяют процесс растворения и вызывают нерегулярное воздействие на поверхность металла. Кривая, о которой идет речь, изменяется в зависимости от удельного сопротивления раствора электролита. Чем выше удельное сопротивление, тем больше полирующая прямая часть (полировка) будет плотной, пока она не уменьшится до точки. Технология CLINOX и INVERTER. Наилучшие результаты следует поддерживать при четко определенных соотношениях плотности тока и напряжения. Это соотношение определяется в наших установках CLINOX, которые благодаря инверторной технологии позволяют контролировать электрические параметры, повышая электрическую эффективность и надежность процесса. Агитация не всегда принята. Она часто используется для предотвращения неконтролируемого нагрева и локальной турбулентности в электролитической ванне с высоким удельным сопротивлением. Перемешивание не должно быть слишком интенсивным и может быть реализовано с использованием пассивного материала или путем инсuffляции воздуха или азота. "Срок полезного использования"

электролита довольно ограничен. Когда в ванне появляется определенное количество ионов металлов, ее полирующий эффект уменьшается или исчезает. Так что прибегают к частичной или полной замене отработанной жидкости. Обычно продолжительность процесса включает удаление 0,5-2 мкм металла в зависимости от состояния поверхности. Такое удаление предполагает использование веществ, которые быстро растворяют в ванне продукты анодного воздействия. Среди наиболее эффективных веществ, следует выделить фосфорную и серную кислоту – вещества, которые содержатся в нашем электролите для электрополировки E-polishing Bomar. Материал катода может быть изготовлен из свинца, меди или углеродного волокна. Электролит используется в ванне для электрополировки E-polishing Vox, чтобы обеспечить более длительный срок службы электродов и уменьшить электрические рассеяния. Расстояние между анодом (механическая часть) и катодом (углеродное волокно) может варьироваться от 1 до 15 см и во время процесса поддерживается постоянным; уменьшение расстояния увеличивает ионный обмен и уменьшает время электрополировки. Кроме того, очень важен идеальный контакт электродов с соответствующими шинами, в противном случае могут возникнуть вторичные электрические воздействия внутри дефектных точек контакта. Электрохимическая полировка нержавеющей используется для обеспечения оптимального сочетания эстетической красоты и очень высоких значений пассивации. Если нержавеющая сталь была электрополирована, то поверхность свободна от примесей железа и имеет очень низкую шероховатость. В этих условиях нержавеющая сталь полна чистого хрома на поверхности. Хром связывается с кислородом, присутствующим в окружающей среде, создавая "пассивный" слой, который позволяет значительно замедлить процесс коррозии.

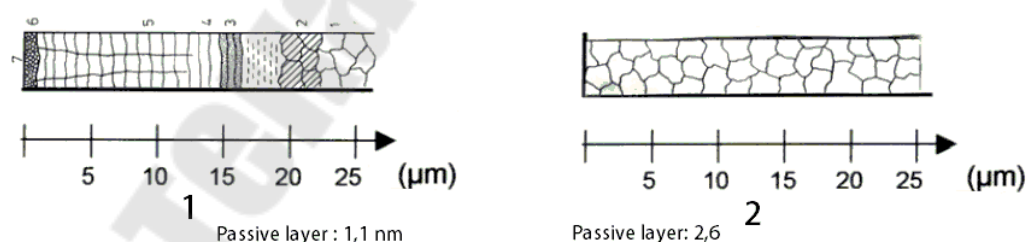


Рис. 7.2.11. Микроструктура поверхности после: **1** - механической очистки, **2** – микроструктура - после электролитического полирования.

Как видно на рис. 7.2.11, микроструктура 1 создается после механической очистки, она проявляется различными слоями ферритов (номера 2,) и слоями аустенита (номера 1) различной морфологии, поскольку они были деформированы после механического процесса. Микроструктура 2 образуется после электролитической очистки, она выглядит однородной, с зернами того же размера и с той же аустенитной

природой. Толщина пассивного слоя сильно варьируется в зависимости от типа микроструктуры. Толщина механически полированного образца (1) ниже, чем у электрополированного образца (2), поскольку он загрязнен посторонними частицами (остатками абразива и примесями), которые препятствуют образованию однородного слоя оксида хрома.

Анодирование— процесс создания оксидной плёнки на поверхности некоторых металлов и сплавов путём их анодной поляризации в проводящей среде. Существуют различные виды анодирования, в том числе электрохимическое анодирование — процесс получения оксидного покрытия на поверхности различных металлов (Al, Mg, Ti, Ta, Zr, Hf и др.) и сплавов (алюминиевых, магниевых, титановых) в среде электролита, водного или неводного.

Например, при анодировании алюминиевых сплавов деталь погружают в кислый электролит (водный раствор H_2SO_4) и соединяют с положительным полюсом источника тока. Однако, сильно упрощённые представления о том, что выделяющийся при этом кислород взаимодействует с алюминием, образуя на его поверхности оксидную плёнку — мало соответствуют реальному механизму электрохимического анодирования.

Созданные в результате анодирования анодные оксидные плёнки (АОП) могут иметь различное назначение, например, представлять собой защитные, декоративные покрытия. АОП служат также диэлектриком в оксидных (электролитических) конденсаторах.

Электрохимическое анодирование. Анодирование алюминия представлено на рис. 7.2.12.

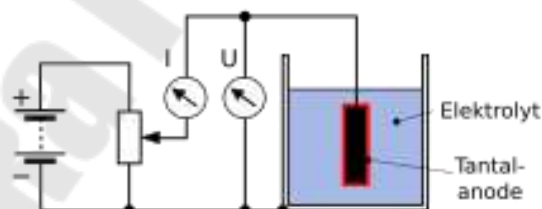


Рис. 7.2.12. Схема анодирования алюминия.

Анодные плёнки при анодировании алюминия в зависимости от их назначения делят на 3 группы:

1. тонкие барьерные пленки толщиной (0,1-1 мкм) формируются в электролитах, не растворяющих оксид, и находят применение при изготовлении электроизоляционных материалов.
2. плёнки средней толщины (1—50 мкм), используются для защиты сплавов алюминия от коррозии и при декоративной отделке изделий.
3. толстые плёнки (50—300 мкм) применяются для защиты поверхности от износа и истирания.

Анодная плёнка состоит из примыкающего к металлу тонкого барьерного слоя, и пористого наружного слоя. Толщина барьерного слоя определяется напряжением процесса, и при этом не зависит от плотности тока, слабо уменьшается с температурой, и несколько меняется при переходе от одного электролита к другому. Предельная толщина барьерного слоя 1,4 нм/В на чистом алюминии, на сплавах отличается. Для получения толстых плёнок анодирование проводят при охлаждении электролита до 0—5 С.

Наибольшее распространение для анодирования алюминиевых деталей получил сернокислый процесс. Алюминиевую деталь и свинцовый катод помещают в охлаждаемую ванну с раствором серной кислоты (плотность 1 200—1 300 г/л). Процесс протекает при плотностях тока 10—50 мА/см² детали (требуемое напряжение источника до 50—100 В). Температура электролита ключевым образом влияет на качество и естественный цвет оксидной плёнки и поддерживается в диапазоне –20 до +20°С. Оксидная плёнка при повышенных температурах бесцветная, тонкая и рыхлая, что позволяет окрашивать её практически любыми красителями. Пониженные температуры позволяют получить толстые плотные оксидные плёнки с естественной окраской (как правило, золотистых оттенков). При получении описанным способом анодный оксид алюминия получается пористым, поэтому после анодирования часто применяют дополнительные методы обработки с целью закупорить поры. Обычно деталь длительно обрабатывают паром или кипятят в воде.

Донорами кислорода в процессе анодного окисления алюминия выступают все кислородсодержащие ионы раствора: SO₄, HSO₄, PO₄³⁻, CrO₄, C₂O₄, CO₃, OH и другие, в том числе молекулы воды.

Качественно анодированные детали считаются хорошими изоляторами для напряжений до 100 В, при условии целостности оксидной плёнки, которая относительно нестойкая по отношению к грубым механическим воздействиям, к примеру, она может быть легко поцарапана острым металлическим предметом. Анодирование магния. Магний и его сплавы обладают низкой коррозионной стойкостью, поэтому их защищают анодными пленками оксида магния. Используются растворы, состоящие из бихромата или перманганата, хромового ангидрида или фторида и гидроксида натрия. Температура анодирования 20-80°С в зависимости от электролита, продолжительность 20-45 минут. Толщина плёнки составляет 5-25 мкм.

Анодирование меди. Электрохимическое оксидирование меди применяется в приборостроении и для декоративных целей. Электролиты содержат NaOH, для фосфористых бронз дополнительно вводят бихромат калия и молибдат аммония.

Анодирование титан. Электролиты для анодирования титана содержат серную кислоту с добавками для получения плёнок различной толщины.

Активация титана электролитом на основе винной кислоты и фтористого натрия перед оксидированием существенно повышает качество оксидных пленок и их функциональные свойства. Этот электролит обладает выравнивающими и полирующими свойствами, может применяться для снятия оксидноуглеродных слоев на титане и сплавах.

Пассивация – это процедура покрытия поверхности металла тонкой устойчивой к коррозии пленкой с целью защиты изделия. Такое покрытие предупреждает контакт металлической основы с кислородом и агрессивными средами. В условиях современного производства пассивирование применяется для того, чтобы придать металлу свойства, которые делают его похожим на благородный. После обработки он не поддается окислению и прочим, негативно воздействующим на него факторам.

Пассивация осуществляется при помощи специальных средств, которые именуются “пассиваторами”. Во время процедуры металлическое изделие обрабатывается таким средством, после чего оно становится неактивным. Непосредственно пассиватор – это своеобразное препятствие к образованию на поверхности металла коррозионного слоя

Процесс состоит из пяти основных этапов:

- подготовка изделия: ошкурить со всех сторон, промыть обезжиривателем;
- смешивается электролитический раствор с содержанием пассиватора металлов;
- подключаются контакты от постоянного источника тока к самому изделию и резервуару (необходимо убедиться, что напряжение достаточное и не чрезмерное);
- заготовка подвергается воздействию на протяжении расчетного времени;
- выполняется дополнительная постобработка, которая сопровождается контролем качества поверхности и равномерности нанесенной оксидной защиты.



Рис. 7.2.13. Оборудование для пассивации.

Механизм пассивации. Пассивация стали, железа и других металлов основана на методах, в основе которых лежит химическое взаимодействие поверхностного слоя металла с разными растворами прочих металлов. В итоге на поверхности образуется пассивирующий слой, обладающий новыми химико-физическими характеристиками. Такой слой формирует надежный барьер, препятствующий окислению, за счет чего создается надежная защита от ржавчины. Для химических реакций применяются различного рода металлы в зависимости от первичного материала детали. Чтобы придать ей новые специфические свойства, применяют следующие материалы для пассивации: хром, кобальт, никель и т. д. Исходя из их процентного содержания, готовится раствор и выбирается соответствующее оборудование. Оборудование для пассивации представлена на рисунке 7.2.13.

К примеру, чтобы создать на поверхности стали надежную антикоррозийную пленку, используют оксид хрома. Осуществляется процедура хромирования, вследствие чего полностью изменяются физико-химические свойства поверхности. Если обработка была проведена правильно, то слой будет ровным и плотным.

Помимо этого для проведения процедуры используют различные кислоты для пассивации. В большинстве случаев раствор создается на базе азотной кислоты. Защитная пленка с высокими защитными свойствами на поверхности стали создается при помощи солей этого вещества.

Применение пассивации металла. С помощью технологии пассивирования можно:

- улучшить проводимость тока в области электрического контакта;
- предотвратить развитие и дальнейшее распространение ржавчины на поверхности материала;
- защитить сварочные швы (и другие места новообразованных соединений) от разрушения;
- выполнять микротравление в соответствии с подготовленными шаблонами;
- выполнять финишную обработку, изменять декоративные свойства изделия.

Проверка пассивации. После проведения технологического процесса проводится оценка качества нанесенного слоя. Для этого используют разные способы проверки. К примеру, химический метод: поверхность обрабатывается раствором ферроцианида калия в азотной кислоте. Процедура дает возможность выявить области некачественной обработки. В области, где полученный слой довольно тонкий или его вовсе нет, появляется синий оттенок. В основном данный метод используют в заводских лабораториях. С его помощью выборочно проверяют изделия готовой партии.

Второй способ более простой, но является достаточно длительным. Изделие помещается в обычную воду на длительное время. В конечном итоге в области некачественной обработки появится коррозия. Виды пассивации

Химическое пассивирование. В процессе обработки применяются специальные химические реагенты. Нанесение пассивирующего слоя осуществляется методом окунания металла в наполненную раствором емкость или методом напыления. Ключевое преимущество такого способа – металл с покрытием Хим. Пас. становится более твердым.

«Металл Клинер» рекомендует к применению следующие средства для пассивации: Пассиватор для нержавеющей стали SteelGuard InoxPass Spray (метод погружения); Средство для восстановления пассивного слоя нержавеющей стали SteelGuard InoxPass (метод распыления).

Электрохимическая пассивация. Металл обрабатывается кислотными растворами, солями, на него наносятся электролиты. В процессе обработки используется ток. Электролит нагревается. На поверхности детали образуются заряженные частицы, после чего они постепенно оседают. После правильного проведения процедуры на материале образуется стойкая, равномерно распределенная защитная пленка. Подвергнувшись пассивации, изделие приобретает следующие положительные свойства:

1. создается слой, обладающий новыми химическими характеристиками;
2. улучшается товарный вид, увеличиваются потребительские свойства;
3. появляется блеск, внешний вид становится более эстетичным;
4. снижается антикоррозийная активность;
5. улучшаются физические характеристики поверхности материала;
6. повышается механическая прочность.

Пассивация нержавеющей стали. Такой вид обработки активно используется в области производства. Применение подхода такого рода обуславливается необходимостью тщательного обезжиривания поверхности изделия. При помощи этой технологии можно значительно увеличить защиту материала от внешних агрессивных факторов и длительность его эксплуатации (рис. 7.2.14) .

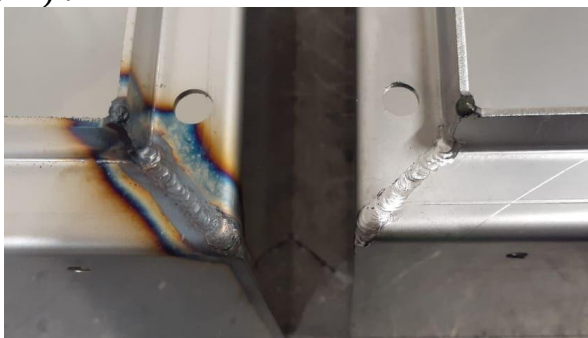


Рис. 7.2.14. Пассивация сварных швов нержавеющей стали

Нержавеющая сталь любого качества, даже самая высококачественная, может подвергнуться коррозии после сварки. Чаще всего коррозионные процессы на поверхности нержавеющей стали развиваются в районе сварных швов. Обработка сварных соединений, вследствие этого, становится одной из наиважнейших задач при работе с нержавеющей сталью.

Пассивацию сварных швов нержавеющей стали рекомендует производить с использованием аппаратов для очистки сварных швов Steelguard. Электрохимические установки легки в использовании и качественно обрабатывают шов, придавая ему «зеркальность». Последнее стало возможным благодаря тому, что в аппаратах предусмотрена возможность электрохимической полировки.

Пассивация меди. В процессе обработки используются специальные растворы хрома. На медном основании достаточно сложно создать плотную защитную пленку и именно за счет таких растворов это становится возможным. Образуется плотный защитный слой, который в дальнейшем не стирается.

Пассивация алюминия. На алюминиевом материале в естественных условиях под действием кислорода создается прочная оксидная пленка (рис. 7.2.15). Большинство вспомнят опыт школьных годов на уроке химии: алюминиевая проволока опускается в ртуть, после чего с нее счищается небольшой слой при помощи надфиля. Далее обработанный конец вынимается из емкости с ртутью, и он на воздухе моментально покрывается так называемой “шубой”. Однако при атмосферном воздействии оксид алюминия не может образоваться так быстро, при этом пленка прозрачная, а ее толщина не превышает нескольких миллимикрон (мкм).

Главный минус природной пленки заключается в том, что она неустойчива к длительному воздействию активных кислот и резкому повышению температуры.



Рис. 7.2.15. Пассивация алюминия

Чтобы обеспечить стойкую защиту на изделии из алюминия, необходимо пройти процедуру анодирования, вследствие которой получают защитные пленки (пассивный слой) толщиной 5-20 мкм. Некоторые режимы позволяют создать сверхпрочную пленку, которая способна выдерживать нагрузки в пределах 1500 кг на мм.

Пассивация серебра. Для защиты верхнего слоя серебра применяется обработка материала в хромпике, он же двуххромовокислый калий. Для этого 60 г вещества разводится с 1 л кипяченой воды. Температура полученного раствора должна быть в пределах 25-40 градусов. В процессе обработки серебряное изделие погружается в емкость с раствором на 30 минут. Раствор необходимо время от времени перемешивать. Если разведенного объема хромпика недостаточно для полного покрытия изделия (объемный серебряный канделябр и т. д.), то не следует практиковать попеременное обрабатывание его поверхности. Лучше всего развести реактив в необходимом для подходящего объема количестве воды.

Пассивация латуни. Пассивация латуни применяется для изделий, используемых при производстве оружия, в авиации, медицине. Хорошая устойчивость к коррозии и долговечность использования привлекает ювелиров и художников, а также светотехников. Популярностью пользуется пассивирование латуни с приданием деталям золотистого цвета. Такой метод взяли на вооружение рыбаки, которые таким образом пассивируют блесны из латуни. Образующаяся на рыболовной снасти пленка устойчива и не пропускает влагу.

Пассивация хрома. В большинстве случаев используется для обработки оцинкованных деталей. Металлические изделия проходят обработку такого типа только в условиях специализированного производства, которое имеет системы водоотвода и очистки.

Пассивация трубопроводов. Подробнее о химической очистке трубопроводов и её этапах (обезжиривании, травлении и пассивации) читайте в статье "Очистка трубопроводов" в разделе "Услуги".

Во избежание разрушения нержавеющей стали, необходимо обязательно пассивировать следующие конструкции:

- трубные (зачастую обрабатываются с помощью сварки);
- контактирующие с соленой водой (такие больше всего подвержены риску разрушения);
- с присутствием крепежей (здесь детали проходят механическую обработку).

Составы для пассивации. Каждый раствор – это добавки в сочетании с основным реагентом. Ключевую роль играют хроматы – это ангидрид, калий и натрий. Для создания подходящей среды необходимо смешать кислоты и соли – вместе они ускоряют течение реакции и способствуют равномерному осаждению полезных частиц.

Для обработки цветных металлов используются пассивирующие составы на основе натрия и калия. Чтобы создать кислую среду, к электролитам добавляют соли и кислоты, ускоряющие формирование защитной пленки и способствуют ее равномерному распределению по материалу.

Для пассивирования стали часто используются соль и азотная кислота. Медь обрабатывается серной кислотой, алюминий – фосфорной кислотой, а при пассивации цинка применяют добавки серной и азотной кислоты.

Гальванопластика — формообразование из цветного металла при помощи осаждения его из раствора (расплава) под действием электрического тока на матрице. Один из разделов гальванотехники. Применяется для получения металлических копий предметов методами электролиза. Этот термин может использоваться и в качестве названия металлических предметов, полученных методом гальванопластики. Толщина металлических осадков, наносимых при гальванопластике, варьируется от 0,25мм до 2мм.

Гальванопластика - техника получения точных металлических копий с форм путем электроосаждения. Точнее это гальванический способ формования изделий, в процессе которого металл, выделяющийся при электролизе, достигает толщин 0,25-2 мм и воспроизводит форму поверхности, на которой осаждается. В результате покрытие становится самим изделием.

В настоящее время в гальванопластике применяют: Cu, Ni, Ni-Co, Ni-Fe, Ni-Si, Ni-W, Fe, Pb, Cr, Au, Ag. Из расплавленных солей создают гальванопластические копии с применением тугоплавких металлов: Re, W, Mo.

Частным случаем гальванопластики является электролитическое формование. Разница между этими процессами в том, что в гальванопластике форма отделяется от копии или разрушается, а в электроформинге - остается внутри.

Важными аспектами в процессе гальванопластического формирования изделий играет подготовка поверхности используемой формы, создание на ней токопроводящего и/или разделительного слоя.

Гальванопластику создал русский ученый Борис Семенович Якоби в 1836 г. При опытах с элементами Даниеля, Якоби "...увидел несколько почти микроскопических царапин напильника, точно соответствующих друг другу: вогнутые на поверхности цилиндра и рельефные - на поверхности отдельного листочка. Гальванопластика явилась следствием этого тщательного исследования".

Увидев такое интересное явление, Якоби сразу же начал поиск его технического применения. 5 декабря 1838 г. на заседании Академии наук был прочитан доклад Якоби об изобретении техники гальванопластики и продемонстрированы образцы гальванопластических копий гравированных печатных форм.

Преимущества гальванопластики как метода формования:

- высокая точность воспроизведения микро- и макрогеометрического сложного рельефа поверхности, на которую производится электроосаждение металла;

- низкая стоимость оснастки и оборудования, что позволяет часто менять конструкцию деталей;

- многократное использование моделей для наращивания;

- тождественность деталей, снимаемых с одной модели;

- в условиях многосерийного производства возможность одновременно изготавливать большое количество деталей, которое определяется размерами ванн и мощностью источников тока;

- получение комбинированных деталей, как из различных металлов, так и неметаллов;

- малые затраты труда по сравнению с такими методами формообразования, как литье, штамповка, механическая обработка.

Недостатки гальванопластики:

- ограничения в перечне используемых металлов и сплавов;

- относительно невысокая скорость осаждения;

Неравномерность распределения электролитических осадков по рельефной поверхности, что влечёт за собой увеличения стадий механической обработки.

Область применения гальванопластики очень обширна: бесшовные трубы, волноводы, сильфоны, гильзы с кумулятивным зарядом, художественные изделия, компоненты для исследований в области термоядерного синтеза и ядерной энергии, датчики шероховатости поверхности, золотые коронки и мосты для стоматологии, калибровочные шкалы для электронной микроскопии, корпуса для слуховых аппаратов, микроустройства для электронного, микромеханического применения и многое другое.

Технология гальванопластики. Процесс изготовления детали методом гальванопластики состоит из нескольких этапов. К ним относятся: изготовление форм (металлические, неметаллические и комбинированные); подготовка и нанесение проводящего слоя на неметаллические формы, в случае металлической формы – нанесение разделительного слоя на неё; электроформование – электроосаждение толстого слоя металла или сплава, отделение готового изделия от формы.

Прежде чем рассмотреть каждый из этих этапов, рассмотрим несколько понятий, используемых в гальванопластике.

Форма – специально созданный, спроектированный и изготовленный образец для снятия с него копии с помощью использования технологии гальванопластики.

Копия – является заготовкой, полученной на стадии электроформования. Копия повторяет поверхность и рельеф формы,

отделяется от формы и механически обрабатывается, после чего может использоваться в качестве изделия или составной части изделия.

Изготовление формы. Правильно выполненная форма оказывает огромное влияние на получаемое изделие, так как форма определяет точность, размер, конфигурацию и чистоту поверхности конечного изделия. Материалы, применяемые для изготовления форм могут быть различными: металлы (медь, сталь, алюминий, цирконий, свинец, титан и др.), неметаллы (пластмассы, дерево, гипс, стекло, воск, пенопласт и др.). Формы можно классифицировать по материалу исполнения: металлические, неметаллические, комбинированные. А также по времени использования: многократного использования (неразрушимые) и однократного использования (растворимые, выжигаемые, выплавляемые).

Важное требование, предъявляемое к формам: они не должны разрушаться, терять свой первоначальный вид под действием всех условий процесса электроформования, небольших механических воздействий.

Формы могут быть сплошными (неразборными) или составные (из нескольких частей). Конструкция формы должна обеспечивать легкость отделения копии от формы, без повреждения копии.

Создание токопроводящего слоя на неметаллические формы.

Перед нанесением проводящего слоя необходимо провести подготовку поверхности (механическая обработка, травление, обезжиривание). Выбор того или иного метода подготовки поверхности зависит от природы, используемого материала формы и от типа загрязнения.

После этапов подготовки поверхности необходимо нанести проводящий слой (для материалов, не проводящих электрический ток). То есть важным условием является электропроводящая поверхность материала.

Для нанесения проводящего слоя имеется несколько способов:

- механический способ – напыление (металлического порошка, графита); нанесение покрытий, проводящих электрический ток, в которых содержатся порошки металлов или графита.

- химический способ – меднение; никелирование; кобальтирование; нанесение плёнок PbS, PbSe, CdS, оксидных пленок SnO₂, ZnO, PbO и др.

- термический способ – разложение в паровой фазе металлоорганических соединений.

- вакуумное напыление металлов.

Нанесение разделительного слоя на металлическую часть формы.

Разделительный слой наносится на металлическую форму. Основная особенность гальванопластики заключается именно в отделении копии от формы по разделительному слою. Поэтому данная операция является очень важной, ибо при нарушении разделительного слоя, плохом его качестве будет невозможно произвести точное копирование и соответственно может произойти повреждение оригинала.

Выбор разделительных слоев основывается на том, чтобы при наращивании копии не смогла самопроизвольно отделиться от формы и также не должны требоваться большие усилия для разделения копии и формы.

Разделительные слои могут быть неорганические (окислы, соли), а также органические (пленки, золи). Возможен процесс самопроизвольного образования оксидных разделительных слоев. Такое явление происходит на формах из титана, рения, никеля, нержавеющей стали, сплавов алюминия.

Затяжка и гальваническое наращивание. Выбор материала для изготовления копий опирается на несколько условий: требования, предъявляемые к механическим, физическим и химическим свойствам материала, а также с учетом экономической и технической целесообразности. В процессе электроосаждения толстых слоев, выбранные материалы должны сохранять электропроводимость, легко отделяться от формы, не искажать её, оставаться устойчивым в агрессивных средах, допускать механическую обработку.

Материалы, из которых изготавливаются копии: медь; никель; сплавы Ni-Co; Ni-Fe; Ni-Mn; композиционных покрытий на основе никеля, наполненных порошком вольфрама.

В гальванопластике важно учитывать несколько факторов при выборе электролита и режима электролиза. К этим факторам относятся: скорость процесса, возможность получения мелкозернистого осадка с малыми внутренними напряжениями, распределение осадка должно быть равномерным по толщине.

Чаще всего в промышленной гальванопластике применяются следующие электролиты: сульфатный электролит меднения, сульфаминовый или сульфатно-хлоридный электролит никелирования. Сульфаминовый электролит никелирования характеризуется высокой рассеивающей способностью, получением осадков с минимальными внутренними напряжениями и работой при высоких плотностях тока.

Отделение готового изделия от формы и финишные операции. В случае электроформинга отделения копии от формы не происходит и процесс на этом, в целом, заканчивается.

По завершению процесса электроформирования и перед отделением формы необходимой операцией является промывка формы. После чего при помощи механических усилий, гидравлического давления, путем нагрева нагревания, охлаждения, вакуумирования или подачи сжатого воздуха совершается отделение копии от формы. Так, например, легкоплавкие металлы выплавляют в горячем песке, а алюминиевые формы растворяют в щелочках или кислотах. К финишным операциям относятся полирование, функциональные покрытия, художественная обработка.

Применение гальванопластики в промышленности. Классификация применения гальванопластики в промышленности в основном сводится к рассмотрению гальванопластики по отраслям или по технологии изготовления, также отдельно выделяют инструменты, оснастку. Далее мной будут представлены примеры применения процесса гальванопластики в производстве конкретных деталей и изделий, наиболее интересных по моему мнению.

Изготовление бесшовных труб разного профиля и сложности. Процесс изготовления тонкостенных труб без шва методом гальванопластики был впервые реализован в России. И.М. Федоровский изготовил прямые, сложные гнутые трубы с отрезками разного диаметра и разной толщины стенок гальванопластическим способом. Его способ заключался в следующем: трубы изготавливались осаждением меди на катод, которым был вращающийся медный или железный стержень; плотность тока в процессе составляла от 2 до 6 А/дм²; вдоль стержня двигался агатовый камень, разглаживающий и уплотняющий осадок (процесс снятия трубы с формы не приводился).

Практически изготовление труб осуществляется множеством различных способов. Один из таких способов – осаждение металла производится на цилиндрической форме, горизонтально расположенной в ванне. Основания цилиндра покрываются изоляционной массой для того, чтобы на них не осаждалась медь. Деревянные оси формы помещают в стеклянные подшипники, и цилиндру сообщается вращательное движение. Скорость вращения - 40 об/мин., плотность тока 1,2 – 1,5 А/дм². Медные аноды расположены на дне ванны. Труба с толщиной стенок 3,2 мм растёт 144 часа. По завершению процесса труба вместе с формой поступает на станок для развальцовки, а затем снимается.

Трубы Вентури (рис. 7.2.16) для измерения расхода жидкости готовят следующим образом.



Рис. 7.2.16. Трубка Вентури.

Трубы Вентури представляют собой сверху – формы, внизу – наращенная труба с припаянными фланцами и отводами

Первым шагом является изготовление формы из алюминиевого сплава. Их готовят механическим способом или литьем под давлением. Формы тщательно шлифуют, полируют, гляncуют, после чего её обезжиривают в органическом растворителе, затем в щелочном растворе, после чего промывают. Прежде чем повесить формы в ванну их необходимо

декапировать в смеси азотной и плавиковой кислот. Данный шаг необходим для снятия окисного слоя с поверхности алюминия, а это в свою очередь способствует улучшению сцепления и повышает скорость затяжки.

Затяжку алюминиевой формы необходимо проводить в ванне с небольшой концентрацией кислоты и высокой плотности тока. Когда формы полностью затянется, её переносят в ванну для наращивания. По окончании наращивания форму растворяют в концентрированном едком натре или соляной кислоте. Внутреннюю поверхность трубки покрывают тонким слоем серебра.

Производство волноводов. Волноводы – это электромагнитные системы, которые применяются для передачи электромагнитных волн от источника к приемнику (рис. 7.2.17). Они представляют собой трубы прямоугольного сечения, обычно выполненных из металла, внутри которых находится пространство, заполненное веществом (обычно воздушным пространством или диэлектриком). Электромагнитные волны распространяются внутри волноводов. Скорость распространения волн зависит от свойств волновода, поэтому можно использовать различные волноводы для передачи волн с разными длинами и частотами. Основное применение волноводов – это передача мощных высокочастотных сигналов в радиотехнике и телекоммуникациях. Технологический процесс изготовления волноводных элементов состоит из следующих основных операций: подготовка поверхности формы (обезжиривание, нанесение разделительного или «защитного» слоя), электроосаждение тонкого слоя золота или серебра, осаждение основного слоя меди (или никеля) толщиной 1,5-2,0 мм, извлечение формы из полученной копии.



Рис. 7.2.17. Фрагмент волновода

а : 1- генератор, 2- измерительные линии, 3- отрезок прямоугольного волновода, *б* - виды волноводов

Если необходимо получить прочную, но облегченную конструкцию, тогда используется процесс обволакивания электроосажденных металлических слоев пластмассой.

В производстве волноводов используются как постоянные формы, так и составные.

Материалы форм выбираются в зависимости от ситуации. Так если конфигурация волноводного узла не позволяет извлечь форму без её разрушения, то форму изготавливают из алюминия и его сплавов, а иногда и из цинковых сплавов. Формы из этих материалов удаляются путем растворения. Для изготовления постоянных форм широко используется коррозионно-стойкая сталь, которая позволяет без специальной подготовки легко отделить слой металла. Но она не всегда пригодна для изготовления форм, особенно малого сечения, в силу своей относительной мягкости, а также эта сталь уступает по механической прочности хромистым и инструментальным сталям. В производстве волноводных узлов чаще используются стали марок 40X13, 30X13, 20X13.

Для наращивания основных металлических слоев в волноводной технике чаще всего используются пирофосфатные и сульфатные электролиты меднения, а также сульфатные и сульфаматные электролиты никелирования. В случае изготовления каналов сложной конструкции рекомендуется осаждения никеля из цитратного электролита. Данный электролит обладает лучшей рассеивающей способностью, но он менее стабилен в работе по сравнению с сульфатным и сульфаматным, осаждение никеля в нем происходит с малой скоростью. При использовании форм из конструкционных сталей цитратный электролит не вызывает коррозии ($pH=7-8$).

Анодно-механическая обработка может использоваться при резке и чистовой обработке металлических деталей.

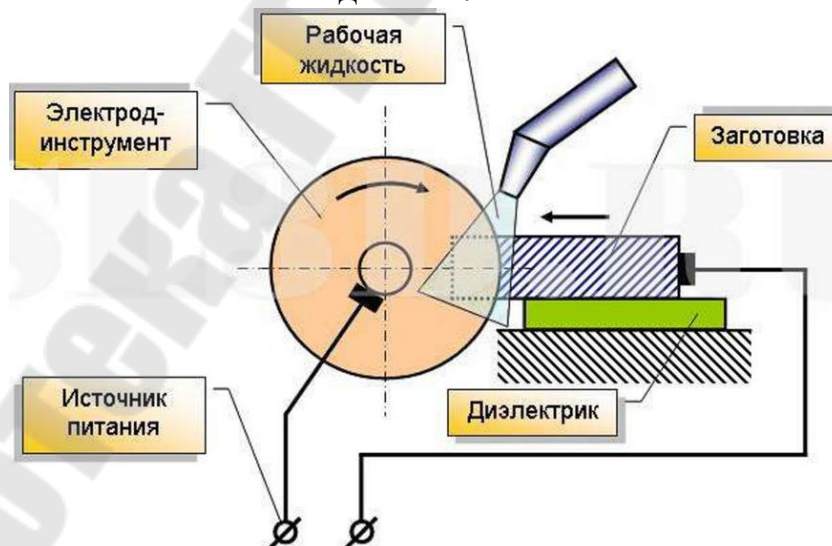


Рис. 7.2.18. Схема анодно-механической обработки

На рис. 7.2.18 представлена схема анодно-механической обработки. На рис. 7.2.19 схема обработки материала, где постоянный ток подводится к обрабатываемой детали **1** и режущему инструменту **2**, который с незначительным трением скользит по обрабатываемой поверхности.

На пиках шероховатости обрабатываемой детали при соприкосновении с инструментом возникает концентрация тока, что приводит к нагреву точек контактирования и их импульсному плавлению.

В зазор между деталью и инструментом подводится из сопла **3** специальная рабочая жидкость (разбавленное водой жидкое стекло), которая образует на поверхности детали пассивную пленку.

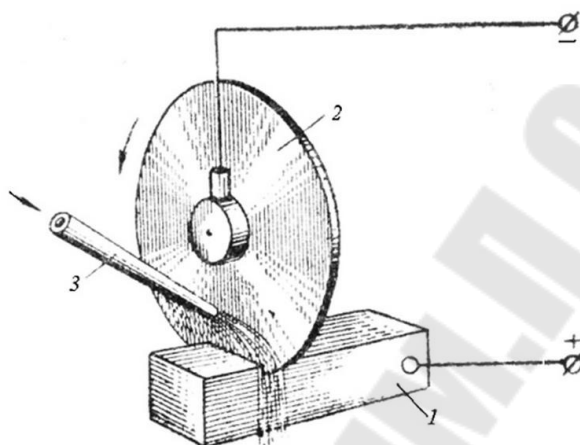


Рис. 7.2.19. Анодно-механическая обработка:
1 – обрабатываемая деталь; **2** – инструмент; **3** – сопло

Анодно-гидравлическая обработка. Анодно-гидравлическая обработка впервые была применена для извлечения из заготовки остатков застрявшего сломанного инструмента (рис. 7.2.20). Скорость анодного растворения зависит от расстояния между электродами: чем оно меньше, тем интенсивнее происходит растворение.

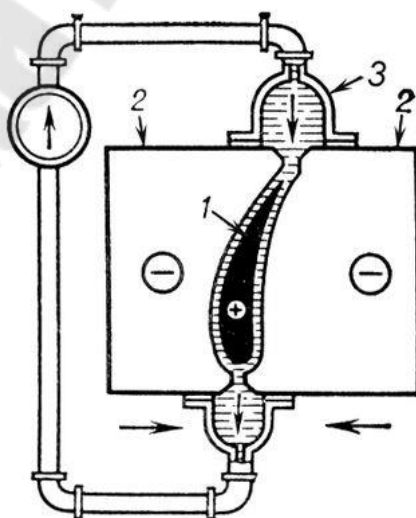


Рис. 7.2.20. Схема анодно-гидравлической обработки поверхности турбинной лопатки подвижными электродами: **1** — лопатка; **2** — электроды; **3** — электролит

Метод основан - при сближении электродов поверхность анода (заготовка) будет в точности повторять поверхность катода (инструмента). Однако процессу растворения мешают продукты электролиза, скапливающиеся в зоне обработки, и истощение электролита. Удаление продуктов растворения и обновление электролита осуществляются либо механическим способом (анодно-механическая обработка), либо прокачиванием электролита через зону обработки

Этим методом, подбирая электролит, можно обрабатывать практически любые токопроводящие материалы, обеспечивая высокую производительность в сочетании с высоким качеством поверхности. Используемые для анодно-гидравлической обработки электрохимические станки просты в обращении, используют низковольтное (до 24 в) электрооборудование. Однако значительные плотности тока (до 200 А/см²) требуют мощных источников тока, больших расходов электролита (иногда до 1/3 площади цехов занимают баки для электролита).

Электрохимические методы обработки (ЭХО) основаны на законах анодного растворения при электролизе. При прохождении постоянного электрического тока через электролит на поверхности заготовки, продукты электролиза переходят в раствор или удаляются механическим способом.

Область технологического использования электроэрозионной обработки. Электроэрозионная обработка в искровом режиме происходит при относительно малой энергии импульсов. Объем металла, удаленный за каждый импульс невелик, а глубина лунки незначительна. Такой режим позволяет получить при невысокой производительности поверхность с высокой точностью и малой шероховатостью. Кроме того, процесс весьма энергоемок. Энергоемкость оценивают отношением расхода электрической энергии к массе удаленного с заготовки металла. Энергоемкость при обработке на электроискровом режиме на порядок выше, чем при механической обработке на аналогичных операциях.

Обработка в электроимпульсном режиме характеризуется большей энергией разряда – высота неровностей увеличивается. За счет повышения энергии разряда достигается увеличение производительности, которая в 15-20 раз превышает аналогичный показатель при электроискровом режиме. Обработку в электроимпульсном режиме можно рекомендовать для замены фрезерования крупных полостей сложной формы, углублений, каналов, где механической обработкой не удастся достичь высокой производительности или где затруднен доступ инструмента в зону резания.

По сравнению с механической обработкой технологии электроэрозионной обработки имеют целый ряд существенных преимуществ:

1. процесс обработки не зависит от характеристик обрабатываемого материала: твердости, прочности, вязкости и др.
2. электроэрозионные технологии применимы при изготовлении деталей из твердых сплавов, термообработанных жаропрочных и нержавеющей и других материалов, обладающих электропроводностью.
3. технологические показатели обработки (точность, качество поверхности) во многих случаях превосходят возможности механической обработки. При изготовлении сложнейших деталей электроэрозионной обработкой процесс сравнительно просто может обеспечить погрешность обработки $\pm 0,001$ мм при шероховатости поверхности $Ra = (0,02 — 0,08)$ мкм.
4. при электроэрозионной копировально-прошивочной обработке возможно копирование формы инструмента-электрода сразу по всей поверхности заготовки (в отличие от механической обработки резанием). Простая кинематика формообразования позволяет осуществлять операции, невыполнимые механической обработкой, например получение отверстий с криволинейной осью, в полости сложной конфигурации, в труднодоступных местах заготовки, глубокие отверстия сверхмалого диаметра и др.
5. процессы не оказывают силового воздействия на деталь, что позволяет обрабатывать тонкостенные элементы различных деталей без их деформации, вырезать из тонкого материала (например, из фольги) элементы сложной формы с малыми перемычками, а также обрабатывать детали из хрупких материалов.
6. применимы для обработки изделия любых размеров и назначений: от миниатюрных деталей радиоэлектронной аппаратуры до штампов массой в несколько тонн, т. е. можно использовать электроэрозионные технологии в самых различных отраслях.
7. не требуют специальных инструментов, твердых сплавов, абразивных и других дорогостоящих материалов.
8. определенные схемы электроэрозионной обработки обеспечивают возможность изменения в нужном направлении физико-механических и химических свойств поверхностной твердости, коррозионной стойкости и др.
9. легкость автоматизации процесса электроэрозионной обработки, простота программирования выполнения на станках с ЧПУ сложнейших работ, возможность проводить работы на станках в безлюдном режиме.
10. отсутствие заусенцев на деталях после обработки, что сокращает трудоемкость и ликвидирует ручной труд.
11. исключительная эффективность в изготовлении сопрягаемых деталей типа матрица-пуансон и аналогичных с обеспечением микронного зазора в соединении. При этом их обработка на оборудовании с ЧПУ возможна по одной программе.

РАЗДЕЛ VIII ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Тема 8.1. Обрабатываемость различных материалов и способы ее улучшения

Под обрабатываемостью понимается способность обрабатываемого материала разрушать и изнашивать контактные площадки инструмента до заданного критерия износа

Процесс обработки материалов резанием заключается во взаимодействии двух тел — обрабатываемой заготовки и режущего инструмента. При этом поверхностный слой материала, срезаемый с обрабатываемой заготовки, подвергается сильному пластическому деформированию, в результате чего срезанный слой в частично или полностью разрушенном состоянии удаляется с заготовки в виде срезанной стружки. На заготовке и на срезанной стружке в процессе резания непрерывно возникают новые поверхности.

К резанию материалов как к технологическому способу обработки заготовок деталей машин предъявляются следующие основные требования:

- высокое качество и точность обработанных поверхностей;
- высокая производительность труда;
- экономичность.

Выполнение этих требований зависит от комплекса одновременно действующих факторов, которые можно разделить на три основные группы.

К первой группе относятся факторы, связанные с физической природой и структурным состоянием материала обрабатываемой заготовки.

Вторая группа факторов определяется свойствами материала режущей части инструмента, его конструкцией и качеством изготовления.

В третью группу входят факторы, отражающие реальные условия протекания процесса резания.

При изучении процесса резания был установлен ряд взаимосвязанных параметров и характеристик, отражающих различные физические явления, происходящие в процессе взаимодействия режущего инструмента с обрабатываемой заготовкой, и на протекание которых влияют свойства материала, подвергаемого обработке резанием.

Эти параметры и характеристики объединены общим термином обрабатываемость материала резанием, под которым понимается свойство материалов подвергаться обработке резанием. Основные показатели обрабатываемости могут иметь как сравнительный, так и абсолютный характер.

К числу показателей, определяющих сущность обрабатываемости материала резанием, относятся:

- сила резания (момент вращения) обрабатываемого материала, определяемая по сравнению с силой резания эталонного материала (для металлов — это обычно сталь 45) и измеренная при равных режимах резания;

- эффективная мощность, затрачиваемая на резание, по сравнению с эффективной мощностью резания эталонного материала;

- усадка стружки (продольная и поперечная) как мера пластической деформации, необходимой для ее срезания и образования новых поверхностей на заготовке;

- наличие или отсутствие склонности к образованию нароста на поверхности инструмента при равных условиях резания, а также форма нароста;

- качество поверхностей, обработанных резанием при равных и оптимальных режимах, оцениваемое шероховатостью и остаточным напряжением в поверхностных слоях изготовленной детали;

- скорость изнашивания инструментального материала по сравнению со скоростью его изнашивания при резании эталонного материала;

- теплота, выделяющаяся при деформации материала срезаемого слоя и при взаимодействии трущихся поверхностей инструмента и заготовки, а также распределение этой теплоты между стружкой, обрабатываемым материалом и инструментом;

- вид, форма и размеры срезанной стружки, определяющие удобство ее отвода, хранения и транспортировки, возможность принудительной завивки и ломания стружки, а также безопасность труда рабочего-станочника;

- энергозатраты на срезание единицы массы стружки.

Количественные оценки перечисленных показателей обрабатываемости конструкционного материала данного химического состава и структурного состояния определяются в зависимости от его твердости, предела прочности и относительного удлинения, коэффициента трения детали с инструментальным материалом, свойства изнашивания лезвия инструмента, теплопроводности и т.д. В реальных производственных условиях перечисленные свойства материалов из-за отклонений в химическом составе и неоднородности структуры не являются постоянными.

Кроме того, характеристики процесса резания, отражающие взаимосвязанные физические явления в зоне стружкообразования, изменяются в зависимости от режимов резания, прогрессирующего износа инструмента и т. п. На основании этого сопоставление количественных оценок обрабатываемости, например по стойкости инструмента. Под

стойкостью режущих инструментов понимается продолжительность (в минутах) непосредственного резания от переточки до переточки при установленном допустимом износе), допустимо лишь при соблюдении равных условий резания, типичных для сравниваемых групп обрабатываемых и инструментальных материалов.

Под режущими свойствами инструментов понимается их способность обрабатывать различные материалы резанием. При оценке режущих свойств инструментов используются следующие показатели:

- количество однотипных обработанных ими заготовок;
- длина относительного рабочего пути инструмента и заготовки;
- площадь обработанной поверхности;
- объем материала, срезанного с обработанных заготовок;
- период стойкости инструмента и число его переточек;
- суммарная длина всех обработанных заготовок.

Режущие свойства инструмента являются функцией комплекса факторов, к числу которых относятся:

- свойства инструментального материала, включающие в себя химический состав (марка материала), структурное состояние, твердость, пределы прочности на растяжение, изгиб и сжатие, температуростойкость (красностойкость), износостойкость;
- конструкция инструментов — оптимальная форма режущей части, жесткость, точность изготовления;
- режимы резания — скорость резания, подача и глубина резания, СОЖ (смазочно-охлаждающая жидкость), принятый критерий износа;
- состояние металлорежущего станка — жесткость станка и технологической оснастки, виброустойчивость.

Основные характеристики обрабатываемости:

- возможность получения обработанных поверхностей с минимальной или заданной шероховатостью, степенью и глубиной наклепа и других характеристик качества поверхностного слоя;
- легкость получения необходимой точности обработки при чистовых и отделочных операциях, определяемой для заданной технологической системы интенсивностью изнашивания инструмента, возникающими при резании силами и их изменением по мере затупления инструмента;
- силы резания и потребляемая мощность;
- легкость ломания и отвода стружки, определяемая ее деформацией и характером стружкообразования;
- скорость резания v_T , соответствующая заданному периоду стойкости T при износе инструмента до принятого критерия затупления h_z (например, v_{60} , v_{120} или $v_{h_z=0,4}$);

- оптимальная скорость резания v_0 , при которой наблюдается наименьшая интенсивность изнашивания инструмента и наименьший относительный поверхностный износ $h_{o.п}$;

- экономическая скорость резания $v_э$, при которой достигается наименьшая себестоимость обработки условной детали при заданных стоимости станко-минуты, времени на смену затупившегося инструмента и стоимости его эксплуатации за период стойкости.

Оценка обрабатываемости материала включает в себя следующие этапы:

1. определение оптимальной марки инструментального материала, оптимальной геометрии режущего инструмента и оптимального состава смазочно-охлаждающей жидкости.
2. исследование влияния различных факторов (скорости резания, подачи, глубины резания, геометрии режущего инструмента и др.) на качество обработанной поверхности, силы резания и износ режущего инструмента.
3. исследование влияния термообработки на обрабатываемость.

Оценку обрабатываемости производят по следующим параметрам:

- допускаемой скорости резания;
- качеству обработанной поверхности;
- силам и мощности, затрачиваемым на процесс резания;
- характеру образующейся стружки.

Основным параметром оценки обрабатываемости, как при черновой, так и при чистовой обработке является скорость резания. Чем она выше, тем лучше обрабатываемость материала и наоборот.

Для определения обрабатываемости используют различные методы. Рассмотрим метод, который заключается в построении периода стойкости инструмента от скорости резания – $T=fv$ (рис. 8.1). Данный метод является наиболее точным и объективно отражает влияние обрабатываемого материала на износ инструмента. Недостатком его является трудоемкость и большой расход обрабатываемого материала.

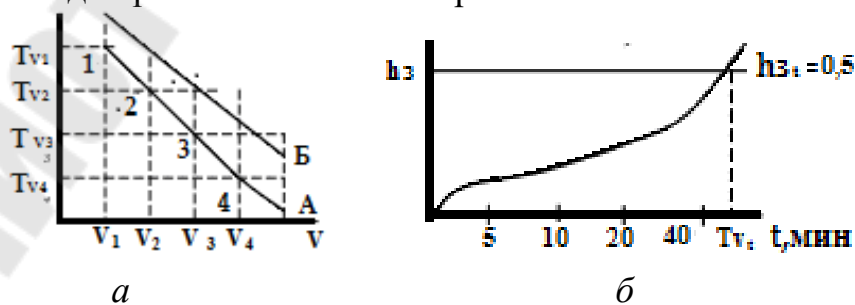


Рис. 8.1. Зависимость периода стойкости инструмента от скорости резания (а) и износа по задней поверхности от времени работы инструмента (б)

В настоящее время разработаны различные способы оценки обрабатываемости. Условно их можно разделить на три группы (рис. 8.2).

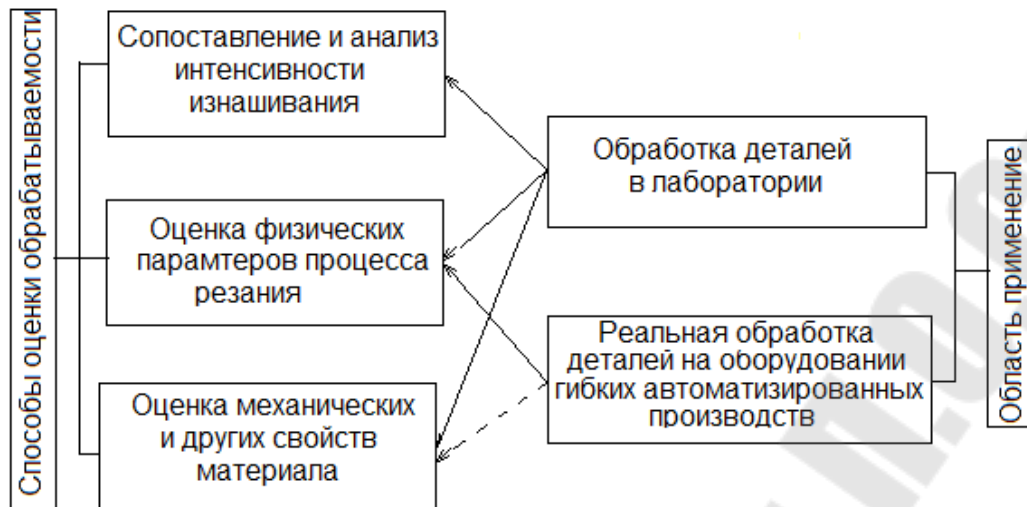


Рис. 8.2. Способы оценки обрабатываемости и области их применения (штриховая линия означает необходимость контроля на загрузочной позиции технологической системы)

К *первой группе* относятся способы, основанные на сопоставлении и анализе интенсивности изнашивания режущего инструмента. Прежде всего, это «классический» способ. Он заключается в определении зависимостей $v = f(T)$ различных материалов. Путем измерения износа резца через небольшие промежутки времени, можно, задавшись определенным периодом стойкости T , найти соответствующие ему скорости резания v_T , v_{T_3} и определить коэффициент обрабатываемости материала: $K_M = v_T / v_{T_3}$.

Данный способ наиболее точно и объективно отражает влияние обрабатываемого материала на интенсивность изнашивания инструмента, однако он очень трудоемок и требует большого расхода обрабатываемого материала и инструментов. Поэтому в настоящее время разработаны ускоренные способы определения обрабатываемости. Ряд из них основан на постоянном увеличении скорости резания в пределах рабочего хода. Наиболее распространен способ торцевой обточки: диск, изготовленный из испытуемого материала, обтачивают на токарном станке по торцу от центра к периферии с постоянной частотой вращения. При этом скорость резания постоянно возрастает, и при определенной скорости наступает затупление резца.

Параметры уравнения $T = f(v)$ определяют следующим образом. Общеизвестное уравнение $v = C_v / T^{1/\mu}$ легко преобразуется в следующее:

$$Tv^\mu = C_{\mu_v}.$$

При переменной скорости резания, имеющей место при торцовой обточке, используется среднее значение функции v^μ , т.е.

$$Tv_{\text{ср}}^\mu = C_v^\mu,$$

C_v и μ можно получить экспериментально обрабатывая деталь на разной частоте вращения заготовки до затупления инструмента

$$\mu = 2(\lg(n_1/n_2)) \lg(v_{n1}/v_{n2})$$

$$C_v = [1000v_n^{\mu+1} / (2\pi m^2 S(\mu+1))]^{1/\mu}.$$

Во второй группе способов оценки обрабатываемости физическими параметрами процесса резания являются силы резания, угол сдвига, угол трения, усадка стружки, уровень температур в зоне резания (или термоЭДС и др.

Использование сведений о физических и механических свойствах материалов в третьей группе способов оценки обрабатываемости является перспективным направлением. Преимуществом таких способов является существенное снижение трудоемкости и расхода обрабатываемого материала, а в качестве анализируемых параметров используются температуры максимального электросопротивления, структурно-фазового превращения α - железа в γ - железо, магнитная проницаемость, коэрцитивная сила, коэффициент внутреннего трения, сопротивление внедрению инденторов и др.

Обрабатываемость конструкционных и инструментальных сталей. Обрабатываемость углеродистых сталей в первую очередь зависит от содержания в них углерода. Наилучшую обрабатываемость имеют термически не обработанные стали, с содержанием углерода 0,2...0,3 %; при меньшем и большем содержании углерода обрабатываемость непрерывно ухудшается. Сера и фосфор, ухудшая эксплуатационные свойства углеродистых сталей, при определенном содержании улучшают их обрабатываемость. То же самое можно сказать и о марганце, если его содержание не превышает 1%. Вследствие этого автоматные стали, содержащие серы до 0,3...0,4%, фосфора до 0,15% и марганца до 0,7...1%, обрабатываются со скоростями резания в 1,5...2 раза более высокими, чем те, которые допускают при резании малоуглеродистых сталей.

Влияние легирующих элементов на обрабатываемость определяется их способностью растворяться в феррите или образовывать карбиды. Элементы, растворяющиеся в феррите, повышают его вязкость и ухудшают обрабатываемость. Добавка карбидообразующих элементов до определенного предела обрабатываемости стали, существенно не изменяет.

Обрабатываемость конструкционных сталей в значительной степени зависит также от металлургических факторов: способов изготовления и прокатки. Конверторные низкоуглеродистые стали, характерные большим содержанием серы и фосфора, обрабатываются значительно лучше, чем

стали, выплавленные в мартеновских и электрических печах, в которых серы и фосфора меньше. Обрабатываемость спокойных сталей с контролируемым размером зерна выше, чем полуспокойных и особенно кипящих. Значительно ухудшается обрабатываемость при использовании во время сталеварения в качестве раскислителей алюминия и кремния, так как образующиеся алюминаты и силикаты повышают, истирающую способность стали. Холоднокатаная углеродистая сталь с содержанием углерода до 0,3% имеет лучшую обрабатываемость, нежели горячекатаная; обрабатываемость горяче- и холоднокатаных сталей с содержанием углерода 0,3...0,4% одинакова; если содержание углерода превышает 0,4%, то холоднокатаная сталь обрабатывается хуже, чем горячекатаная. Очень сильное влияние на обрабатываемость сталей оказывают термическая обработка и структура после закалки, отпуска и отжига.

Наряду с химическим составом, на истирающую способность материала влияет его микроструктура. Наименьшей истирающей способностью обладает феррит, небольшой коэффициент $k_{ист}$ имеет аустенит; истирающая способность перлита зависит от формы цементита; у пластинчатого перлита она больше, чем у зернистого, у зернистого тем меньше, чем меньше зерна цементита; у высоколегированных сталей истирающая способность значительно увеличивается, если карбиды расположены в виде скоплений или сетки.

Наибольшая скорость резания V_T достигается при резании феррита, а затем по мере усиления интенсивности затупления инструментов идут зернистый и пластинчатый перлит, сорбит, троостит.

В инструментальных легированных и быстрорежущих сталях содержание легирующих элементов весьма велико, что резко ухудшает их обрабатываемость и увеличивает шероховатость обработанной поверхности. Если содержание вольфрама более 10%, то обрабатываемость ухудшается вследствие образования сложных карбидов. Ванадий и кобальт растворяются в феррите, делая его более вязким. Хром и молибден также растворяются в феррите и вместе с тем образуют карбиды. Наилучшей структурой инструментальной стали является зернистый перлит с равномерно распределенными мелкими карбидами. Такую структуру получают тщательной проковкой заготовок и сфероидизирующим отжигом.

Влияние изменения прочности на допускаемую скорость резания в пределах одной марки или группы сталей учитывают зависимостью

$$V = C_\sigma \sigma_B^{n_v}$$

При точении резцом из быстрорежущих сталей деталей из углеродистых, автоматных и хромистых сталей $n_v = 1,75$; из сталей хромоникелевых, никелевых, марганцовистых, хромомарганцовистых, хромокремнемарганцовистых $n_v = 1,5$; из сталей хромо-молибденовых,

хромомолибденоалюминиевых, быстрорежущих $n_v = 1,25$. При точении деталей из перечисленных сталей резцом из твердых сплавов $n_v = 1$.

Приняв за эталонный предел прочности на σ растяжение $\sigma_B = 750$ МПа, влияние механических свойств обрабатываемого материала на скорость резания учитывают поправочным коэффициентом:

$$K_M = \sigma_B(750)^m.$$

Обрабатываемость чугунов определяется в первую очередь их микроструктурой и ухудшается по мере того, как углерод из свободного состояния (графит) переходит в связанное состояние (цементит), обладающее повышенной истирающей способностью. На обрабатываемость чугуна влияет также размер и форма графита и цементита. Наилучшая обрабатываемость достигается при наличии сфероидальных зерен графита. Вследствие малых пластичности и склонности чугуна к упрочнению силы резания при его обработке меньше, чем при обработке сталей на ферритной основе. Однако из-за малой длины контакта стружки с передней поверхностью нормальные напряжения достаточно велики и концентрируются вблизи режущей кромки. Температура резания при обработке чугуна также меньше по сравнению с температурой, возникающей при обработке ферритных сталей той же твердости. Однако обрабатываемость чугуна хуже.

Алюминиевые сплавы с точки зрения обрабатываемости можно разделить на три группы. К первой относятся сплавы с низкой твердостью, имеющие склонность к налипанию на инструмент (например, дюралюминий в отожженном состоянии). Сплавы второй группы имеют высокую твердость, не налипают на инструмент (например, термически упрочненный дюралюминий, кованые сплавы АК6, АК8 и др.). В третью группу входят широко распространенные литые сплавы, содержащие кремний, в частности силумины различных сплавов. Для первых групп наиболее характерно образование сливной стружки в виде длинных лент и спиралей, для третьей – стружка легко дробится на короткие элементы. По сравнению со сталью алюминиевые сплавы обладают меньшей твердостью, более низким временным сопротивлением и лучшей теплопроводностью, что позволяет значительно повысить скорость резания и подачу. Высокая вязкость ряда алюминиевых сплавов интенсифицирует налипание частиц на рабочие поверхности инструмента, что затрудняет отвод стружки, может вызвать пакетирование стружки и привести к образованию задиров на обработанной поверхности. Алюминиевые сплавы склонны к наростообразованию и данный процесс протекает чрезвычайно активно. Максимальная высота нароста и его исчезновение отмечают для алюминиевых сплавов при относительно более низких скоростях резания, чем для сталей.

Медные сплавы с точки зрения обрабатываемости можно разбить на три группы: 1. Сплавы с гомогенной структурой (латуни Л60, Л63, бронзы

БрА7, Бр04Ц3 и др., медь); 2. Сплавы с гетерогенной структурой (ЛЦ16К4, ЛЦ30А3, БрА10ЖЗМц2 и др.); 3. Сплавы, содержащие свинец (ЛС63-3, ЛЦ10С, БрС30 и др.). При обработке сплавов первой группы и красной меди образуется сливная вязкая и трудноломающаяся стружка. Сплавы второй группы также образуют сливную стружку, однако она менее прочная и значительно лучше ломается. При резании свинцовистых сплавов образуется короткая хрупкая стружка, а в случае высокого содержания свинца – стружка надлома почти в виде пыли. Обрабатываемость медных сплавов лучше по сравнению со сталями, коэффициент, характеризующий уровень скоростей резания, для них в 2 – 3 раза выше по сравнению с чугуном и сталью.

Обрабатываемость медных сплавов. Медь и ее сплавы находят широкое применение в современном машиностроении в качестве конструкционных, антифрикционных, электротехнических и других материалов.

С точки зрения обрабатываемости медные сплавы можно разбить на следующие группы:

1) сплавы с гомогенной структурой — латуни Л63, бронзы БрОЦ4-3, БрКН1-3, БрА7 и др.; к этой группе относится также медь;

2) сплавы с гетерогенной структурой типа ЛМц58-2, ЛЦ16К4, ЛЦ30А3, ЛЦ23А6ЖЗМц2, БрО10Ф1, БрА9Мц2Л, БрА10ЖЗМц2 и др.;

3) сплавы, которые содержат свинец, — ЛС63-3, ЛЖС58-1-1, Бр04Ц4С17, Бр05Ц5С5 и др.

При обработке сплавов *первой* группы и красной меди образуется сливная вязкая и трудноломающаяся стружка. Это ухудшает условия работы при использовании автоматизированного оборудования и обработке отверстий (из-за пакетирования стружки в канавках инструмента). Сплавы *второй* группы также образуют сливную стружку, однако она менее прочная и значительно легче ломается. При резании свинцовистых сплавов образуется короткая хрупкая стружка, а в случае высокого содержания свинца — стружка надлома почти в виде пыли.

В ряде случаев процесс образования стружки при резании медных сплавов сопровождается ее интенсивным пластическим деформированием. В частности, толщина стружки может превысить толщину среза в 10 и более раз. Коэффициенты K_a , K_f зависят главным образом от структуры сплава. Наибольшие их значения характерны для гомогенных структур, наименьшие — для высокосвинцовистых и гетерогенных сплавов высокой твердости.

При обработке медных сплавов в практически используемом диапазоне скоростей отсутствует нарост, поэтому зависимости $K_f = f(v)$, $P_z = f(v)$ имеют монотонный характер, свойственный материалам, не склонным к наростообразованию. Уровень сил резания зависит от структуры и механических характеристик сплава. Так, при

точении гомогенных сплавов и меди сила P_z может быть выше, чем при обработке конструкционных сталей, а для высокосвинцовистых гетерогенных сплавов — уменьшится примерно в 10 раз.

Обрабатываемость медных сплавов определяется температурой в зоне резания и истирающей способностью сплава:

1) присадка к меди любого элемента, образующего с ней твердый раствор (олова, алюминия, кремния), уменьшает v_T в 3-4 раза вследствие резкого снижения теплопроводности материала и увеличения температуры резания в 1,6-2 раза;

2) присадка к медному сплаву никеля, который полностью растворяется в меди и не создает новой фазы, слабо влияет на v_T ;

3) переход от гомогенных структур к гетерогенным приводит к снижению v_T почти вдвое за счет истирающего действия твердых частиц эвтектоида, температура резания при этом изменяется незначительно;

4) создание новых фаз в гетерогенных сплавах практически не влияет на обрабатываемость; исключение составляют добавки свинца, которые за счет уменьшения истирающей способности материала и снижения в 1,4-2 раза температур резания способствуют значительному возрастанию v_T .

Приведенные закономерности позволяют определенным образом расположить медные сплавы по их обрабатываемости (табл. 9.2). При обработке медных сплавов с $K_M = 1$ v_T в 2—3 раза выше, чем при обработке чугунов и сталей. Обрабатываемость медных сплавов резко ухудшается при наличии в них шлаковых включений, а также микротрещин и других дефектов отливки.

Обработка титановых сплавов обусловлена рядом их особенностей: малая пластичность, характеризующаяся высоким коэффициентом упрочнения; высокая химическая активность к кислороду, азоту, водороду, что вызывает интенсивное охрупчивание поверхностного слоя сплавов вследствие диффузии в него атомов газа при повышении температуры; чрезвычайно низкая теплопроводность, более низкая, чем у жаропрочных сталей и сплавов. Существуют сплавы различных составов и свойства, например: технически чистый титан (BT1), сплавы систем титан — алюминий (BT5), титан — алюминий — марганец (BT4), титан — алюминий — хром — молибден (BT3) и др.

Титановые сплавы имеют ряд особенностей, обуславливающих их низкую обрабатываемость.

1. Малая пластичность, характеризующаяся высоким коэффициентом упрочнения $\sigma_{0,2}/\sigma_B$, примерно в 2 раза большим, чем у жаропрочных материалов. Вместе с тем механические характеристики титановых сплавов (относительное удлинение δ и относительное сужение ψ) по сравнению с

жаропрочными меньше. Пониженные пластические свойства титановых сплавов в процессе их деформирования способствуют развитию опережающих микро- и макротрещин. Образующаяся стружка по внешнему виду напоминает сливную, имеет трещины, разделяющие ее на очень слабо деформированные элементы, прочно связанные тонким и сильно деформированным контактным слоем.

Пониженная пластичность приводит к тому, что при обработке титановых сплавов сила P_z примерно на 20 % ниже, чем при обработке сталей, а силы P_y и P_x — выше. Это различие указывает на характерную особенность титановых сплавов: силы резания на задней поверхности при их обработке относительно больше, чем при обработке сталей. Как следствие, при увеличении износа силы резания, особенно P_y , резко возрастают.

2. Высокая химическая активность к кислороду, азоту, водороду. Это вызывает интенсивное охрупчивание поверхностного слоя сплавов вследствие диффузии в него атомов газов при повышении температуры. Насыщенная атмосферными газами стружка теряет пластичность и в этом состоянии не подвергается обычной усадке.

При резании в атмосфере инертных газов (аргона) $K_t > 1$ даже при очень больших (более 300 м/мин) скоростях резания.

Высокая активность титана по отношению к кислороду и азоту воздуха в 2-3 раза снижает площадь контакта стружки с передней поверхностью инструмента, что не наблюдается при обработке конструкционных сталей. Вместе с тем окисление контактного слоя стружки увеличивает ее твердость, контактные напряжения, температуру резания и интенсивность изнашивания инструмента.

3. Чрезвычайно плохая теплопроводность, более низкая, чем у жаропрочных сталей и сплавов. Например, для сплава BT10 она равна 11 Вт/(мК), тогда как для сталей 12X18H9T и 45 — соответственно 23 и 40 Вт/(мК). Как следствие, при резании титановых сплавов возникает температура, более чем в 2 раза превышающая уровень температур при обработке стали 45 (рис. 8.3).

Высокая температура в зоне резания вызывает интенсивное наростообразование, схватывание обрабатываемого материала с материалом инструмента и появление задиров на обработанной поверхности.

4. Подверженность материалов режущего инструмента абразивному воздействию вследствие содержания в титановых сплавах нитридов и карбидов. Однако при повышении температуры прочность титановых сплавов снижается сильнее, чем нержавеющей жаропрочных сталей и сплавов. Обработка резанием по корке многих кованных, прессованных, литых заготовок из титановых сплавов затруднена

дополнительным абразивным воздействием на режущие кромки инструмента неметаллических включений, оксидов, сульфидов, силикатов и многочисленных пор, образующихся в поверхностном слое. Неоднородность структуры снижает виброустойчивость процесса обработки титановых сплавов. Эти обстоятельства, а также концентрация значительного количества теплоты в пределах небольшой площадки контакта на передней поверхности приводят к преобладанию хрупкого изнашивания с периодическим скалыванием по передней и задней поверхностям и выкрашиванию режущей кромки. При высоких скоростях резания интенсифицируется тепловое изнашивание, на передней поверхности резца развивается лунка. Во всех случаях, однако, лимитирующим является износ задней поверхности.

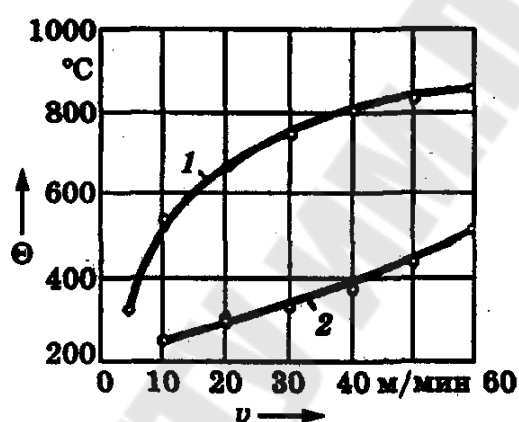


Рис. 8.3. Зависимость температуры от скорости резания при точении: **1** — титанового сплава резцом из твердого сплава ВК8; **2** — стали 45 резцом из быстрорежущей стали P18

Уровень скорости резания v_T при обработке титановых сплавов в 2,5-5 раз ниже, чем при обработке стали 45.

5. При обработке титановых сплавов широко используются технологические среды. Правильный выбор СОТС может повысить период стойкости инструмента в 1,5-3 раза, снизить высоту микронеровностей в 1,5-2 раза. Характерная особенность использования СОТС при обработке титановых сплавов — малая эффективность присадок, содержащих серу, азот, фосфор, поскольку эти элементы хорошо растворимы в титане. Гораздо более эффективны в качестве присадок галогены, и в первую очередь йод.

Обработываемость жаропрочных и жаростойких сталей существенно хуже по сравнению с обработываемостью конструкционных сталей и чугунов. Жаропрочными называют материалы, способные выдерживать механические нагрузки без существенных деформаций и обладающие жаростойкостью, т.е. способностью противостоять

химическому разрушению под действием воздуха или других агрессивных сред при высоких температурах. *Жаростойкость* — способность противостоять химическому разрушению под воздействием воздуха или других агрессивных сред при высоких температурах. По физико-механическим свойствам жаропрочные, жаростойкие стали и сплавы имеют много общего, что обуславливает их технологические качества. В зависимости от химического состава и для обеспечения удовлетворительной обрабатываемости резанием труднообрабатываемые стали, и сплавы имеют различную структуру: ферритную, мартенситно-ферритную, аустенитную и аустенитно-мартенситную. В связи с этим стали подразделяются на классы и характеризуются коэффициентом обрабатываемости.

Марки и краткая характеристика обрабатываемости жаропрочных и жаростойких сталей: а) теплостойкие хромистые, хромоникелевые и хромомолибденовые стали перлитного и мартенситного классов (34ХН3М, 20Х3МВФ), относятся к первой группе, коэффициент обрабатываемости K_M -0,8; б) жаропрочные, жаростойкие, кислотостойкие хромоникелемарганцовистые сложнолегированные стали аустенитного класса (45Х14Н14В2М), относятся к четвертой группе, коэффициент обрабатываемости K_M -0,3; жаропрочные деформируемые сплавы на железоникелевой и никелевой основе (36НХТЮ (ЭИ702), ХНЮВ (ЭИ868)), относятся к пятой группе, коэффициент обрабатываемости $K_M = 0,16-0,075$

Худшая обрабатываемость данных материалов определяется их физико-механическими свойствами, структурой и теплофизическими характеристиками. К таким свойствам относятся:

1. высокое упрочнение материала в процессе его обработки резанием.
2. низкая теплопроводность.
3. способность данных материалов сохранять исходную прочность и твердость при повышенных температурах.
4. большая истирающая способность данных материалов, обусловленная наличием в них, кроме фазы твердого раствора, еще и второй фазы, когда образуются интерметаллидные или карбидные включения.

Особенности резания пластмасс определяется видами наполнителя и связующего материала, а также технологическим процессом их получения. Пластмассы широко применяются для изготовления различных деталей машин. К их достоинствам следует отнести небольшую плотность, удовлетворительную прочность, высокие антифрикционные, шумо- и вибропоглощающие свойства, достаточно высокую антикоррозионную стойкость, небольшую трудоемкость изготовления деталей из них.

Положительными свойствами обрабатываемости пластмасс является следующее:

1. под действием повышенной температуры термопластичные материалы размягчаются, сохраняя свою плавкость и растворимость, и допускают повторное формование, а термореактивные материалы под действием температуры и давления переходят в необратимое неплавкое и нерастворимое состояние, т.е. при нагревании не размягчаются;

2. основные механические свойства пластмасс зависят от вида смолы и характера наполнителя. Прочность отдельных видов древесностлоистых пластмасс и стеклопластиков приближается к прочности углеродистой стали и, иногда превосходит прочность чугуна, бронзы, алюминия, меди.

Отмечая положительные свойства пластмасс, необходимо учитывать и целый ряд их недостатков обрабатываемости.

1. Низкие теплопроводность и теплостойкость, старение под действием температуры и влажности, ползучесть.

2. Теплопроводность пластмасс в 500-600 раз ниже теплопроводности металлов, а детали из них могут работать в интервале температур от -60 до 200 °С. Исключение составляют пластмассы на основе кремнийполимеров и фторопластов, детали из которых могут удовлетворительно работать при температурах до 300...350 °С.

3. Старение пластмасс протекает значительно интенсивнее, чем металлов, что приводит к существенному ухудшению первоначальных механических свойств. К тому же ползучесть пластмасс выражается гораздо сильнее, чем ползучесть металлов.

Особенности резания керамических материалов. Керамика— это большая группа неметаллических материалов различного химического состава, объединенных технологией изготовления. Доля керамики в мировом производстве материалов занимает доминирующее положение (62% в массовом отношении и почти 50% в объемном).

Применение *керамических материалов* (КМ) обусловлено следующими преимуществами: сохранением механических свойств при высоких температурах, высокой износостойкостью и антикоррозийностью.

Из недостатков КМ основным считается хрупкость, обусловленная жесткостью связей в кристаллической решетке. В настоящее время основные усилия исследователей при разработке КМ направлены на преодоление хрупкости, повышение уровня прочности, термостойкости и ударной вязкости.

Керамика обеспечивает работоспособность многих технических устройств химической и металлургической промышленности (кислотоупорные и огнеупорные изделия), электротехнической промышленности (изоляторы), инструментальной промышленности (абразивные материалы), высокотемпературной техники многих передовых отраслей промышленности (энергомашиностроение, авиация, ракетная техника и др.). В связи с развитием технологий 3D-печати появилась

необходимость в увеличении рабочей температуры фильер, используемых для нагрева и последующего выдавливания композитных полимеров. С целью увеличения износостойкости таких фильер в их конструкции начали применяться керамические втулки с внутренним диаметром 0,8...0,2 мм.

Наиболее практикуемые методы обработки керамических деталей являются виды *абразивной обработки*. Абразивная обработка вследствие повышенной твердости и износостойкости керамики ее эффективная обработка возможна только с использованием алмазного инструмента, но, а в таком случае производительность достаточно низкая. По некоторым данным стоимость обработки керамики во много тысяч раз превышает обработку конструкционных сталей. Поскольку все керамические детали являются хрупкими, то при точечных нагрузках под воздействием инструмента они имеют тенденцию к растрескиванию. Точечная нагрузка при отсутствии пластической деформации приводит к тому, что под воздействием зерен абразивного инструмента керамика испытывает сильные механические и термические нагрузки, в результате чего выкрашиваются и образуют микроканавку. Под канавкой образуется область так называемой деформированной зоны, которая имеет полукруглое сечение, при последующем чистовом шлифовании канавки убираются, но под ними остаются длинные микротрещины.

Одним из наиболее производительных и эффективных методов алмазной обработки электропроводной керамики является метод алмазно-электролитической обработки. В этом случае используется инструмент на электропроводной связке, который соединен с отрицательным полюсом, а обрабатываемая деталь к положительному полюсу. В зазор между деталью и инструментом непрерывно струей подается электролит. При прохождении тока через электролит поверхность обрабатываемой детали подвергается электрохимическому растворению с образованием анодной пленки, которая легко убирается абразивным инструментом.

Вследствие повышенной твердости и износостойкости керамики ее эффективная обработка возможна только с использованием алмазного инструмента, но даже применение алмаза не позволяет достичь высокой производительности резания, поэтому обработка керамических деталей весьма дорогая. По данным японских исследователей, стоимость обработки керамики в десятки тысяч раз превышает стоимость обработки конструкционных сталей.

Высокая твердость, отсутствие пластичности, низкая стойкость к тепловым ударам, склонность к растрескиванию создают трудности при механической обработке, особенно при получении изделий сложной геометрической формы с высокой точностью и качеством обработки. Создание высокоэффективных методов обработки КМ представляет одну из сложнейших задач современного машиностроения.

Поскольку все керамические материалы являются хрупкими, то при точечных нагрузках под воздействием режущего или шлифовального инструмента они имеют тенденцию к растрескиванию. Точечная нагрузка при отсутствии пластической деформации приводит к тому, что под воздействием зерен алмаза шлифовального инструмента керамика, испытывая сильные механические и термические нагрузки, выкрашивается. Этот эффект лежит в основе механообработки керамики.

Полученное после обжига керамические изделия претерпевают более или менее значительно усадку до 30-40 % по объему, которая сопровождается нарушением их геометрической формы из-за неоднородности в сырье, грансостава, плотности после формообразования. Необходимые допуски размеров и формы могут быть достигнуты только дополнительной обработкой.

Основным методом получения высокоточных поверхностей деталей из КМ является шлифование. Обрабатываемость КМ определяется следующими факторами: механическими свойствами керамики (зависящими от условий и параметров спекания), жесткостью технологической системы и режимами резания.

Шлифование деталей из КМ в основном ведут алмазными кругами. Съем материала в процессе алмазного шлифования осуществляется в результате создания в поверхностном слое керамической заготовки напряжений, превышающих напряжение разрушения ее материала. В результате абразивная обработка может оставлять на обрабатываемой заготовке слой, включающий микротрещины и определенную макро- и микро- геометрию поверхности. Поскольку рост поверхностных микротрещин требует значительно меньшей энергии, чем рост внутренних, а также вследствие их близости к зонам концентрации контактных напряжений при эксплуатации, наличие поверхностных микротрещин оказывает преимущественное влияние на долговечность деталей из КМ.

Влияние процесса шлифования на качество деталей проявляется также через геометрические погрешности обработанной поверхности. Отклонения макро- и микро- геометрии детали действуют как концентраторы контактных напряжений при ее эксплуатации и приводят к увеличению рассеяния показателей долговечности деталей из КМ.

Существенное влияние на качество детали оказывает материал связки шлифовального круга. Для повышения качества деталей из КМ ряд зарубежных авторов рекомендуют отказаться от использования шлифовальных кругов на металлической связке, т.е. производить всю механическую обработку таких деталей шлифовальными кругами на органических связках различной твердости.

При исследовании различных кинематических схем шлифования: с подачей вдоль, поперек оси образца и с переменным направлением подачи

относительно координат обрабатываемой поверхности образца - получены наиболее прочные образцы при обработке с продольной подачей вдоль оси.

Зернистость алмазного круга в пределах от 150 до 600 мкм практически не влияет на прочность образцов из нитридной керамики. Значительное снижение прочности получено лишь при шлифовании кругами с зернистостью 1200 мкм.

Глубина шлифования, которая варьировалась в пределах от 0,025 до 0,75 мм/дв.ход, не оказывает заметного влияния на прочность образцов.

Прочность образцов, обработанных кругом на органической связке по сравнению с кругом на металлической связке, оказалась существенно выше.

Таким образом, из полученных результатов можно сделать выводы, что наибольшее влияние на прочность образцов из КМ оказывает сам материал, точнее технология его получения, связка применяемого круга и кинематическая схема шлифования. Глубина шлифования и зернистость круга в пределах допустимых режимов шлифования не влияет на прочность образцов.

Свойства керамики изучены недостаточно, она непредсказуемо разрушается под нагрузкой из-за хрупкости, большого разброса характеристик, внутренних напряжений, низкой термостойкости.

Исследованиями физико-химических свойств нитридной керамики в работе установлено, что:

- разброс модуля упругости заготовок может достигать 20%;
- величина анизотропии модуля упругости в пределах заготовки составляет 12%;
- локальная плотность керамики в пределах одной заготовки меняется до 15%.

Таким образом, при алмазном шлифовании изделий из КМ имеют место нестационарные процессы, обусловленные переменными механическими свойствами обрабатываемых материалов, переменным фактическим пятном контакта рабочей поверхности круга с обрабатываемой поверхностью, неравномерным износом алмазного инструмента, вибрациями технологической системы «станок-приспособление-инструмент-деталь» и т.д. В этих условиях проблема повышения надежности и долговечности изделий из КМ может быть решена при использовании методов и средств технологической диагностики. Получение в каждый момент времени оперативной и точной информации о динамических процессах в зоне обработки заготовок является одной из основных задач технологической диагностики.

Освоено изготовление резцов ряда типоразмеров (рис. 8.4) для лезвийной обработки труднообрабатываемых материалов, а также сверл с впаянными элементами СТМ. Имеется решение о выдаче патента Беларуси на конструктивное исполнение гаммы режущего инструмента. Техничко-

экономическая эффективность от использования инструмента для лезвийной обработки керамических и других труднообрабатываемых материалов достигается благодаря следующим факторам:

- повышению скорости резания, снижению в 2-10 раза основного машинного
- времени обработки, по сравнению с операцией шлифования;
- повышению стойкости инструмента, снижению простоев оборудования;
- улучшению качества обработанных поверхностей, повышению надежности и долговечности деталей;
- уменьшению трудоемкости операций (исключению последующих доводочных операций) и высвобождению рабочих-станочников, оборудования и производственных площадей;

Все указанное приводит к тому, что такой инструмент не просто заменяет процесс шлифования, но требует выбора оптимальных условий его эксплуатации и существенного изменения технологического процесса обработки заготовок.

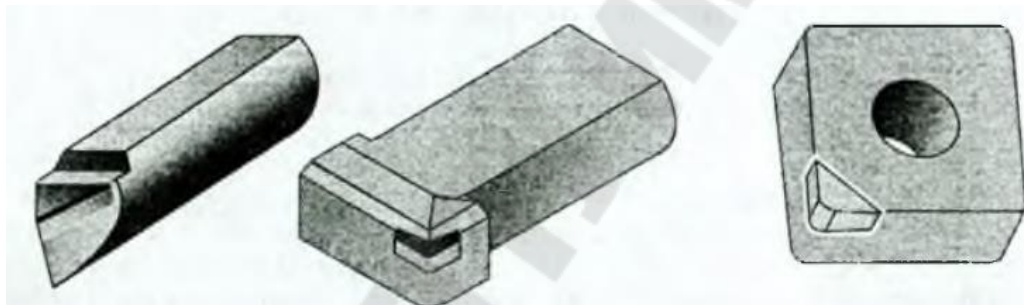


Рис. 8.4. Некоторые типы изготавливаемых режущих инструментов, оснащенных СТМ

Одним из наиболее производительных и эффективных методов алмазной обработки электропроводной керамики является метод алмазно-электролитической обработки. В этом случае используется инструмент на электропроводной связке, который соединен с отрицательным полюсом, а обрабатываемая деталь к положительному полюсу. В зазор между деталью и инструментом непрерывно струей подается электролит. При прохождении тока через электролит поверхность обрабатываемой детали подвергается электрохимическому растворению с образованием анодной пленки, которая легко убирается абразивным инструментом.

В связи с предъявлением высоких технических требований к изготовлению микрожидкостных чипов, фильер, часовых камней и др. изделий, имеющих диаметры отверстий или ширину канавок менее 1мм, появляется необходимость в применении таких физико-химических методов обработки, как электроэрозионная, ультразвуковая, лазерная и электролитно-плазменная.

Электроэрозионная и электрохимическая обработка: из электропроводящих *керамических материалов* большие возможности дает применение электроэрозионной обработки. Этот метод успешно оправдал себя при обработке карбидов, нитридов металла, а также твердых сплавов и керметов. Обработка производится за счет расплавления и последующего испарения керамики под действием электрических дуг, которые образуются между деталью и электронным инструментом. Для обработки неэлектропроводной керамики, например карбида кремния. На поверхность предварительно наносится электропроводящий слой. При электроэрозионной обработке, для образования стабильных разрядов между деталью и инструментом, питание производят от импульсного источника тока. По длительности и характеру импульсов тока различают 3 разновидности электроэрозионной обработки:

1. Электроискровая обработка, характеризуется длительностью импульсов- 10^{-5} - 10^{-7} с и отсутствием механического контакта с инструментом;

2. Электроимпульсная обработка: длительность импульсов увеличивается до 10^{-1} - 10^{-4} с, при этом увеличивается энергия импульсов. Механический контакт также отсутствует;

3. Электроконтактная обработка: характеризуется механическим контактом инструмента заготовки, что приводит к повышенным термомеханическим нагрузкам, что в свою очередь приводит к наименьшему качеству поверхности из всех видов электроэрозионной обработки. Близкой к процессу электроэрозионной обработки, является электрохимическая обработка, которая характеризуется высокотемпературными физикохимическими реакциями.

Ультразвуковая обработка: является универсальным способом обработки применимым для любых видов *керамики*. Сущность обработки заключается в том, что в зазор между обрабатываемой деталью и продольновибрирующим инструментом подается суспензия абразива. Зерна выполняют роль микрорезцов. Под действием прижима инструмента они вызывают растрескивание керамической поверхности в малых объемах. Недостатками такого вида обработки являются проблемы, аналогичные шлифованию. В качестве преимуществ выступает возможность фасонной обработки керамического изделия.

Гидродинамическая обработка: основана на размывании поверхности изделия высокоскоростной струей жидкости. Такой вид обработки, как правило, применяется для разрезания изделий, а также получения прорезей и отверстий. Разновидностью такого вида обработки является струйно-абразивная обработка, которая содержит в себе порошок абразивных материалов, что увеличивает скорость обработки обрабатываемого материала.

Большим преимуществом гидродинамической обработки является то, что поверхность изделия не подвергается изменениям микроструктуры и не влияет на поведение готового изделия под нагрузкой.

Лазерная обработка: основана на испарении керамического материала под воздействием сфокусированного мощного потока света. Преимуществом такого метода обработки является то, что этой обработкой могут быть подвергнуты изделия любой твердости. Кроме того, под поверхностные повреждения значительно ниже, чем после механической обработки. Такие повреждения обусловлены высоким локальным разогревом материала при весьма низкой теплопроводности керамики, что и приводит к внутренним повреждениям. Такие повреждения можно сводить к минимуму, подбирая оптимальные значения мощности лазера и скорости резания. Большим преимуществом является возможность высокой автоматизации данного процесса. Кроме того, качество обработанной поверхности является одним из максимальных среди всех видов обработки керамики.

Лазерные технологии рассматривают как одно из перспективных направлений в изготовлении микроотверстий. Диаметр прошиваемых отверстий этим методом может достигать нескольких микрометров при значительной глубине в любых металлах, сплавах и керамике, обеспечивая при этом высокую производительность (технология лазерной микрообработки).

Разрушение материала под воздействием лазерного луча происходит вследствие скопления в ограниченной области пространства (характерного пятна облучения диаметром 10...100 мкм) весьма высоких плотностей потока мощности (до 10^{13} Вт/см²). При этом используется монохроматическое излучение в диапазоне длин волн от ультрафиолетовой (0,3 мкм) до инфракрасной (300 мкм) областей спектра магнитных колебаний

Взаимодействие твердой керамики с высокоинтенсивными наносекундными импульсами сильно отличается от взаимодействия с металлами. Лазерная обработка керамики является сложной задачей из-за большого рассеяния светового потока. Порог абляции выше, чем в металлах в 2...10 раз. Сочетание короткого импульса и короткой длины волны имеет лучшие показатели обработки, при этом в таких керамических материалах, как глинозем и нитрид кремния, не наблюдается следов плавления после их обработки.

Хотя керамика склонна к образованию трещин от термических напряжений, этого эффекта можно избежать путем выбора оптимальных режимов обработки, сохраняя температуру материала на низком уровне. Чаще всего это достигается за счет исключения возможности образования интенсивной плазмы. Время воздействия этой плазмы на материал больше,

чем воздействие лазерного импульса. При более длительных импульсах (микро- и миллисекунды) механизм разрушения материала включает процесс плавления. Поэтому использование режима плавление — разрезание материала сочетают с воздействием газовой струи высокого давления. Этот метод характеризуется высокими скоростями обработки, но оставляет остекленный слой, который является источником микротрещин.

Пример лазерно-индуцированной плазменной обработки представлен на рис. 8.5, где показана сферическая лунка диаметром 15 мкм и глубиной в центральной части 4,5 мкм на стеклянной подложке, обработанной электронами и ионами с использованием латунной плазмы при плотности энергии 4,2 Дж/см² и 2000 лазерных импульсов. Как можно заметить, лунка имеет острые края и зеркально гладкую поверхность

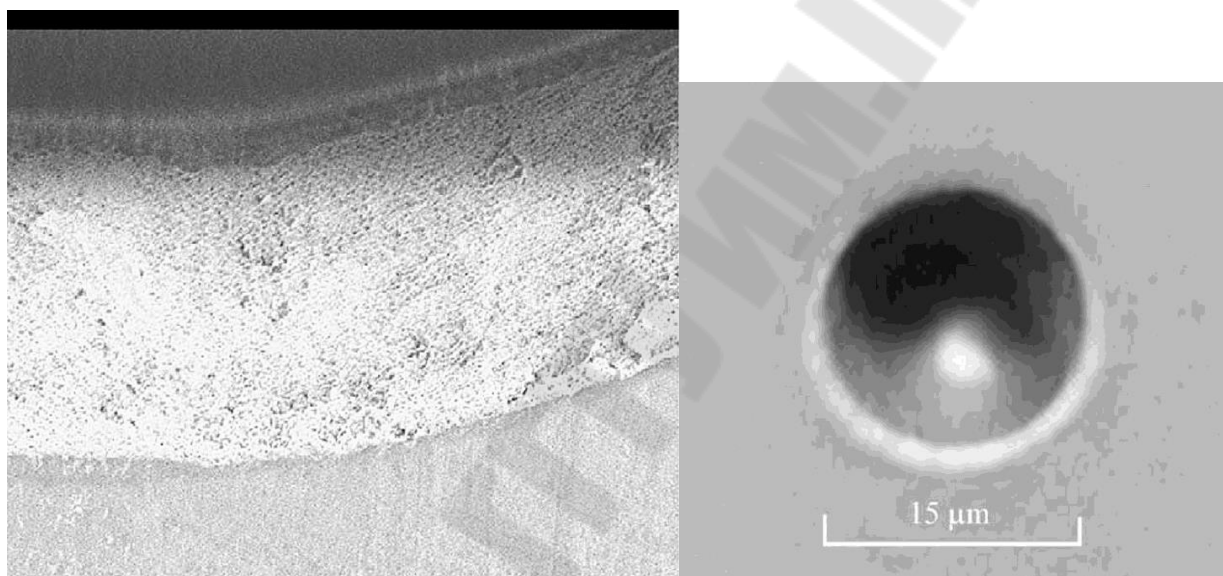


Рис. 8.5. Сферическая лунка диаметром 15 мкм и глубиной в центре 4,5 мкм на стеклянной пластине, обработанной с использованием лазерной индуцированной латунной плазмы: *а* - верхний край лунки с измененным слоем; *б* - внешний вид лунки (размер 15 мкм)

Для повышения *обрабатываемости материалов* применяются следующие способы:

- подбор оптимальных составов технологической среды - термическая обработка обрабатываемого материала;
- подвод в зону резания дополнительной энергии;
- изменение химического состава, введение в состав обрабатываемого материала легкоплавких добавок (висмут, селен, свинец и др.), которые не изменяют физико-механических свойств материала;
- регулирование микроструктуры за счет подбора режимов термической обработки;

- подогрев срезаемого слоя заготовки (лазерный плазменный).

Правильный подбор состава *технологической среды* снижает температуру в зоне резания, трение на площадках контакта, охрупчивание металла в зоне пластической деформации и т.д. Правильно подобрав состав технологической среды, можно резко снизить интенсивность изнашивания и улучшить качество обработанной поверхности.

Подвод в зону резания *дополнительной энергии* широко применяется при резании труднообрабатываемых материалов. В частности, производится их обработка в нагретом состоянии, с наложением электрических и магнитных полей, принудительных колебаний определенной частоты и т.д. Вследствие этого изменяется интенсивность изнашивания режущих кромок инструмента, а его период стойкости возрастает в несколько раз.

Регулирование микроструктуры за счет подбора режимов термической обработки для каждой группы материалов позволяет подобрать такой режим термообработки, который обеспечивает получение определенных микроструктуры и уровня механических свойств. Так, например, стали для хорошей обрабатываемости должны иметь следующую микроструктуру:

- малоуглеродистые ($C < 0,3 \%$) — пластинчатый перлит и феррит, резко выраженная строчечность феррита и крупные скопления его ухудшают обрабатываемость;

- со средним содержанием углерода ($C = 0,35...0,55 \%$) — пластинчатый перлит и феррит в виде сетки или некрупных зерен;

- высокоуглеродистые конструкционные ($C > 0,55\%$) и инструментальные стали — зернистый перлит.

Соответствующим образом подбираются виды термообработки (нормализация, отжиг) и их режимы.

Обрабатываемость чугуна можно улучшить графитизирующим или сфероидизирующим отжигом, исключаяющим появление сетки карбидов и обеспечивающим округлую форму зерен.

Термообработка труднообрабатываемых материалов определяет фазовый состав, процентное содержание фаз, их дисперсность и распределение, а также размеры зерен твердого раствора. При этом требуется выдерживать на определенном уровне число упрочняющих избыточных фаз, поскольку от них зависят и обрабатываемость, и жаропрочность материала. Для термообработки рекомендуется использовать двойную закалку с последующим высокотемпературным старением.

Изменение химического состава за счет введение в состав обрабатываемого материала легкоплавких добавок (висмут, селен, свинец и др.), которые не изменяют физико-механических свойств материала. Известны два механизма действия присадок. В первом случае снижается коэффициент трения на контактных площадках и интенсивность

изнашивания, поскольку присадки образуют в металле твердые смазочные вещества (сульфиды, селениды, сульфоселениды и др.). Во втором случае присадки, являясь концентраторами напряжений, способствуют охрупчиванию обрабатываемого материала, снижают силы резания и уровень температур.

Наиболее характерными присадками являются элементы, относящиеся к VI группе периодической таблицы Д.И. Менделеева — сера, селен, теллур, а так же свинец, которые образуют в стали неметаллические включения. Примером сталей повышенной обрабатываемости могут служить автоматные стали с повышенным содержанием серы (A11...A35), серы и фосфора (A12), серы и свинца (AC14). Свинец, в последнем случае, присутствует в сталях в двух модификациях: в виде мелких обособленных частиц, произвольно расположенных в матрице металла, и в виде комплексных соединений $MnS-Pb$. Свинец характеризуется низкой температурой плавления, поэтому кроме охрупчивающего действия он может создать на площадках контакта жидкую пленку. Установлено, что для резкого снижения склонности к схватыванию достаточно образования пленки толщиной около 2 мкм.

На состав, форму, размеры и распределение избыточных фаз существенным образом влияет этап выплавки стали, такой как раскисление, для чего используются кремний, алюминий, марганец и кальций. Кальций позволяет значительно улучшить обрабатываемость сталей. В их структуру входят силикаты или алюминаты кальция в сульфидной оболочке, образующие на поверхностях контакта обрабатываемого материала с режущим лезвием смазочные пленки. Это резко снижает коэффициенты трения на площадках контакта, силы и температуру резания, интенсивность изнашивания инструмента.

Лазерное (плазменное) терморезание является одним из методов улучшения обрабатываемости резанием, он заключается в искусственном подогреве материала срезаемого слоя заготовки до определенной температуры. Этот метод обработки эффективен, прежде всего, для обработки сталей и сплавов высокой прочности, тугоплавких материалов, а также нержавеющей и жаропрочных материалов. Применяют *плазменный, или лучевой нагрев, в электролите* (рис.8.6). В этом случае через электролит (25%-й водный раствор K_2CO_3), поступающий через специальную трубку, пропускают электрический ток повышенного напряжения (более 140В). Установка монтируется на суппорте станка и перемещается вместе с ним, безопасность эксплуатации обеспечивается предохранительным щитом. Данный способ обладает рядом достоинств: независимость степени нагрева от магнитных свойств материала заготовки, возможность нагрева заготовок с черной и неровной поверхностью, обеспечение защиты от воздействия внешней среды. Безокислительность нагрева обусловлена образованием в

зоне смачивания сплошной газовой оболочки, состоящей из водорода и положительных ионов металлов, входящих в состав электролита. Электрические разряды, наблюдаемые в оболочке, происходят по отдельным ярко светящимся каналам различной формы. Эти электронные и ионные разряды повышают давление и температуру (3500 С).

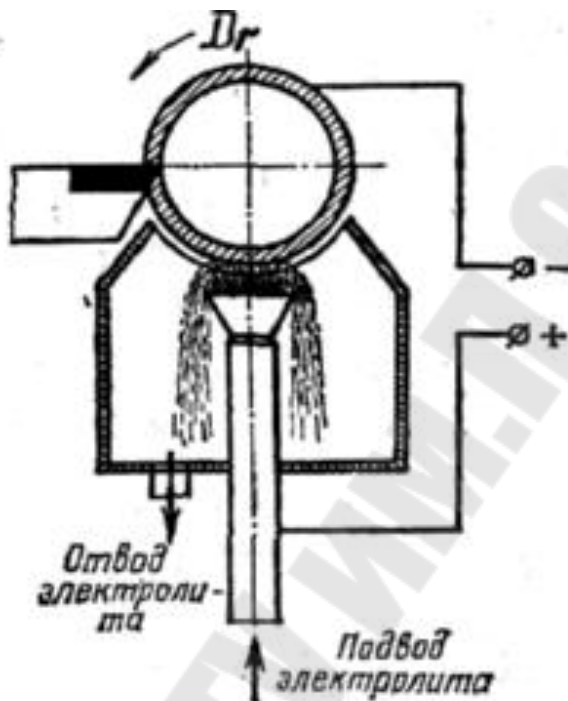


Рис. 8.6. Схема установки для локального нагрева заготовки

Предварительный нагрев плазменной горелкой, устанавливаемой в резцедержателе токарного станка, успешно применяется для обработки крупногабаритных деталей из высокопрочных материалов. Обработка производится на глубинах резания до 5 мм и подачах до 0,5 мм/об. Применение нагрева при резании ограничивается интенсификацией износа рабочих граней инструментов. Поэтому введение предварительного нагрева улучшает обрабатываемость в тех случаях резания, когда увеличение стойкости инструмента вследствие снижения удельной работы резания больше, чем отрицательное воздействие повышенных температур на увеличение интенсивности явлений схватывания и износа инструмента.

РАЗДЕЛ IX

КОМПЛЕКСНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ

Тема 9.1. Производительность процессов резания материалов и физико-химических методов обработки

Физико-химические методы обработки материалов являются энергоемкими, но высокопроизводительными. Однако их методы оправдываются тем, что ряд деталей машин, выполненных из различных материалов, не всегда возможно механическими методами обработки.

Электрофизические и электрохимические методы обработки, общее название методов обработки конструкционных материалов непосредственно электрическим током, электролизом и их сочетанием с механическим воздействием. С разработкой и внедрением в производство этих методов сделан принципиально новый шаг в технологии обработки материалов - электрическая энергия из вспомогательного средства при механической обработке (осуществление движения заготовки, инструмента) стала рабочим агентом. Всё более широкое использование электрофизических и электрохимических методов в промышленности обусловлено их высокой точностью, *производительностью*, возможностью выполнять технологические операции труднообрабатываемых материалов, которые невозможно подвергнуть обработке резанием.

Электроискровая обработка основана на использовании искрового разряда. При этом в канале разряда температура достигает 10000°C , развиваются значительные гидродинамические силы, но сами импульсы относительно короткие и, следовательно, содержат мало энергии, поэтому воздействие каждого импульса на поверхность материала невелико. Метод позволяет получить хорошую поверхность, но не обладает достаточной производительностью. Кроме того, при этом методе износ инструмента относительно велик (достигает 100% от объёма снятого материала). Метод используется в основном при прецизионной обработке небольших деталей, мелких отверстий, вырезке контуров, твердосплавных штампов проволочным электродом, то есть поверхности деталей, которые трудно обработать резанием.

Электроимпульсная обработка основана на использовании импульсов дугового разряда. В отличие от искрового, дуговой разряд имеет температуру плазмы ниже ($4000\text{—}5000^{\circ}\text{C}$), что позволяет увеличивать длительность импульсов, уменьшать промежутки между ними и т. о. вводить в зону обработки значительные мощности (несколько десятков кВт), т. е. увеличивать *производительность* обработки. Характерное для дугового разряда преимущественно разрушение катода приводит к тому, что

износ инструмента (в этом случае он подключается к аноду) ниже, чем при электроискровой обработке, составляя 0,05—0,3% от объёма снятого материала (иногда инструмент вообще не изнашивается). Более экономичный электроимпульсный метод используется в основном для черновой обработки и для трёхкоординатной обработки фасонных поверхностей.

Электроэрозионные методы особенно эффективны при обработке твёрдых материалов и сложных фасонных изделий, так как при обработке твёрдых материалов механическими способами большое значение приобретает износ инструмента. Преимущество электроэрозионных методов состоит в том, что для изготовления инструмента используются более дешёвые, легко обрабатываемые материалы. Часто при этом износ инструментов незначителен. Например, при изготовлении некоторых типов штампов механическими способами более 50% технологической стоимости обработки составляет стоимость используемого инструмента. При обработке этих же штампов электроэрозионными методами стоимость инструмента не превышает 3,5%. Условно технологические приёмы электроэрозионной обработки можно разделить на прошивание и копирование. Прошиванием удаётся получать отверстия диаметром менее 0,3 мм, что невозможно сделать механическими методами. В этом случае инструментом служит тонкая проволочка. Этот приём на 20—70% сократил затраты на изготовление отверстий в фильерах, в том числе алмазных. Более того, электроэрозионные методы позволяют изготавливать спиральные отверстия. При копировании получила распространение обработка ленточным электродом. Лента, перематываясь с катушки на катушку, огибает копир, повторяющий форму зуба. На грубых режимах лента «прорезает» заготовку на требуемую глубину, после чего вращением заготовки щель расширяется на нужную ширину. Более распространена обработка проволочным электродом (лента заменяется проволокой). Этим способом, например, можно получать из единого куска материала одновременно пуансон и матрицу штампа, причём их соответствие практически идеально. Возможности электроэрозионной обработки при изготовлении деталей сложной формы. Другие её разновидности: размерная обработка, упрочнение инструмента, получение порошков для порошковой металлургии и др.

По назначению электроэрозионные станки различают, как и металлорежущие, на универсальные, специализированные и специальные, по требуемой точности обработки — общего назначения, повышенной точности, прецизионные. Общими для всех электроэрозионных станков узлами являются устройство для крепления и перемещения инструмента (заготовки), гидросистема, устройство для автоматического регулирования межэлектродного промежутка (между заготовкой и инструментом).

Генераторы соответствующих импульсов (искровых или дуговых) изготавливаются, как правило, отдельно и могут работать с различными станками. *Основные отличия* устройства для перемещения инструмента (заготовки) в электроэрозионных станках от таковых в металлорежущих станках — отсутствие значительных силовых нагрузок и наличие электрической изоляции между электродами. Гидросистема состоит из ванны с рабочей жидкостью (технического масла, керосин и т. п.), гидронасоса для прокачивания жидкости через межэлектродный промежуток и фильтров для очистки жидкости, поступающей в насос, от продуктов эрозии.

Электроконтактная обработка основана на введении в зону механической обработки электрической энергии - возбуждении мощной дуги переменного или постоянного тока (до 12 кА при напряжении до 50 в) между, например, диском, служащим для удаления материала из зоны обработки, и изделием. Применяется для обдирки литья, резки и других видов обработки, аналогичных по кинематике движений почти всем видам механической обработки. *Преимущества метода* - высокая производительность (до $10^6 \text{ мм}^3/\text{мин}$) на грубых режимах, простота инструмента, работа при относительно небольших напряжениях, низкие удельные давления инструмента — $30\text{—}50 \text{ кН/м}^2$ ($0,3\text{—}0,5 \text{ кгс/см}^2$) и, как следствие, возможность использования для обработки твёрдых материалов инструмента, изготовленного из относительно мягких материалов.

Магнитоимпульсная обработка применяется для пластического деформирования металлов и сплавов (обжатие и раздача труб, формовка трубчатых и листовых заготовок, калибровка и т. п.) и основана на непосредственном преобразовании энергии меняющегося с большой скоростью магнитного поля, возбуждаемого, например, при разряде батареи мощных конденсаторов на индуктор, в механическую работу при взаимодействии с проводником (заготовкой). *Преимущества метода* — отсутствие движущихся и трущихся частей в установках, высокая надёжность и производительность, лёгкость управления и компактность, наличие лишь одного инструмента — матрицы или пуансона (роль другого выполняет поле) и др.

К лучевым методам обработки относится обработка материалов электронным пучком и световыми лучами. Электроннолучевая обработка осуществляется потоком электронов высоких энергий (до 100 кэВ). Таким путём можно обрабатывать все известные материалы (современная электронная оптика) позволяет концентрировать электронный пучок на весьма малой площади, создавать в зоне обработки огромные плотности мощности). Электроннолучевые станки могут выполнять резание (в т. ч. прошивание отверстий) и сварку с большой точностью (до $50 \text{ \AA}$). Основой электроннолучевого станка является электронная пушка. Станки имеют

также устройства контроля режима обработки, перемещения заготовки, вакуумное оборудование. Из-за относительно высокой стоимости, малой производительности, технической сложности станки используются в основном для выполнения прецизионных работ в микроэлектронике, изготовления фильер с отверстиями малых (до 5 мкм) диаметров, работ с особо чистыми материалами, что не возможно выполнить механическим методом.

Анодно-гидравлическая обработка широко используется в производстве для *извлечения из заготовки остатков застрявшего сломанного инструмента*. Скорость анодного растворения зависит от расстояния между электродами: чем оно меньше, тем интенсивнее происходит растворение. Поэтому при сближении электродов поверхность анода (заготовка) будет в точности повторять поверхность катода (инструмента). Однако процессу растворения мешают продукты электролиза, скапливающиеся в зоне обработки, и истощение электролита. Удаление продуктов растворения и обновление электролита осуществляются либо механическим способом (анодно-механическая обработка), либо прокачиванием электролита через зону обработки. Этим методом, подбирая электролит, можно обрабатывать практически любые *токопроводящие материалы*, обеспечивая высокую производительность в сочетании с высоким качеством поверхности. Используемые для анодно-гидравлической обработки электрохимические станки просты в обращении, используют низковольтное (до 24 в) электрооборудование. Однако значительные плотности тока (до 200 а/см²) требуют мощных источников тока, больших расходов электролита (иногда до 1/3 площади цехов занимают баки для электролита).

Производительность процесса физико-химической обработки материала выражается через скорость подачи электрода-инструмента. Производительность при неподвижных электродах можно оценить средней скоростью растворения металла

$$V_{ср} = Z / \tau, \text{ мм/с}, \quad (1)$$

Где **Z** - припуск на обработку, мм

τ - время процесса (протекания тока), часы.

В зависимости от припуска и начального межэлектродного зазора средняя скорость растворения составляет:

$$V_{ср} = 0,001 \dots 0,01 \text{ мм/с}.$$

При схемах прошивания, разрезания, точения и шлифования на врезание производительность (**Q**) оценивают скоростью подачи инструмента из уравнения

$$V_{и} = \frac{\eta \cdot \varepsilon \cdot \lambda_t \cdot U}{I_p}, \text{ мм/с},$$

где η - коэффициент выхода по току;

U – разность потенциала электродов, В;
 ε – коэффициент пропорциональности (электрохимический эквивалент);

l – перемещение инструмента-электрода к детали;

λ_i – удельная проводимость;

ρ – плотность электролита (материал), г/см³;

V_H – скорость электрода инструмента, мм/с.

В зависимости от вида обрабатываемой поверхности скорость подачи лежит в пределах $V_N = 0,005 \dots 0,1$ мм/с.

Если используется импульсный ток, то скорость подачи будет,

$$V_H^I = V_H / g \text{ мм/с,}$$

где g – скважность.

Подставляя выражение τ из уравнения (1) получаем,

$$V_H = \frac{I_p \eta \cdot \varepsilon \cdot \lambda_i \cdot U}{Z \cdot \left(S_0 + \frac{Z}{2} \right) \cdot \rho} \quad (2)$$

Для цельнотянутых труб с припуском до 0,5 мм на сторону $V_H = 1,5 \dots 6$ мм/с.

Если условия электролиза выбраны правильно, прохождение тока через ячейку приводит к растворению материала анода со скоростью, определяемой согласно первому закону Фарадея: — количество вещества, осажденного или растворенного при электролизе, пропорционально количеству пропущенного электричества

$$m = \varepsilon \cdot Q \quad (3)$$

где m — масса материала, растворенного с анода, г;

ε — коэффициент пропорциональности (электрохимический эквивалент);

Q — количество электричества, пропущенное через электролит Кл (А·с);

A — атомная масса элемента;

При использовании постоянного тока количество электричества находится из зависимости:

$$Q = I \cdot \tau,$$

где I — сила тока, А;

τ — время его прохождения (обработки), с.

Тогда зависимость (3) можно записать в виде

$$m = \varepsilon \cdot I \cdot \tau, \text{ г} \quad (4)$$

Электрохимический эквивалент ε определяется следующим образом:

$$\varepsilon = \frac{A \cdot n}{F}, \text{ г/Ас,}$$

где: n - валентность металла;

F - число Фарадея, равное 96500 (это количество электричества, необходимое для растворения 1 грамма – эквивалента металла), Кл/г - экв. или 26,8 А·ч/г-экв.

Числовые значения ε для различных элементов приводятся в справочных материалах.

Электрохимический эквивалент любого сплава можно найти через эквиваленты входящих в него элементов и через массовое содержание в % элемента k_i в сплаве.

Количества различных веществ, осажденных или растворенных одинаковым количеством электричества, пропорциональны их химическим эквивалентам.

Объединенный закон Фарадея гласит, что масса материала в граммах (m), осажденного или растворенного на электроде, пропорциональна произведению $\varepsilon \cdot I \cdot \tau$. Таким образом, обобщенный закон Фарадея можно записать так

$$m = \varepsilon \cdot I \cdot \tau / 26,8, \text{ г} \quad (5)$$

Поскольку каждый компонент сплава имеет свой электрохимический эквивалент, то соответственно и свою скорость анодного растворения.

Для практических целей необходимо знать скорость линейного растворения, которая позволяет найти скорость подачи инструмента при изготовлении деталей.

Масса металла, растворимого с анода получается меньше, чем по формуле закона Фарадея, так как количество электричества тратится на побочные реакции на электродах, образование газов, вторичные реакции.

Эти потери учитываются коэффициентом η и выходом по току.

Коэффициент η зависит от плотности по тока материала, заготовки, скорости прокатки, температуры и степени зашелости электролита.

Электролит — хлорид натрия:

- для конструкционных и низколегированных сталей;
- для жаропрочных сплавов $\eta = 0.85 \dots 0.93 = 0,85 \dots 0,93$;
- для титановых сплавов $\eta = 0.83 \dots 0.85$;

Электролит-нитрат натрия:

- для большинства сталей $\eta = 0,6 \dots 0,7$;

Для нормального протекания электрохимических реакций необходимо обеспечить интенсивный вынос продуктов обработки из межэлектродного промежутка (из зазора), поэтому электролит должен иметь определенную скорость.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бородина, Н.В. Практикум по теории резания металлов: учеб. пособие / Н.В. Бородина. – Екатеринбург: Изд-во ГОУ ВПО «Рос. гос. проф.-пед. ун-т», 2012. – 105 с.
2. Дальский, А.М. Справочник технолога-машиностроителя, том 2-х т. / А.М. Дальский, Суслов А.Г., Косилов А.Г. и др. – М.: Машиностроение-1, 2003. - 760 с.
3. Дечко, Э.М. Резание материалов и режущий инструмент / Э.М. Дечко, М.М. Дечко - Мн. : Вышэйшая школа, 2020. - 287 с.
4. Зубарев, Ю.М. Резание материалов и режущий инструмент : учебный / Ю.М. Зубарев, Р.Н. Битюков. – Санкт –Петербург: Лань, - 2022. – 288 с.
5. Косилов, А.Е. Справочник технолога машиностроителя, т.2 / А.Е.Косилова, Р.К.Мещерякова. - М.: Машиностроение,1985. – 497 с.
6. Нефедов, Н.А. Сборник задач и примеров по резанию металлов и режущему инструменту: учеб. пособие для техникумов./ Н.А. Нефедов, К.А.
7. Осипов. – 5-е изд., перераб. и доп. – Минск : Машиностроение, 1990. – 448с.
8. Ординарцев, И.А, Справочник инструментальщика / И.А. Ординарцев, Г.В. Филиппов Г.В, А.Н. Шевченко. – Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1987. – 846 с.
9. Общемашиностроительные нормативы режимов резания. Справочник: в 2-х т.Т.1 /А.Д. Локтев, И.Ф. Гуцин, В.А. Батуев и др.- Минск: Машиностроение, 1991. – 640 с.
10. Попок, Н.Н. Теория резания: Учебное пособие / Н.Н. Попок. – Минск: ИВЦ Минфина, 2019. – 372 с.
11. Подураев, В.Н. Физико – химические методы обработки / В.Н. Подураев, В.С. Камалов. - М.: Машиностроение, 1973. – 346с.
12. Подураев, В.Н. Технология физико–химических методов обработки / В.Н. Подураев. - М.: Машиностроение, 1985. – 264с.
13. Рыжкин, А.А. Обработка материалов резанием / / А.А. Рыжкин, К.Г. Шучев, М.М. Климов. - Ростов н/Д: Феникс, 2008. - 411 с.
14. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. / А.М. Дальский [и др.]; под общ. ред. А.М. Дальского, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова [и др.] – 5-е изд., Минск: Машиностроение, 2001. – 2 т.
15. Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки /Г.Л. Амитан [и др.]. – Л.: Машиностроение, 1988. – 719с.
16. Суворов, А.А. Металлорежущие инструменты (атлас конструкций) / А.А. Суворов, Г.С. Зайдлин, Г.М. Стискин. - М.: Машиностроение, 1979. - 64с.

18. Ящерицын, П.И. Теория резания. Физические и тепловые процессы в технологических системах: учебник для вузов / П.И. Ящерицын, М.Л. Еременко, Н.Э. Фельдштейн. - Мн.: Выш.шк., 2007. - 512 с.

19. ГОСТ 25762-83. Обработка резанием. Термины, определения и обозначения общих понятий.

20. ГОСТ 25761-83. Виды обработки резанием. Термины и определения общих понятий.

21. Энтелес, С.Е. Смазочно-охлаждающие технологические средства для обработки металлов резанием: Справочник / С.Е. Энтелес, Э.М. Берлинер. - М.: Машиностроение, 1986. - 352 с.

СОДЕРЖАНИЕ

РАЗДЕЛ I. РАЗРУШЕНИЕ – ЕДИНАЯ ОСНОВА МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ.....	1
РАЗДЕЛ II. ЛЕЗВИЙНАЯ ОБРАБОТКА РЕЗАНИЕМ МАТЕРИАЛОВ.....	10
РАЗДЕЛ III. АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА РЕЗАНИЕМ МАТЕРИАЛОВ	106
РАЗДЕЛ IV. РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ИНСТРУМЕНТОВ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ.....	123
РАЗДЕЛ V. ФОРМИРОВАНИЕ ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛИ.....	141
РАЗДЕЛ VI. ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЗАНИЯ.....	163
РАЗДЕЛ VII. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ.....	197
РАЗДЕЛ VIII. ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	261
РАЗДЕЛ IX... КОМПЛЕКСНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ.....	285
ЛИТЕРАТУРА.....	291