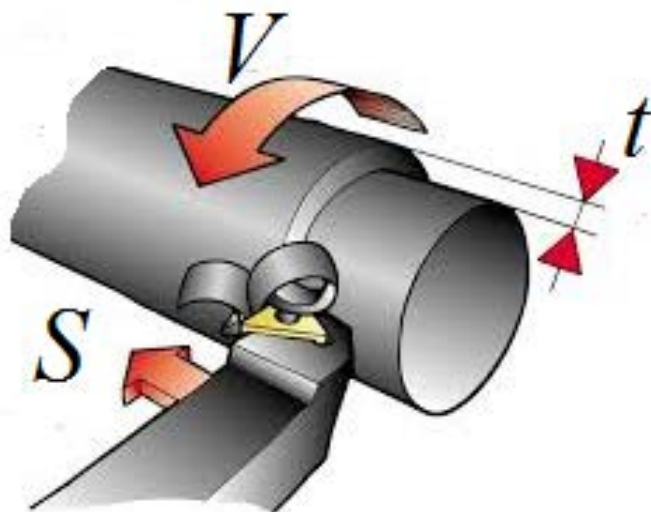


**Министерство образования и науки Российской Федерации
Саратовский государственный технический университет
имени Гагарина Ю.А.
Энгельсский технологический институт**



ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

Учебное пособие по курсу «Физические основы обработки материалов» и «Процессы и операции формообразования» для студентов направлений

15.03.05 – «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств», 15.03.01 – «Машиностроение» и

15.03.04 – «Автоматизация технологических процессов и производств» очной и заочной форм обучения

Энгельс 2021 г.

УДК 621.9.04
ББК 34.5

Тихонов Д.А., Стекольников М.В. Физические процессы обработки материалов: Учебное пособие по курсам «Физические основы обработки материалов» и «Процессы и операции формообразования» – Энгельс: Изд-во ЭТИ (филиал) СГТУ имени Гагарина Ю.А., 2021. – 188с.

Рецензенты: заведующий кафедрой «Технология и оборудование химических, нефтегазовых и пищевых производств» ЭТИ (филиал) СГТУ имени Гагарина Ю.А., д.т.н., проф. Целуйкин В.Н.

профессор кафедры «Электроэнергетика и электротехника» СГТУ имени Гагарина Ю.А. д.т.н., Кадыкова Ю.А..

Изложены основные физические процессы обработки конструкционных материалов.

Материал учебного пособия разбит на несколько разделов. В которых рассмотрены вопросы классификации основных методов обработки материалов, механическая обработка и теория резания, инструментальные материалы, обработка материалов давлением, термическая и химико-термическая обработка, а также формообразование с использованием концентрированных потоков энергии.

*Одобрено редакционно-издательским советом
ЭТИ (филиал) СГТУ имени Гагарина Ю.А.*

УДК 621.9.04
ББК 34.5

ISBN 978-5-9907992-9-5

Брошюра издается в авторской редакции

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
РАЗДЕЛ I. СВОЙСТВА И МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ.	6
Глава 1. Свойства обрабатываемых материалов.	6
Глава 2. Методы обработки материалов.	8
РАЗДЕЛ II. МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ.....	10
Глава 1. Понятия о системе резания как о совокупности одновременно совершаемых взаимосвязанных процессов.....	10
Глава 2. Кинематика процесса резания лезвийными инструментами.	13
2.1. Точение.....	13
2.2. Строгание.....	14
2.3. Сверление.....	15
2.4. Протягивание.....	15
2.5. Количественные характеристики движений при резании.....	17
2.6. Основные поверхности и плоскости, ориентирующие процесс резания в пространстве	18
2.7. Поверхности и плоскости относительно режущего инструмента.....	22
2.8. Единая геометрия режущих лезвий инструмента.....	22
2.9. Соотношение между углами инструмента, измеренными в главной секущей и нормальной плоскостях	24
2.10. Передний угол у спирального сверла.....	26
2.11. Углы в плане	29
2.12. Элементы режима резания. Сечение среза	30
2.13. Размеры и площадь среза при обработке.....	34
цилиндрической прямозубой фрезой	34
2.14. Срез при работе цилиндрической фрезой с винтовыми зубьями.	36
Глава 3. Физические основы процесса резания.....	41
3.1. Относительный сдвиг	44
3.2. Нарост.....	46
3.3. Контактные явления на рабочих поверхностях режущего инструмента.....	48
3.4. Силы резания	52
3.5. Аналитический расчет тангенциальной составляющей силы при свободном прямоугольном резании.....	54
3.6. Силы резания при продольном точении	56
3.7. Расчет момента резания при сверлении.....	58
3.8. Расчет сил резания при фрезеровании прямозубой цилиндрической фрезой... ..	60
3.9. Средний момент резания при фрезеровании.....	62
3.10. Силы резания при фрезеровании фрезой.....	64
с винтовыми зубьями	64
3.11. Силы резания при торцевом фрезеровании	66
3.12. Силы резания при протягивании	68
Глава 4. Инструментальные материалы.....	69
4.1 Углеродистые и легированные инструментальные стали.....	69
4.2 Быстрорежущие стали	71
4.3 Твердые сплавы.	74
4.4 Минералокерамика (режущая керамика).	77
4.5 Сверхтвердые синтетические поликристаллические инструментальные материалы (СТМ)	79
Глава 5. Абразивная обработка.....	84

5.1. Концентрация и размер абразивного зерна	85
5.2. Размеры среза при шлифовании	86
5.3. Тангенциальная составляющая силы резания, приходящаяся на одно активное зерно	90
Глава 6. Экспериментальные методы измерения сил резания	93
6.1. Виды динамометров	93
6.2. Планирование и обработка экспериментов	95
Глава 7. Экспериментальные методы измерения температур в зоне резания.	99
7.1. Температура в отдельных точках	99
7.2. Измерение средней температуры при резании	101
7.3. Способы измерения температур при резании	103
Глава 8. Износ инструмента.	106
8.1. Методы исследования износа	107
8.2. Критерии износа инструмента	111
РАЗДЕЛ III. ТЕРМИЧЕСКАЯ И ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА	115
Глава 1. Термическая обработка	115
1.1. Отжиг стали	115
1.2. Закалка стали	118
1.3. Отпуск стали	123
Глава 2. Химико-термическая обработка	125
2.1. Основы процессов химико-термической обработки	125
2.2. Цементация	126
2.2. Цементация	126
2.3. Нитроцементация	127
2.4. Цианирование	128
2.5. Борирование	129
2.6. Алитирование	129
2.7. Хромирование	129
РАЗДЕЛ IV. ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ ДАВЛЕНИЕМ	130
Глава 1. Физические основы обработки металлов давлением	130
Глава 2. Основные виды обработки металлов давлением	133
2.1. Прокатка	135
2.2. Волочение	139
2.3. Прессование	141
2.4. Ковка	144
2.4. Штамповка	148
РАЗДЕЛ V. ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ	160
Глава 1. Электроэрозионная обработка материалов	161
Глава 2. Электронно-лучевая обработка материалов	166
Глава 3. Лазерная обработка материалов	172
Глава 4. Электрохимическая обработка материалов	179
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	186

ВВЕДЕНИЕ

Обработка материалов является важной задачей в развитии современных технологий. Огромное количество разнообразных по свойствам материалов требует применение различных способов, методов и технологий по их обработки. Обработка материалов для получения изделий предусматривает придание ему необходимых размеров, формы и определенных свойств. В настоящее время существует широкий класс процессов: шлифование, резание, обработка давлением, прессование, термообработка, склеивание, пайка, сварка, пескоструйная обработка, эрозионная обработка, лазерная обработка, гидромеханическая обработка, обработка токами высокой частоты и др. Все эти процессы позволяют придавать конструкционным материалам необходимые свойства.

В настоящее время в период бурного развития техники и технологий современному специалисту необходимо знать всю гамму этих процессов для обоснованного выбора того или иного технологического процесса обработки различных материалов, а также знать физические основы процессов протекающих в них для более углубленного их понимания.

Существующие технологии обработки материалов описаны достаточно глубоко во многих книгах и учебниках. Однако все повышающаяся загруженность студентов не дает им возможности охватить большое количество литературы, так как в каждой отдельно взятой книге, учебнике или учебном пособии описан один или несколько процессов обработки. Это затрудняет освоение студентами дисциплины «Физические основы обработки материалов».

Содержание учебного пособия соответствует программе курса «Физические основы обработки материалов» и «Процессы и операции формообразования».

РАЗДЕЛ I. СВОЙСТВА И МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ.

Глава 1. Свойства обрабатываемых материалов.

Изделия машиностроения, а также других отраслей промышленности, изготавливаются из различных по физической природе, химическому составу и свойствам материалов. Большая часть изделий изготавливаются из материалов, находящихся в твердом агрегатном состоянии. Для получения изделий из таких материалов необходимо придать исходному материалу заданную по чертежу геометрическую форму и размеры, обеспечив точность размеров, формы и взаимного расположения поверхностей, а также конструктивных элементов изделия.

При этом материал в объеме изделия должен обладать определенными свойствами, которые также регламентированы конструкторской документацией.

К свойствам материала относятся:

- физические;
- химические;
- механические;
- технологические;
- эксплуатационные.

Свойства материалов определяют применение их в той или иной отрасли промышленности.

К физическим свойствам относятся:

- плотность;
- электро- и теплопроводность;
- намагниченность;
- температура плавления;
- температурные коэффициенты линейного и объемного расширения.

К механическим свойствам материала относятся:

- прочность;
- пластичность;
- твердость;
- ползучесть;
- ударная вязкость;
- усталость;
- износостойкость.

Прочность – способность твердого тела сопротивляться деформации или разрушению под действием статических или динамических нагрузок.

Пластичность – способность материала получать остаточное (остающееся после удаления нагрузки) изменение формы и размеров без разрушения. образца.

Твердость – способность материала сопротивляться внедрению в него другого, не получающего остаточной деформации, тела.

Ползучесть – свойство материала медленно деформироваться под действием постоянно растягивающей нагрузки, которая создает напряжение ниже предела упругости данного материала.

Ударная вязкость – способность материала поглощать энергию в процессе деформации и разрушения под действием ударной нагрузки.

Усталость материала – свойство постепенного накопления повреждений в материале под действием циклических нагрузок, приводящих к образованию трещин и разрушению.

Износостойкость – способность материала оказывать сопротивление изнашиванию, оцениваемое величиной обратной скорости изнашивания.

Технологические свойства характеризуются способностью материала приобретать заданную форму под действием различных факторов (температуры, давления и др.), подвергаться механической обработке, соединяться различными методами (сваркой, склеиванием) и т.д. Поэтому свойства имеют важное значение при выборе способа изготовления изделия, так как должны удовлетворять всему комплексу требований предъявляемых к изделию, соответствующее технической документации.

К технологическим свойствам материалов относятся:

- литейные свойства – это жидкотекучесть, усадка, склонность к ликвации;
- деформируемость;
- свариваемость;
- прокаливаемость;
- обрабатываемость режущим инструментом.

Жидкотекучесть способность расплавленного материала заполнять литейную форму.

Усадка – уменьшение линейных размеров (объема) залитого в форму материала в процессе остывания отливки.

Ликвация – сегрегация, неоднородность химического состава сплава, возникающая при его кристаллизации.

Текучесть – способность порошка заполнять пресс-форму.

Свариваемость – способность материала давать прочное неразъемное соединение при нагреве свариваемых кромок до температуры плавления или белого каления и приложения определенного давления (ударов или сжатия).

Деформируемость (ковкость) – способность материала принимать необходимую форму под действием внешней нагрузки без разрушения и при наименьшем сопротивлении.

Прокаливаемость – способность металла воспринимать закалку на некоторую глубину от поверхности.

Обрабатываемость – способность материала поддаваться обработке резанием. Критериями обрабатываемости являются режимы резания и качество поверхностного слоя.

К эксплуатационным свойствам материала относятся:

- Хладостойкость
- Жаропрочность
- Жаростойкость
- Антифрикционность и т.д.

Коррозионная стойкость – сопротивление материала действию агрессивных сред (кислотных, щелочных и т.п.).

Хладостойкость – способность материала сохранять требуемые пластические свойства при низких рабочих температурах.

Жаропрочность – способность материала сохранять требуемые механические свойства при высоких рабочих температурах.

Жаростойкость – способность материала сопротивляться окислению в газовой среде при высоких температурах.

Антифрикционность – способность материала прирабатываться по трущимся поверхностям к другому материалу.

Особенные требования предъявляются, как правило, к поверхностям изделий (деталей) к ним относятся:

- микрогеометрия (шероховатость, волнистость);
- оптические (отражение, рассеяние и поглощение света);
- микротвердость
- химическая активность

Шероховатость – называется совокупность микронеровностей, образующих рельеф поверхности и рассматриваемых в пределах участка, длина которого равна базовой длине.

Волнистость – называется совокупность периодически повторяющихся неровностей, у которых расстояния между смежными возвышенностями или впадинами превышают базовую длину.

Микротвердость – это твердость отдельных фаз и структурных составляющих, твердость внутри отдельных зерен материала, тонкого поверхностного слоя.

Глава 2. Методы обработки материалов.

Для обеспечения всего комплекса указанных свойств материала изделий необходимо подвергать их воздействию различных факторов:

- механических усилий;
- давлений;

- температуры;
- излучения и т.д.

То есть изучаемые в физике процессы в случае если они реализуются в управляемом виде могут выступать в качестве инструментов применяемых для достижения поставленных целей по формированию у изделий заданного комплекса свойств.

Подобный взгляд на методы и способы обработки материалов сформировался относительно недавно, одновременно с формированием единой физической картины мира, то же время обработка материалов сопровождает человечество на протяжении всей истории человечества. Так целые периоды истории человечества получили свои названия от материалов и технологий преобладавших в тот или иной период (каменный век, бронзовый век, железный век).

В рамках данного учебного пособия будут освещены комплекс методов и процессов, позволяющих оказывать на конструкционные материалы, в первую очередь формообразующее воздействие и некоторые методы, позволяющими изменять свойства материала (механические) не затрагивая его химический состав.

Такие процессы, как обработка материалов, подразумевает физическое воздействие на различные материалы с целью изменения их размеров, форм, характеристик, физико-механических свойств. Для достижения материалами необходимых характеристик и физико-механических свойств могут использоваться разные методики, к ним относятся:

– Механическая обработка материалов - группа методов формообразования, которые получили наибольшее распространение в машиностроении. Механическая обработка реализуется путем удаления части материала с поверхности заготовки (полуфабриката). Механическую обработку подразделяют на лезвийную и абразивную. Лезвийная обработка осуществляется одним или несколькими режущими клиньями, имеющими правильную геометрическую форму. Абразивная обработка осуществляется большим количеством абразивных зерен, имеющих неправильную геометрическую форму.

– Обработка материалов давлением – группа методов, при которых формообразование осуществляется за счет пластической деформации материала. Является разновидностью метода механической обработки, однако в силу особенностей относятся к применяемому оборудованию, инструменту, дополнительным фактором (нагрев, деформация и т.д.) рассматриваются отдельно.

– Термическая (в том числе химико-термическая и термомеханическая) обработка – методы физического воздействия на конструкционные материалы, при которых достигается изменение свойств материалов. В основном термической обработке подвергаются

металлические сплавы для того чтобы в их структуре произошли под воздействием изменяющейся температуры фазовые превращения, а также была скорректирована их поликристаллическая структура.

– Обработка концентрированными потоками энергии (КПЭ)- это методы применяемые для термического воздействия на материалы, в целях проведения технологических операций сварки, термической обработки, резки, размерной обработки, маркирования, напыления, наплавки и т.д. К числу таких средств относят газовое пламя, электрический разряд, электрическую дугу, пучок электронов, световой луч, поток ионов и т.д. Также существует понятие источников КПЭ. К ним относятся лазеры, плазмотроны, электронно-лучевые установки и т.д.

В понятие обработки материалов входит огромное количество разнообразных технологий и методик, находящих применение в современной промышленности и производстве.

С помощью этих технологий и методик можно варьировать форму, размеры, особенности материалов. Они могут применяться самостоятельно или в сочетании друг с другом.

РАЗДЕЛ II. МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ.

Глава 1. Понятия о системе резания как о совокупности одновременно совершаемых взаимосвязанных процессов.

Процесс резания материалов заключается в снятии с заготовки определенного слоя материала с целью получения из нее детали, имеющей необходимую форму и размеры с соответствующим качеством обработанных поверхностей.

Резание металлов представляет собой сложный процесс, который сопровождается интенсивным трением на контактируемых поверхностях изделия с инструментом, различными видами пластической деформации, разрушением материала в таких экстремальных условиях, которые обычно не встречаются ни при испытании прочности материала, ни в других технологических процессах. Процесс резания изучается экспериментально и на идеализированных физических моделях с использованием математического анализа. Некоторые из этих моделей, предложенные рядом ученых в области теории резания, рассмотрены в данной учебном пособии.

Обработка металлов резанием является самым распространенным способом формообразования деталей. Несмотря на значительное развитие способов формообразования без снятия стружки (таких как литье,ковка,

штамповка, прессование) обработка резанием остается основным завершающим процессом изготовления деталей. Доминирующее значение этого технологического процесса в промышленном производстве объясняется, прежде всего, его универсальностью и возможностью достижения высокой степени точности и качества обработанных поверхностей. Появление новых конструкционных материалов: жаропрочных и высокопрочных, коррозионностойких, тугоплавких сталей и сплавов, непрерывное возрастание требований к точности размеров и к геометрической форме деталей, их качеству предполагают более глубокое изучение процесса резания и явлений, которыми сопровождается механическая обработка.

Процесс резания представляет собой совокупность физико-химических явлений, в которую входят кинематика процесса резания, пластические деформации и разрушения в зоне стружкообразования, напряженное состояние инструмента и заготовки, трение, тепловые, химические и др. явления, протекающие на контактных площадках режущего инструмента. Все они вместе взятые тесно связаны между собой и образуют единую систему резания. Структурная схема процесса резания определяет взаимосвязь между входными и выходными параметрами процесса, которые связаны между собой процессом резания (рис.1.1).

Входные параметры характеризуют систему СПИД – станок, приспособление, инструмент, деталь. Их можно разделить на 2 группы. Первая характеризует заготовку, параметры которой задаются конструктором (деталь - ее материал и размеры) и технологом (способ получения заготовки, припуск, точность). Вторая группа характеризует станок, его параметры, схему обработки, инструмент, режимы резания, приспособление, технологическую среду.

Выходные параметры определяются как результат воздействия процесса резания на заготовку (они определяют ее эксплуатационные характеристики: точность, качество поверхностного слоя (шероховатость, наклеп)) и на инструмент (его стойкость, прочность), а также характеризуют производительность и экономичность процесса резания.

Для более глубокого понимания процесса резания необходимо всестороннее представление о кинематике процесса резания и об особенностях стружкообразования при различных видах обработки, знания в области динамики процесса резания и тепловых явлений, знание закономерности износа инструментов и умение рассчитывать наиболее рациональные режимы обработки, которые обеспечивали бы необходимые оптимальные выходные параметры процесса резания.

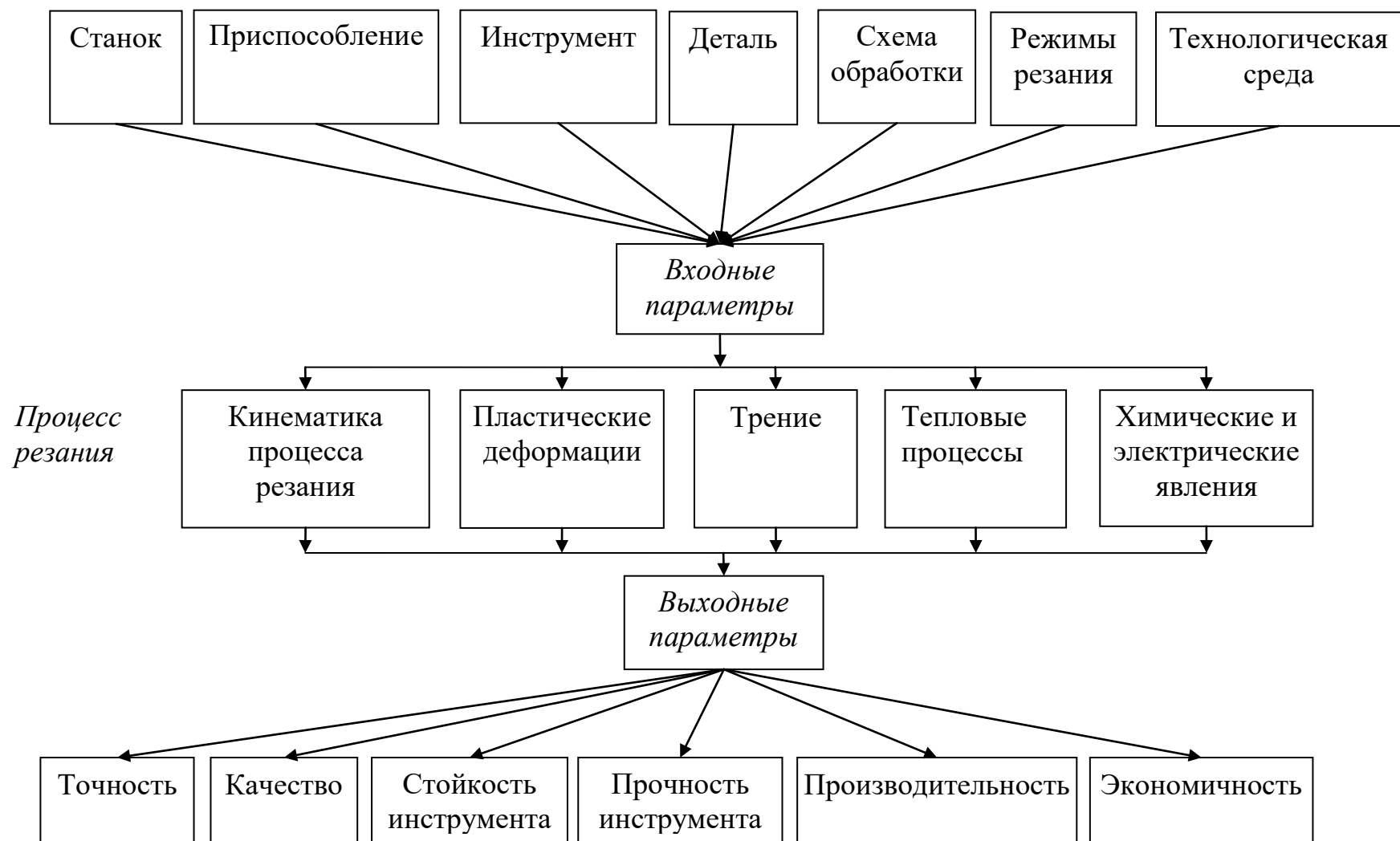


Рис.1.1. Структурная схема процесса резания

Глава 2. Кинематика процесса резания лезвийными инструментами.

Для осуществления процесса резания необходимы относительные перемещения обрабатываемой детали и режущего инструмента. Это суммарное перемещение на металлорежущих станках задается в виде трех движений:

- главное движение;
- движение подачи;
- перемещение по направлению режущей кромки инструмента.

Последнее движение не всегда присутствует в кинематике резания, тогда как главное движение и движение подачи необходимы – без них процесс резания невозможен.

Рассмотрим кинематические особенности различных методов процесса резания.

2.1. Точение

Процесс точения осуществляется на токарных станках, где формируются наружные и внутренние поверхности тел вращения. Для осуществления обработки обрабатываемая деталь закрепляется на шпинделе станка и ей сообщается вращательное движение со скоростью V – это главное движение в кинематике точения.

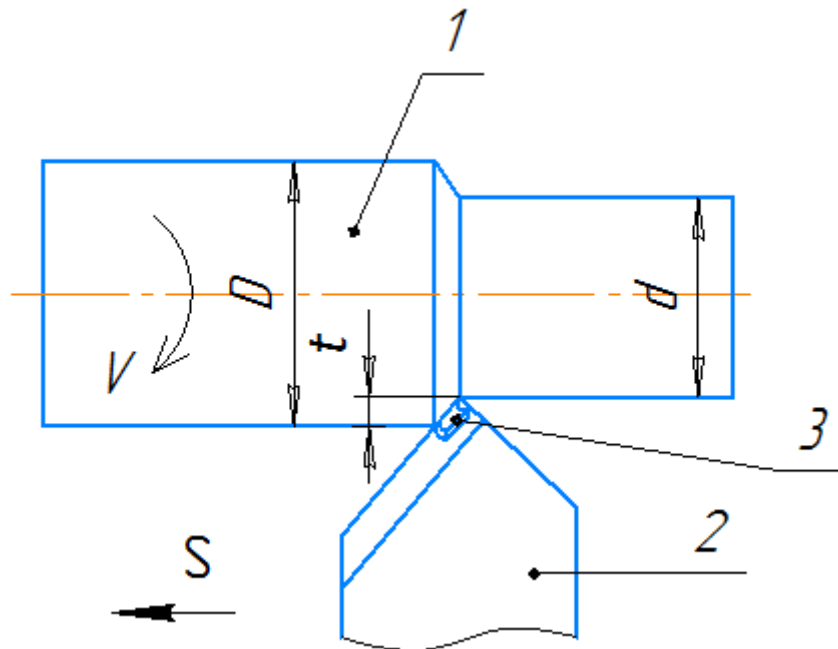


Рис.2.1. Процесс точения наружной цилиндрической поверхности: 1-обрабатываемая заготовка; 2-токарный резец; 3- стружка

Инструмент – токарный резец – закрепляется в резцедержателе станка и ему сообщается, как правило, прямолинейное перемещение – это движение подачи. Движение подачи может задаваться параллельно оси вращения обрабатываемой детали при формировании цилиндрической поверхности, перпендикулярно оси вращения детали при обработке торца. Движение подачи может задаваться также в направлении под некоторым углом к оси вращения детали при формировании конической наружной или внутренней поверхности. На рис.2.1 приведена схема процесса точения цилиндрической поверхности. С заготовки диаметром D снимается слой материала толщиной t , в результате чего образуется цилиндрическая поверхность диаметром d . Для этого обрабатываемой детали 1 сообщается вращение со скоростью V (главное движение), а инструменту 2 сообщается движение подачи со скоростью S .

2.2. Стругание

Процесс строгания осуществляется на строгальных станках и используется для формирования плоскости на обрабатываемой детали. Различают поперечнострогальные и продольнострогальные станки. Первые применяются для обработки сравнительно малогабаритных деталей. На поперечнострогальном станке главное движение сообщается инструменту со скоростью V (рис.2.2), а движение подачи получает обрабатываемая деталь в направлении, перпендикулярном главному движению. Движение подачи происходит периодически на расстояние S за каждый двойной (прямой и обратный) ход инструмента.

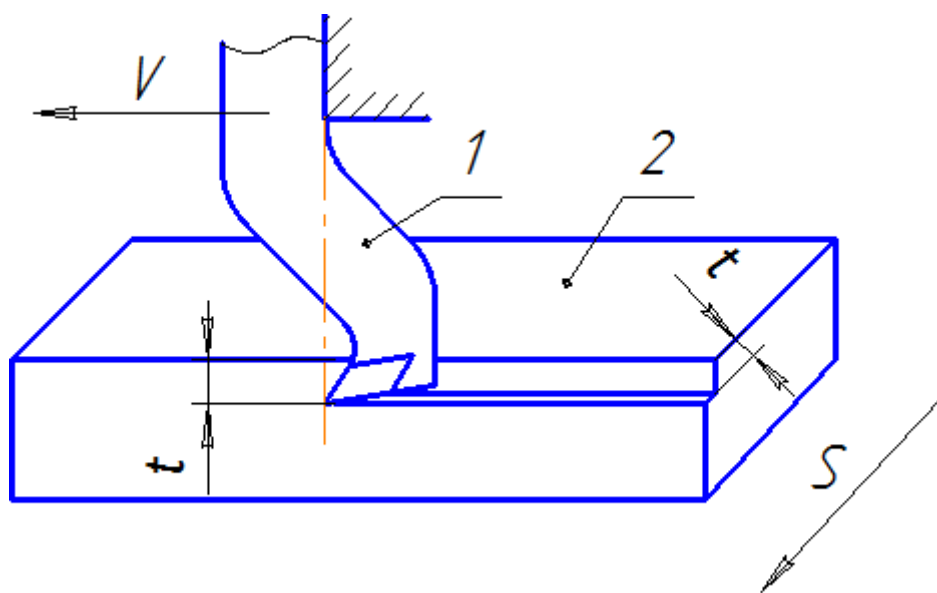


Рис. 2.2. Процесс строгания: 1-строгальный резец, 2-обрабатываемая деталь

На продольнотрогальных станках обрабатываются крупногабаритные детали. Здесь главное движение сообщается обрабатываемой детали, закрепленной на столе станка, а движение подачи сообщается инструменту, который закрепляется на траверсе станка.

2.3. Сверление

Процесс сверления – обработка отверстий – осуществляется, главным образом, на сверлильных и расточных станках. Главное движение при сверлении – это вращение инструмента – сверла со скоростью V ; движение подачи – осевое перемещение сверла со скоростью S (рис 2.3).

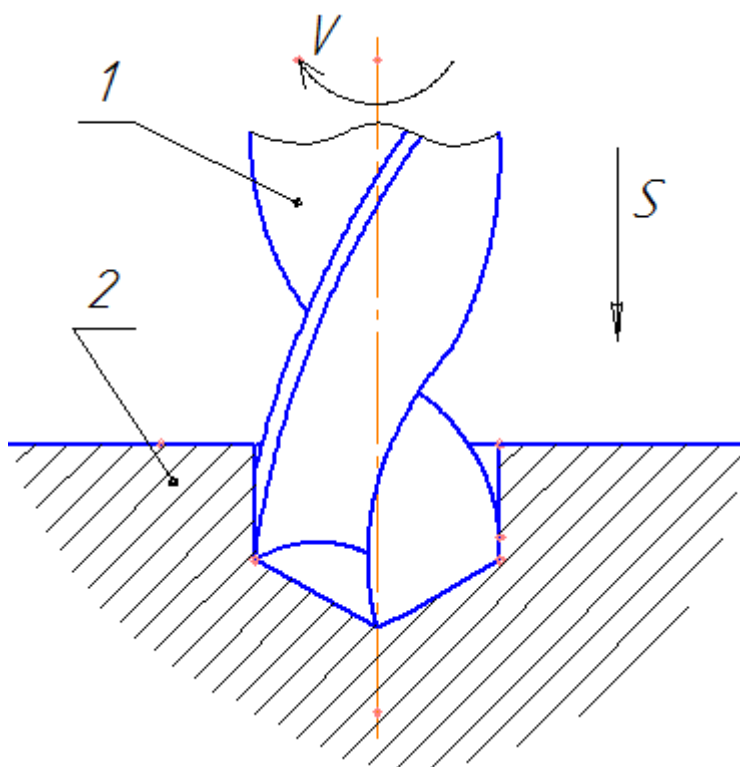


Рис. 2.3. Процесс сверления: 1-сверло, 2-обрабатываемая деталь

Сверление может осуществляться и на токарных станках. В этом случае главное движение сообщается обрабатываемой детали, закрепленной на шпинделе станка. Инструмент – сверло – устанавливается в пиноли задней бабки станка и ему сообщается движение подачи, т. е. перемещение в направлении оси инструмента.

2.4. Протягивание

Протягивание – один из самых производительных процессов; используется для обработки плоскостей, отверстий различной формы, шпоночных пазов, зубчатых колес и других деталей. Обработка изделия

происходит за одно движение инструмента – перемещение протяжки со скоростью V . Это – главное движение при резании. Движение подачи заложено в конструкции протяжки. Так, например, при круглом протягивании (обработка цилиндрического отверстия), показанном на рис.2.4, движение подачи определяется тем, что диаметр каждого следующего зуба протяжки 1 больше предыдущего на величину, равную двойной толщине среза, т. е. на величину $2a$.

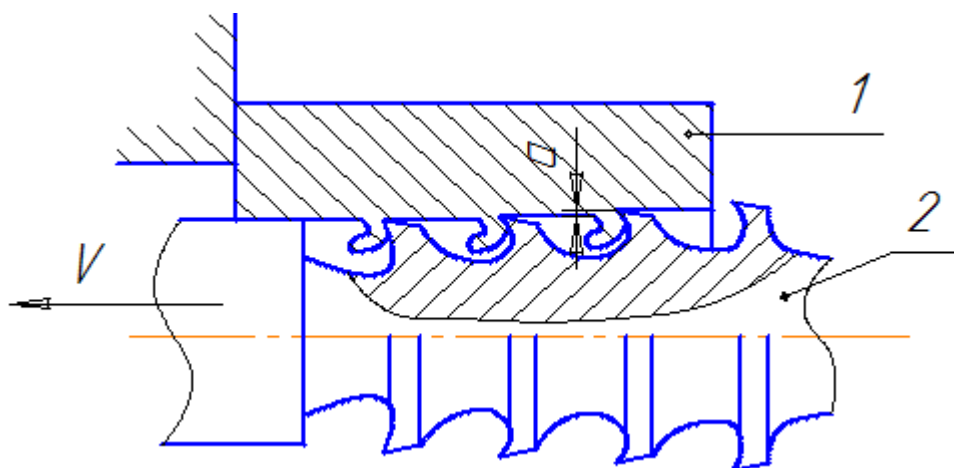


Рис. 2.4. Процесс протягивания: 1-обрабатываемая деталь, 2-круглая протяжка

В рассматриваемых примерах в кинематике процесса резания обязательно присутствуют два движения: главное движение и движение подачи (для протяжки в неявном виде).

В некоторых случаях в кинематике процесса резания может присутствовать еще одно движение – движение по направлению режущей кромки. Схема процесса точения, когда присутствует движение по направлению режущей кромки, приведена на рис. 2.5. Здесь главное движение – вращение обрабатываемой детали со скоростью V ; движение подачи – перемещение инструмента со скоростью S . Инструмент состоит из державки 1, на которой с помощью оси 2 смонтирован круглый резец 3, который может свободно вращаться относительно державки 1. В процессе резания таким инструментом образуется стружка «С», которая, перемещаясь по передней поверхности круглого резца, приводит его в движение – вращение на оси 1. Это движение может осуществляться и принудительно от специального устройства.

Практическое использование таких инструментов показало высокую эффективность процесса: стойкость круглых вращающихся резцов (КВР) повышается в 50...100 раз по сравнению с обычным резанием. КВР таят в себе большие резервы и в аспекте повышения качества обработки. Однако процесс резания в некоторых случаях сопровождается вибрациями, что сдерживает их широкое применение.

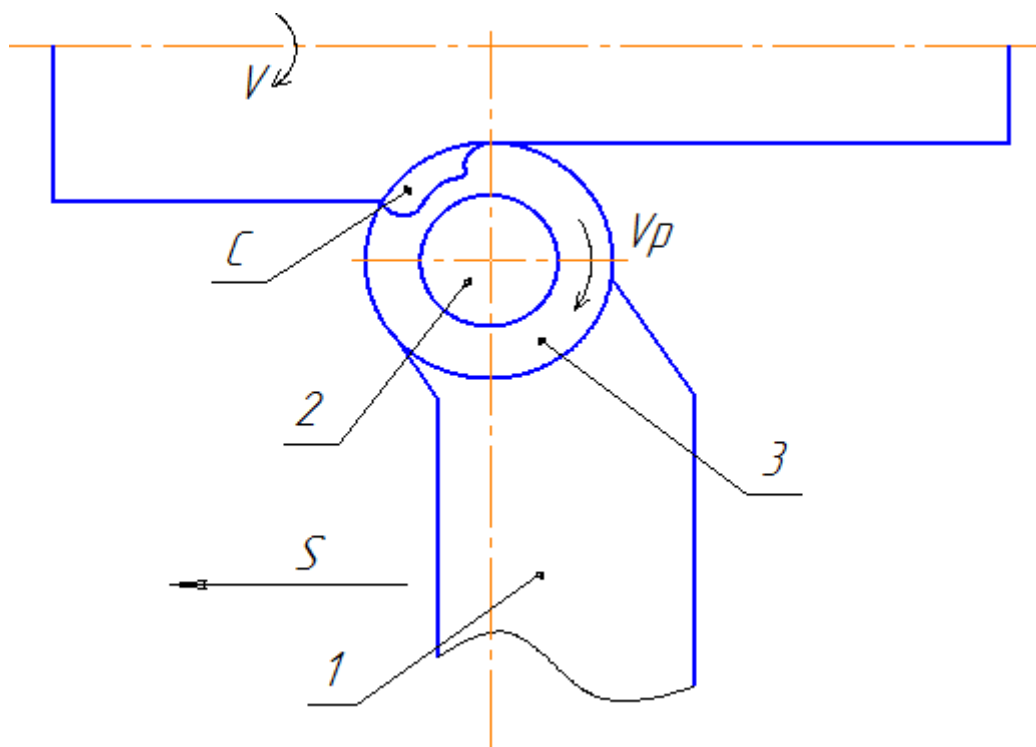


Рис. 2.5. Схема точения КВР

2.5. Количественные характеристики движений при резании

Скорость резания задается в м/мин и рассчитывается относительно частоты вращения детали или инструмента по формуле

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

где D – диаметр детали или инструмента, мм;

n – частота вращения.

Движение подачи. Различают три вида подач. Основной формой подачи является перемещение детали или инструмента за один оборот главного движения. Такая подача обозначается буквой S с размерностью мм/об. Если инструмент имеет зубья (например, сверло, зенкер, развертка, фреза), то подача может быть задана в мм на один зуб:

$$S_z = \frac{S}{z}, \text{ мм/зуб,}$$

где z – число зубьев инструмента.

На фрезерных станках величина подачи устанавливается как производительность процесса, т. е. в мм/мин ($S_{\text{мин}}$). Поэтому соотношение между различными подачами задается следующим выражением:

$$S_{\text{мин}} = S n = S_z z n.$$

2.6. Основные поверхности и плоскости, ориентирующие процесс резания в пространстве

Определения

Обрабатываемая поверхность – это поверхность, с которой снимается стружка (на рис. 2.6 это поверхность А).

Б – обработанная поверхность – поверхность, которая получена в результате обработки.

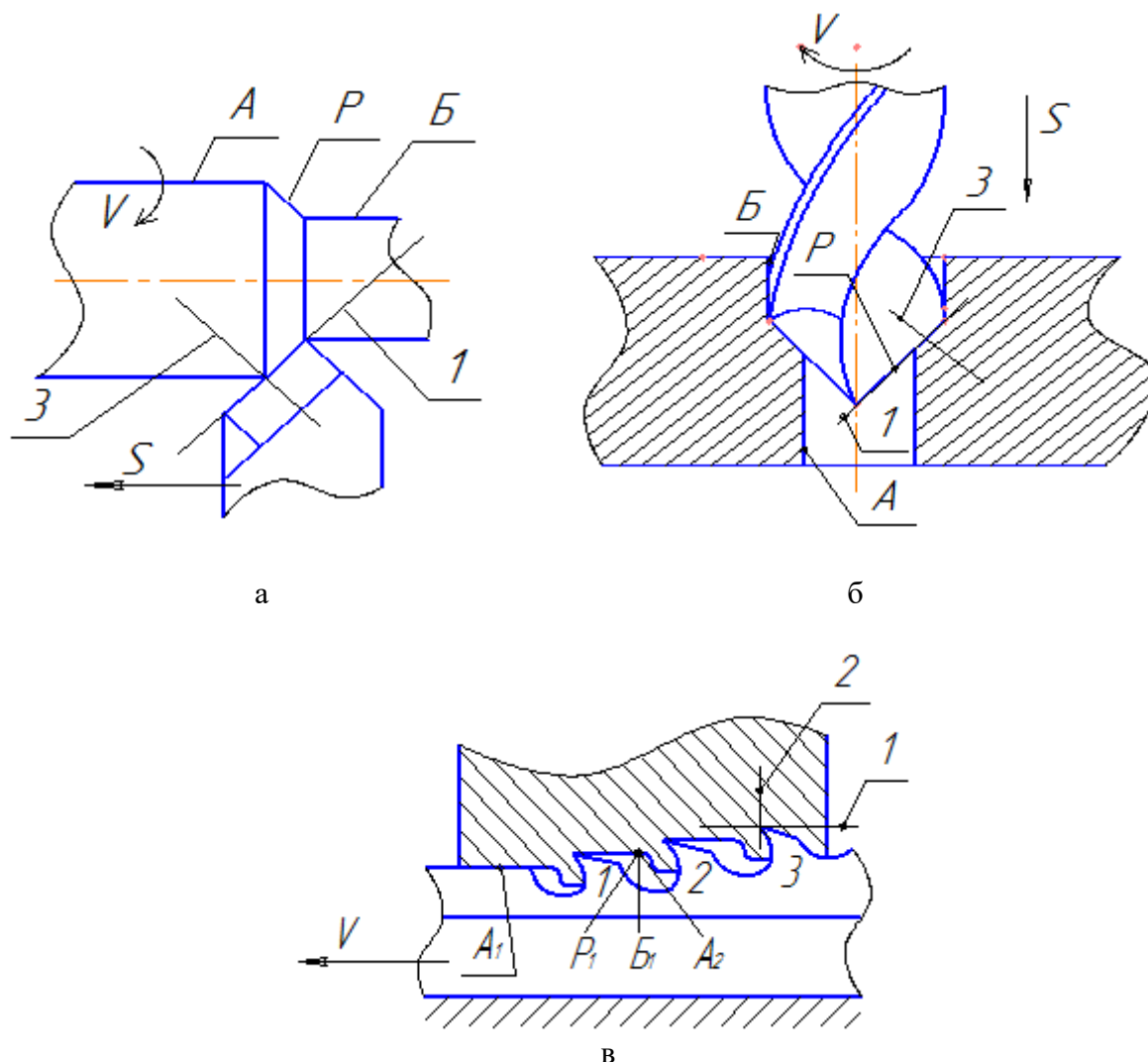


Рис. 2.6. Поверхности и плоскости, ориентирующие различные процессы резания

P – поверхность резания – это поверхность, представляющая собой совокупность траекторий движений точек активной части режущих лезвий по отношению к обрабатываемому изделию (поверхность, образуемая режущей кромкой на изделии в данный момент времени). При точении и сверлении (рис. 2.6,а,б) – это конические винтовые поверхности – P ; при плоском протягивании для каждого зуба свои поверхности. Так, например,

для зуба 1 (рис. 2.6,в) поверхности B_1 и P_1 – соответственно обработанная поверхность и поверхность резания, для зуба 2 это будет уже обрабатываемая поверхность A_2 и т. д.

Плоскость резания – это плоскость, касательная к поверхности резания в данной точке режущей кромки инструмента. На рис. 2.6 следы этой плоскости обозначены цифрой 1. В плоскости резания лежит вектор скорости главного движения при резании.

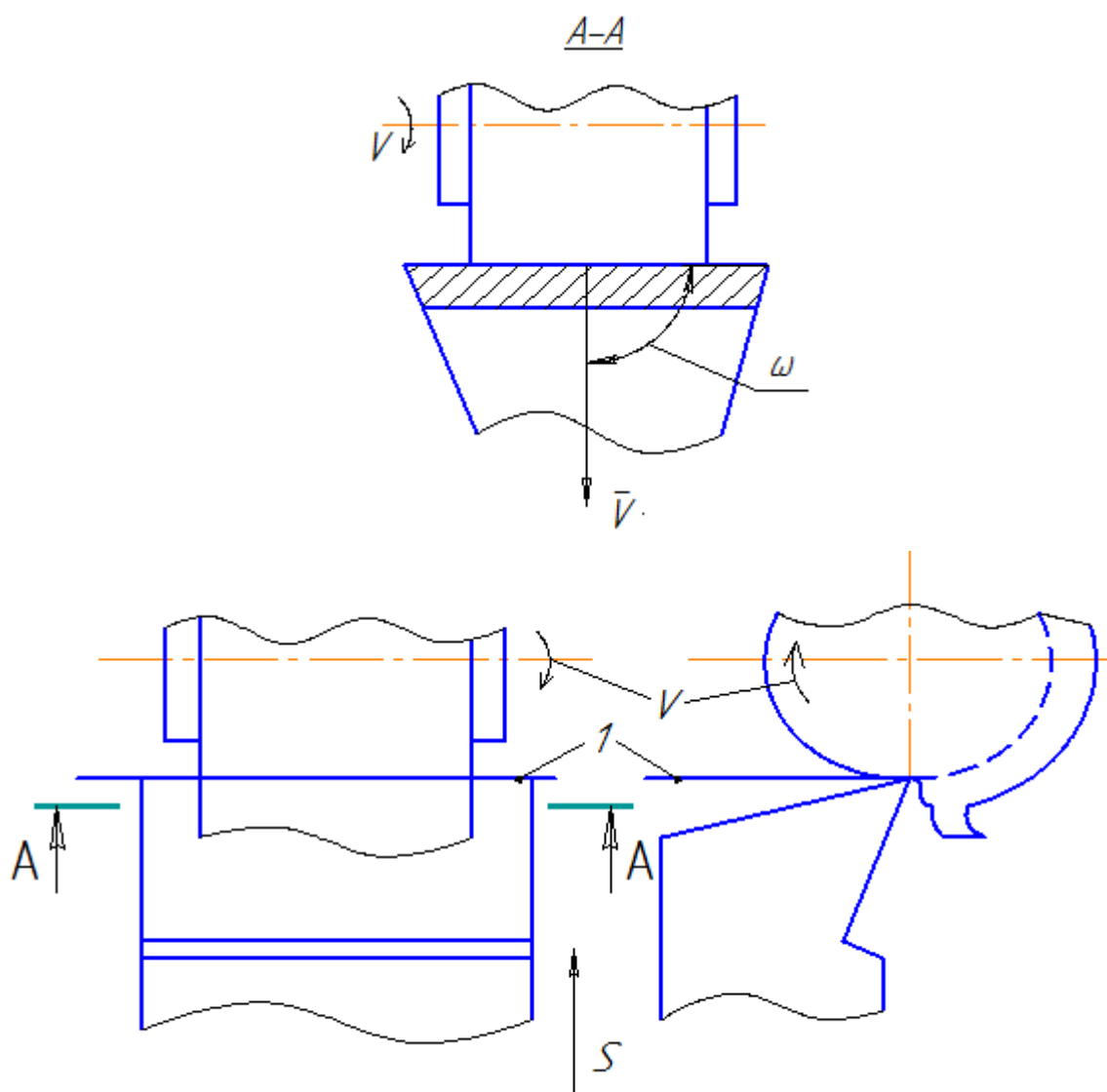


Рис. 2.7. Схема свободного резания при точении: 1 – плоскость резания

Основная плоскость – это плоскость, проходящая через данную точку режущей кромки инструмента перпендикулярно к вектору, характеризующему скорость перемещения изделия по отношению к инструменту в данной точке. Поскольку скорость главного движения на несколько порядков превышает скорость движения подачи при резании, то основную плоскость можно определять как плоскость, перпендикулярную к вектору скорости главного движения при резании в данной точке

режущей кромки. На рис. 2.6,а и 2.6,б этой плоскостью является плоскость рисунка, на рис. 2.6,в – след плоскости, обозначенной цифрой 2.

Главная секущая плоскость – это плоскость, перпендикулярная проекции главной режущей кромки на основную плоскость. На рис. 2.6,а и 2.6,б эта плоскость образует след – линии 3; на рис. 2.6,в – это плоскость чертежа.

Нормальная плоскость – это плоскость, перпендикулярная главной режущей кромке. Если главная режущая кромка представляет собой кривую, то в данной точке режущей кромки нормальная плоскость проводится к касательной. При работе с инструментами с прямолинейными кромками различают *свободное* резание и *несвободное* резание.

Свободным резанием называют такой процесс, когда съём материала с заготовки производится одним лезвием, и при этом на передней поверхности инструмента нет препятствий для перемещения стружки (рис. 2.7). Свободное резание может быть прямоугольным, когда угол $\omega = \pi/2$, и косоугольным при отличном от $\pi/2$ угле ω .

На рис. 2.8 представлена схема несвободного резания при точении. Активная часть режущей кромки резца 1-2 не является свободной для резания, так как она ограничена справа вспомогательной режущей кромкой, формирующей правую сторону шероховатостей R_z .

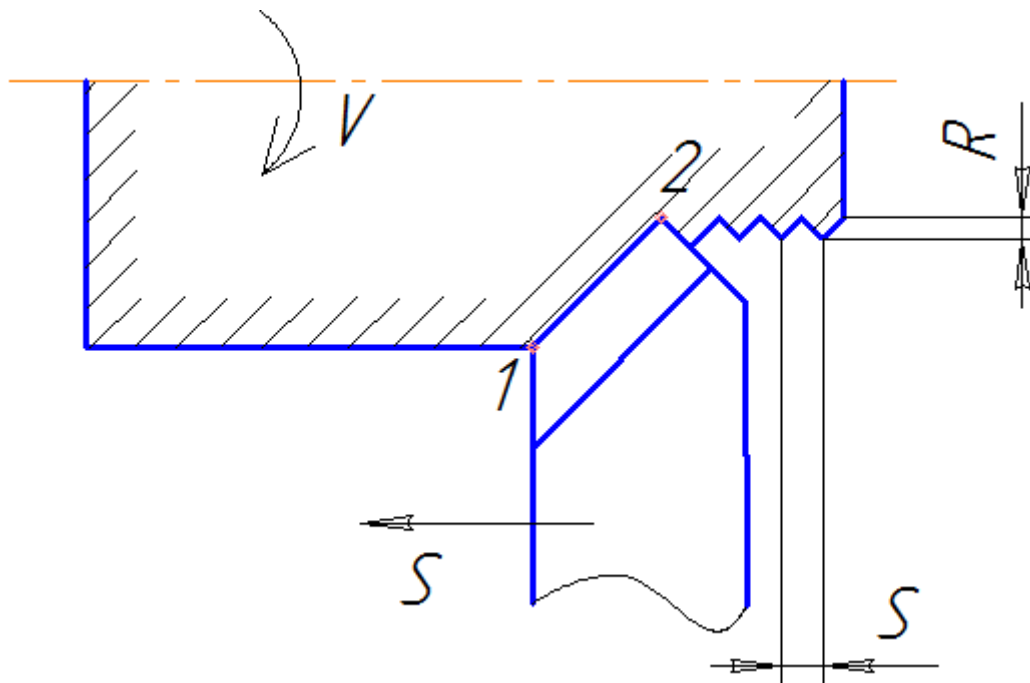


Рис.2.8. Схема несвободного резания при точении

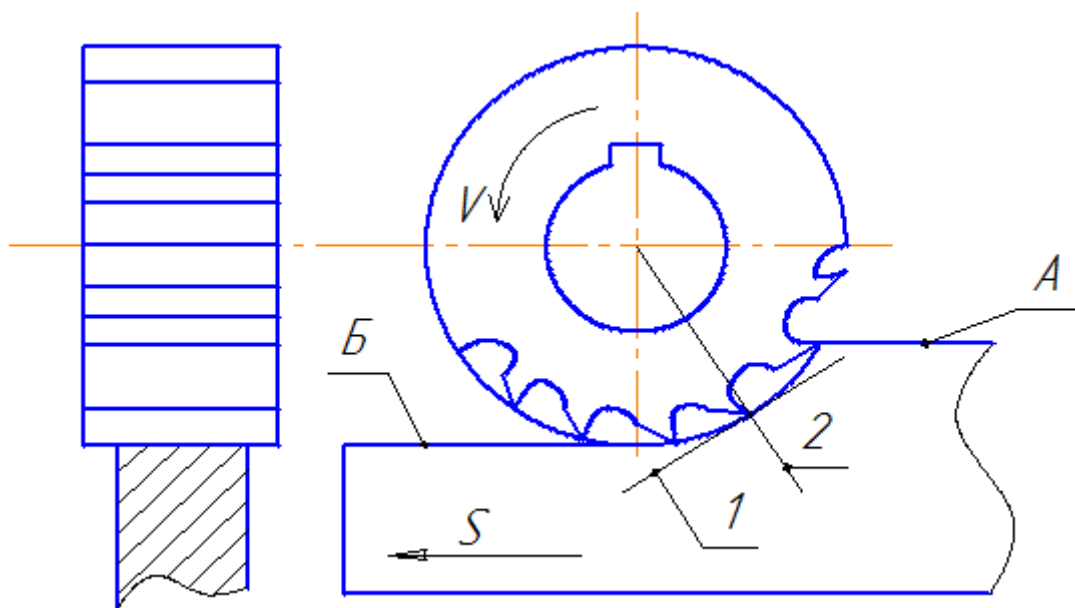


Рис. 2.9. Схема свободного резания при фрезеровании: 1 - след плоскости резания; 2 - основная плоскость; А - обрабатываемая поверхность; Б - обработанная поверхность

На рис. 2.9 представлена схема свободного резания при фрезеровании, где зуб фрезы движется по окружности, поэтому меняется положение плоскости резания 1 и основной плоскости 2.

Основная плоскость 1 при сверлении (рис. 2.10) для различных точек режущей кромки имеет различное положение, которое определяется вектором скорости $\vec{V}$.

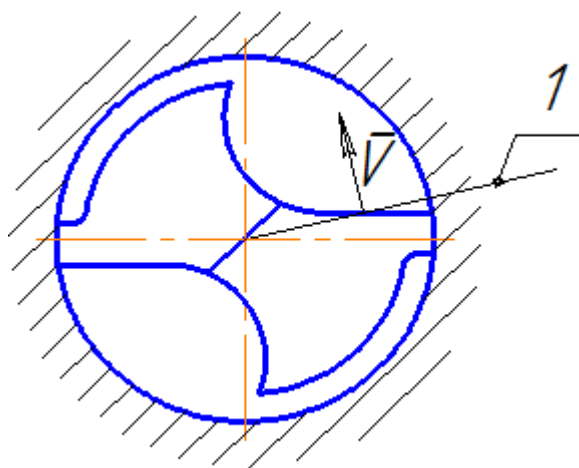


Рис. 2.10. Основная плоскость 1 при сверлении

Положение основной плоскости (0-0) и плоскости резания (Р-Р) для различных точек режущей кромки имеют различное расположение и при свободном косоугольном резании (рис.2.11).

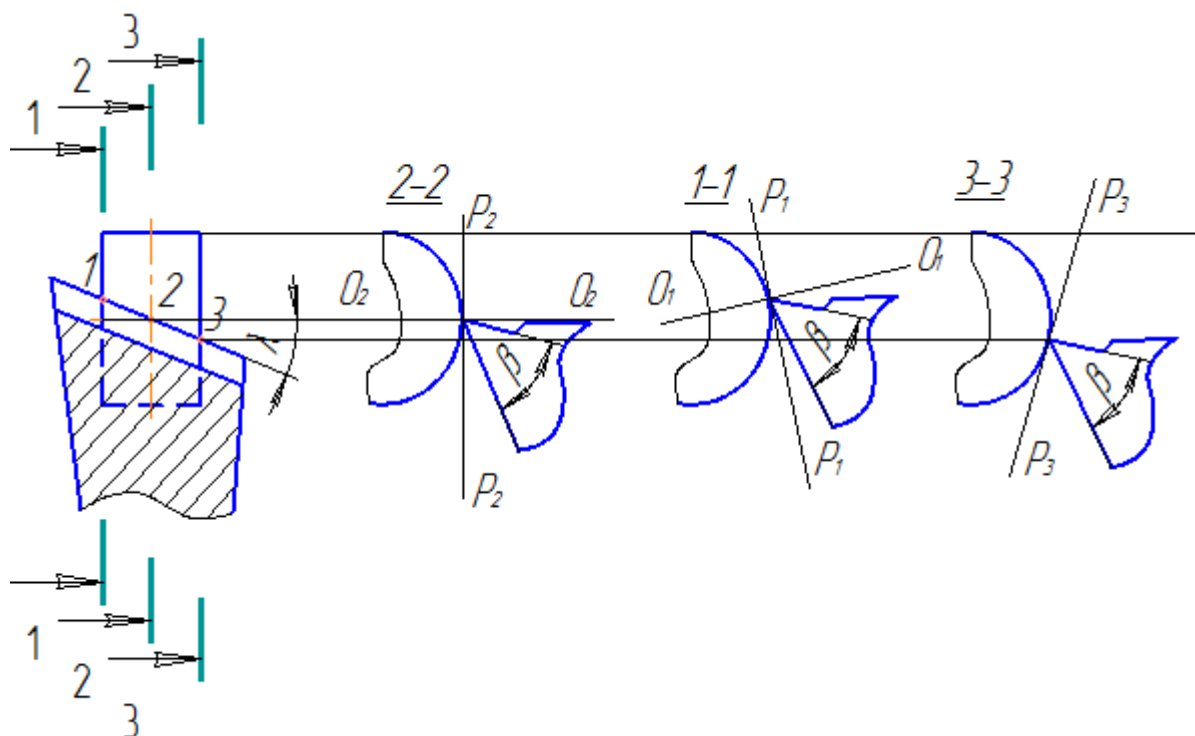


Рис. 2.11. Свободное косоугольное резание

2.7. Поверхности и плоскости относительно режущего инструмента

Процесс резания представляет собой внедрение клина с углом β в разрушаемый резанием материал. У клина есть две плоскости (поверхности).

Передняя поверхность режущего клина – это поверхность, по которой движется стружка.

Задняя поверхность – это поверхность клина, обращенная к поверхности резания.

Пересечение передней и задней поверхностей образует режущую кромку. У резца и зуба другого инструмента может быть несколько режущих кромок. В этом случае одна из режущих кромок является главной, а остальные – это вспомогательные режущие кромки. При этом сохраняется одна передняя поверхность и предусматривается несколько вспомогательных задних поверхностей.

2.8. Единая геометрия режущих лезвий инструмента

Углы режущего клина определяются в различных плоскостях, ориентирующих процесс резания.

Углы инструмента, измеряемые в главной секущей ($\alpha, \beta, \gamma, \delta$)
и нормальной ($\alpha_N; \beta_N; \gamma_N; \delta_N$) плоскостях

Главный задний угол α (α_N) – это угол, измеряемый в главной секущей или нормальной плоскостях, между касательной к заданной поверхности и плоскостью резания в данной точке режущей кромки.

Угол заострения инструмента β (β_N) – это угол клина, измеренный в главной секущей или нормальной плоскостях.

Передний угол γ (γ_N) – это угол между касательной к передней поверхности и основной плоскостью, измеренный в главной секущей или нормальной плоскостях.

Угол резания δ (δ_N) – это угол между касательной к передней поверхности и плоскостью резания, измеренный в главной секущей или нормальной плоскостях:

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

Передний угол может быть положительным, отрицательным или равным нулю. Из рис. 2.12 видно, что передний угол зависит от положения основной плоскости: если след основной плоскости лежит вне режущего клина, то $\gamma > 0$ (рис. 2.12, а). Если след основной плоскости пересекает режущий клин, то передний угол отрицательный (рис. 2.12, б). На рис. 2.12, в показан инструмент, когда основная плоскость совпадает с передней поверхностью ($\gamma = 0$).

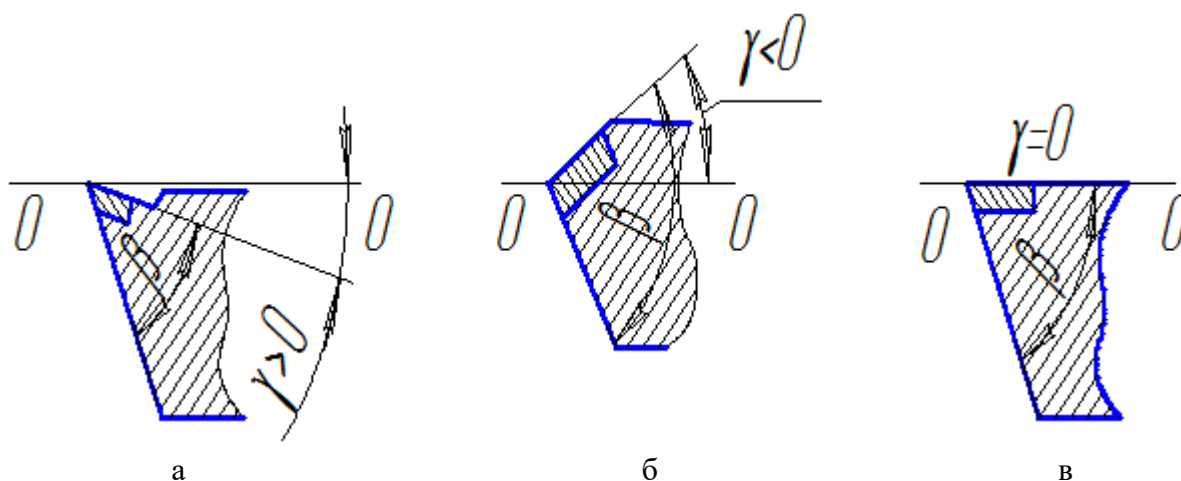


Рис. 2.12. Передний угол инструмента

Угол клина β может быть равный, больше или меньше 90° . При больших значениях β – резец прочнее, но силы резания при этом больше. Однако прочность резца с увеличением β растёт быстрее, чем силы резания, поэтому инструменты с большими углами клина используются

для обработки высокопрочных или закалённых сталей, а также при работе с ударами.

Форма передней поверхности инструмента

Укороченная передняя поверхность величиной f (рис. 2.13,а) используется по предложению профессора Клушина для снижения трения между стружкой и резцом, поскольку для стандартного резца длина площадки контакта между стружкой и резцом OA равна ℓ_n .

Резцы могут быть с двойной передней поверхностью, когда угол $\gamma < 0$ на длине f , а далее угол $\gamma > 0$ (рис. 2.13, б).

На рис. 2.13,в приведена конструкция алмазного резца с участком передней поверхности f с отрицательным передним углом ($\gamma < 0$).

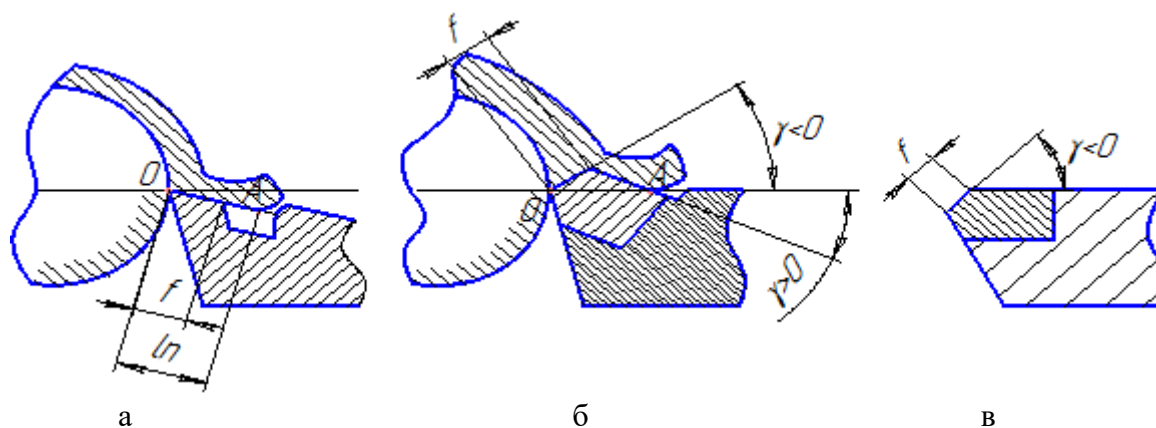


Рис. 2.13. Форма передней поверхности инструмента

2.9. Соотношение между углами инструмента, измеренными в главной секущей и нормальной плоскостях

Рассмотрим соотношение между углами α и α_N , измеренными в главной секущей (сечение Г-Г) и нормальной (сечение N-N) плоскостях (рис. 2.14). При сечении плоскостью, параллельной режущей кромке (след – линия 2), точки А и В на задней поверхности резца находятся на расстоянии m от плоскости резания (след – линия 1) как в сечении Г-Г, так и в сечении N-N. Поэтому из треугольника в сечении Г-Г следует, что отношение катета m к катету b равно $tg\alpha$:

$$\frac{m}{b} = tg\alpha ,$$

а отношение

$$\frac{m}{a} = \operatorname{tg} \alpha_N$$

соответствует отношению катетов в сечении N-N. Разделив правые и левые стороны этих уравнений, получим, что

$$\frac{a}{b} = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \alpha_N}.$$

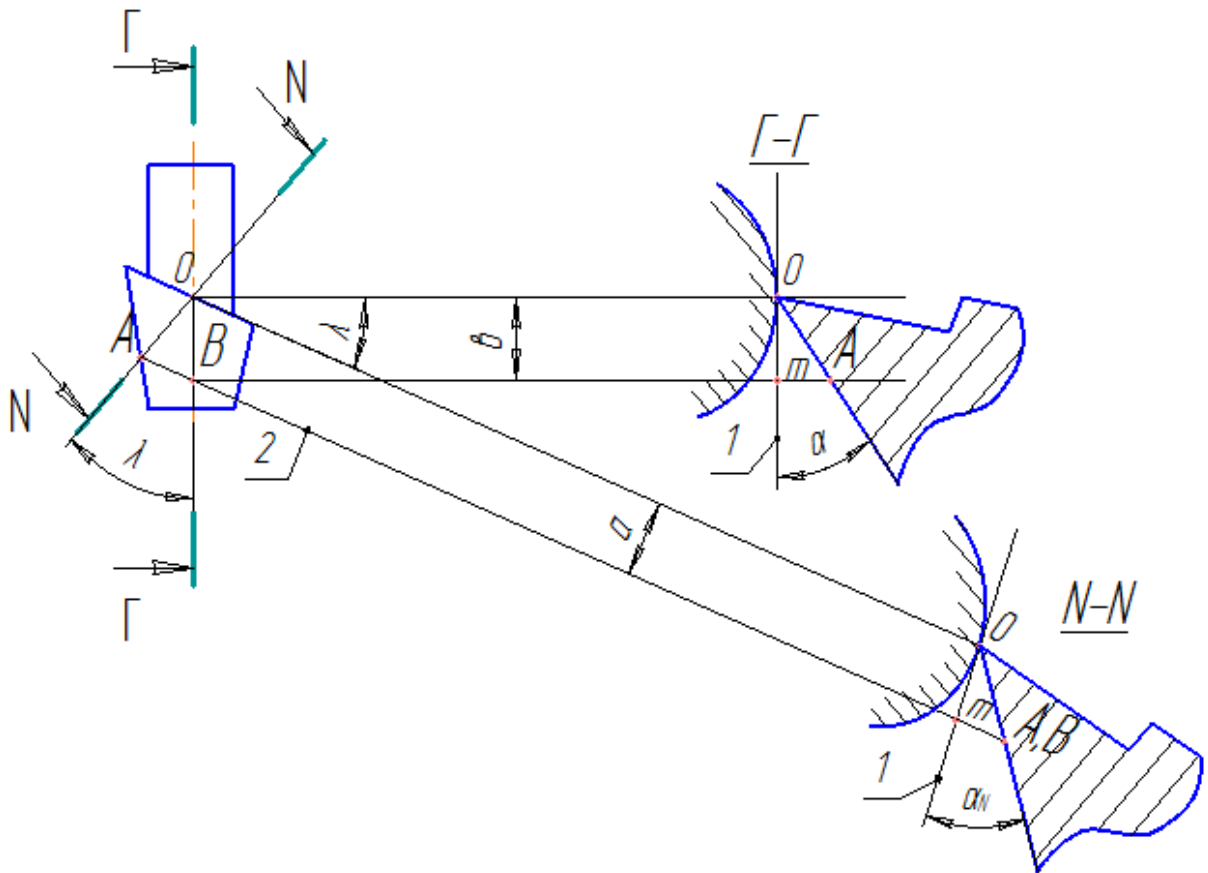


Рис. 2.14. Соотношение между углами инструмента, измеренными в главной секущей и нормальной плоскостях

Так как в треугольнике AOB сторона AO= a и сторона BO= b , то отношение

$$\frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \alpha_N} = \cos \lambda,$$

откуда следует соотношение

$$\operatorname{tg} \alpha = \operatorname{tg} \alpha_N \cos \lambda.$$

Для прямоугольного резания угол $\lambda=0$, следовательно, главная секущая и нормальная плоскости совпадают.

2.10. Передний угол у спирального сверла

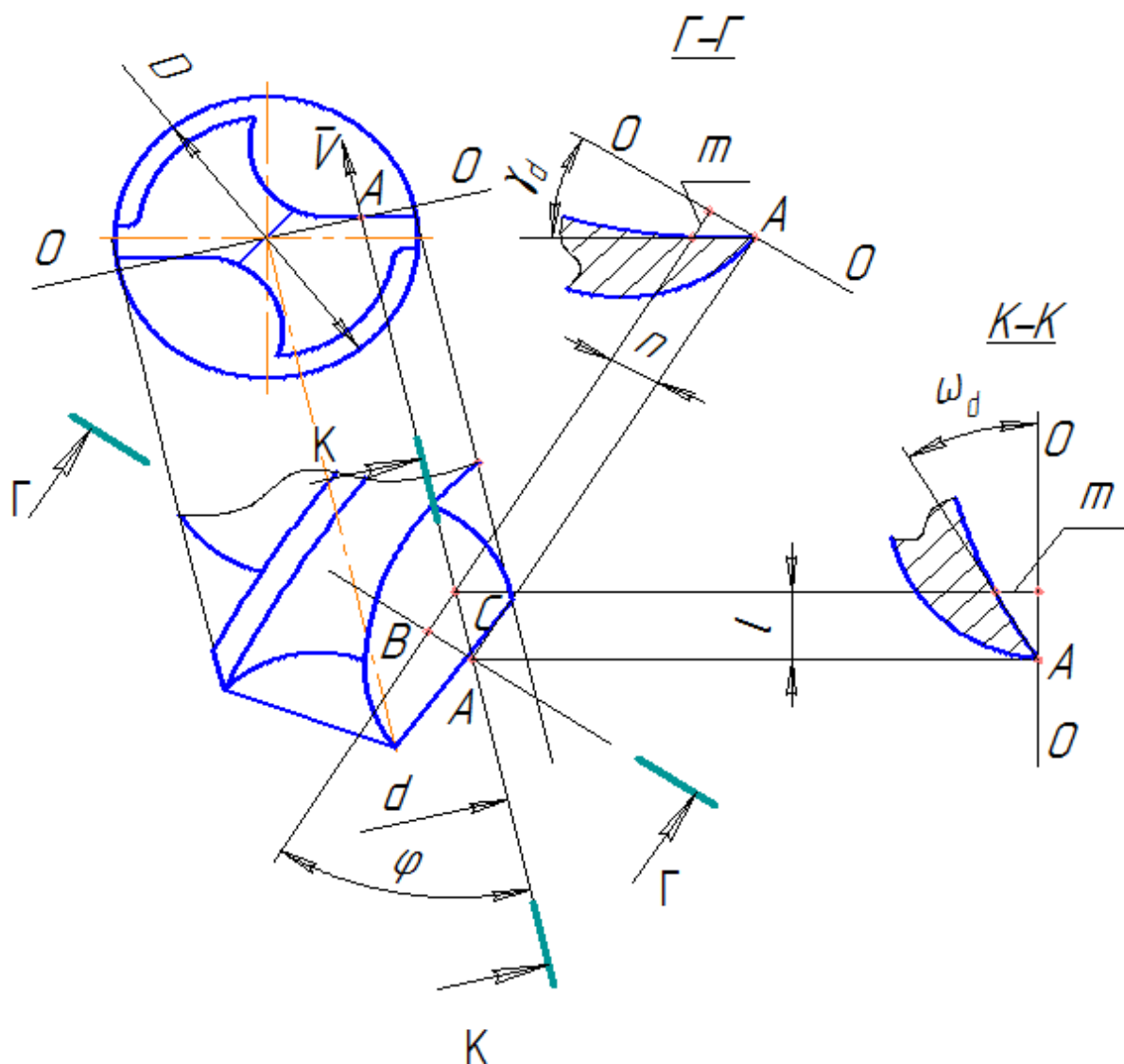


Рис. 2.15. Передний угол у спирального сверла

Передний угол у спирального сверла имеет различное значение по длине режущего лезвия. Поскольку передний угол измеряется в главной секущей плоскости между основной плоскостью и передней поверхностью, то для вычисления переднего угла в данной точке необходимы следующие построения (рис. 2.15). В виде с торца на сверло обозначим точку А, для которой основной плоскостью будет след О-О. Далее спроецируем сверло на основную плоскость (вид внизу). В этом случае режущая кромка, содержащая точку А, будет изображена в проекции на основную плоскость, поэтому сечение Γ-Γ будет представлять собой сечение главной секущей плоскостью. В этом сечении передний угол в точке А режущей кромки обозначаем как γ_d . Чтобы получить значение угла спирали сверла в точке А режущей кромки, необходимо сделать сечение К-К. В этом сечении угол спирали сверла обозначим как

ω_d . Дополнительными построениями обозначим треугольник ABC (на основной плоскости), треугольник с катетами m и n в сечении Г-Г и треугольник с катетами m и l в сечении К-К.

Из треугольника в сечении Г-Г следует, что отношение

$$\frac{m}{n} = tg \gamma_d .$$

Аналогично в сечении К-К

$$\frac{m}{l} = tg \omega_d .$$

Разделив левые и правые члены этих соотношений, получим, что

$$\frac{tg \gamma_d}{tg \omega_d} = \frac{l}{n} .$$

Так как из треугольника ABC следует, что

$$\frac{n}{l} = \sin \varphi , \text{ то}$$

$$\frac{tg \gamma_d}{tg \omega_d} = \frac{1}{\sin \varphi} , \Rightarrow tg \gamma_d = \frac{tg \omega_d}{\sin \varphi} .$$

Спиральное сверло имеет фиксированное значение шага спирали H (рис. 2.16), в то время как угол спирали ω_d меняется с изменением значения d . Поэтому в формуле для γ_d выразим ω_d через параметры спирали сверла. На рис. 2.16 условно показана развёртка спирали сверла по диаметру D (треугольник 1-2-3) и по диаметру d (треугольник 2-3-4). Из треугольника 1-2-3 следует, что отношение катетов

$$\frac{\pi D}{H} = tg \omega_D ;$$

а отношение катетов в треугольнике 2-3-4

$$\frac{\pi d}{H} = tg \omega_d .$$

Разделив левые и правые части, получим, что

$$\frac{d}{D} = \frac{tg \omega_d}{tg \omega_D} .$$

Откуда

$$tg \omega_d = \frac{d}{D} tg \omega_D .$$

Подставив значение $tg \omega_d$ в формулу для $tg \gamma_d$, получим:

$$tg \gamma_d = \frac{d tg \omega_D}{D \sin \varphi} . \quad (1)$$

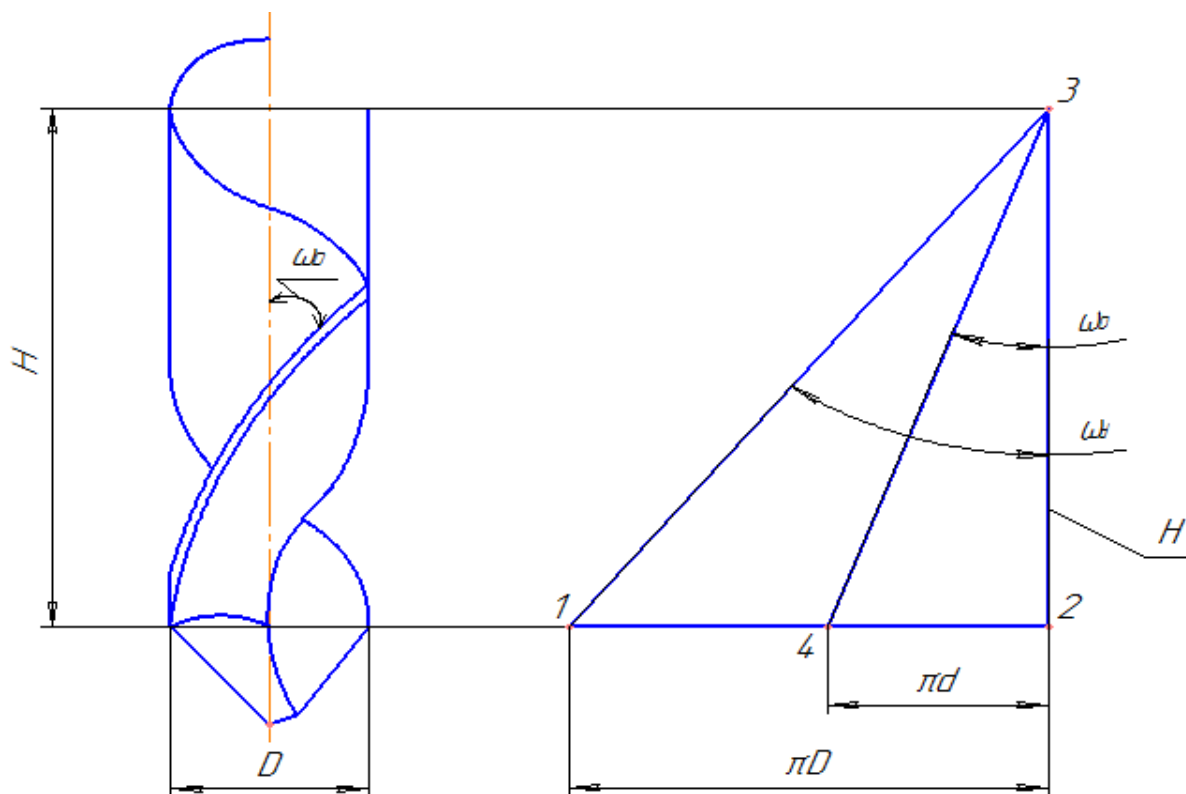


Рис. 2.16. Развертка спирали сверла

Следовательно, с уменьшением диаметра d передний угол уменьшается и, наоборот, при $d \rightarrow D$ получим, что

$$\operatorname{tg} \gamma_D = \frac{\operatorname{tg} \omega_D}{\sin \varphi}.$$

Тогда при подстановке в формулу (1) получим

$$\operatorname{tg} \gamma_d = \frac{d}{D} \operatorname{tg} \gamma_D. \quad (2)$$

При выводе формул (1) и (2) не учитывалась поперечная кромка сверла. В действительности за счёт наличия поперечной кромки угол γ в центральных точках режущей кромки может принимать даже отрицательные значения, вплоть до -30° . Для того, чтобы исключить большие отрицательные углы, используют различные подточки.

Передний угол зависит не только от формы инструмента, как это было показано для сверла. Передний угол может быть изменён и установкой инструмента относительно обрабатываемой детали, когда положение основной плоскости и плоскости резания изменяют пространственное положение. Это относится к заднему углу α (рис. 2.17).

Изменение углов α и γ в зависимости от установки инструмента используют на практике с целью некоторого увеличения переднего угла и тем самым снижают силы резания. При этом следует иметь в виду, что передний угол γ может быть как положительным, так и отрицательным,

тогда как задний угол не может быть отрицательным. В некоторых случаях обработки на задней поверхности инструмента оставляют ленточку шириной до 0,1...0,2 мм с задним углом $\alpha=0$. Такая конструкция инструмента позволяет снизить температуру резания за счёт оттока теплоты через заднюю поверхность в обрабатываемую деталь.

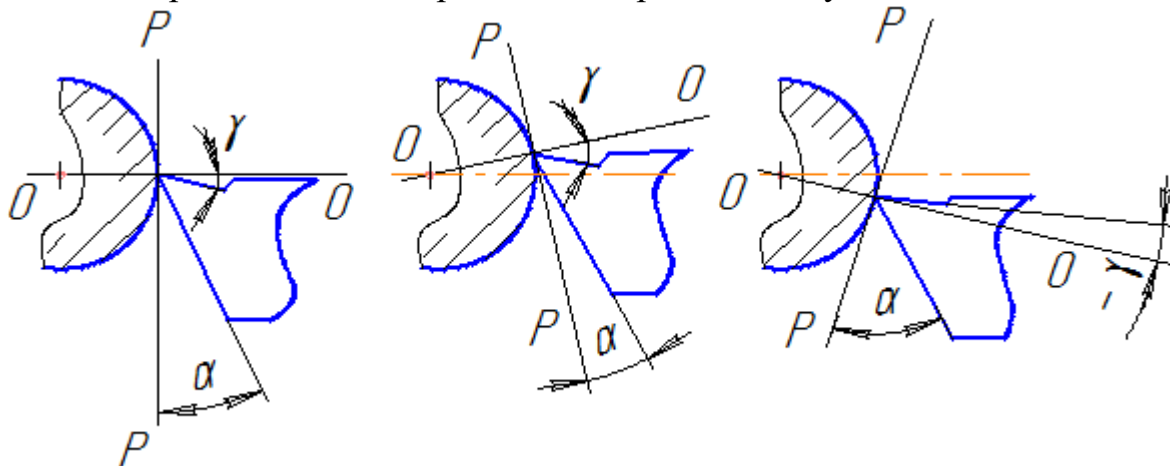


Рис. 2.17. Передний угол в зависимости от установки инструмента

2.11. Углы в плане

Название «углы в плане» сложилось исторически, поскольку проекции имели названия «фасад», «план», «профиль». По современной терминологии вернее было бы называть «углы в проекции на основную плоскость».

Различают **главный угол в плане** φ – это угол между касательной к проекции главной режущей кромки на основную плоскость и направлением движения подачи – S . **Вспомогательный угол в плане** φ_1 – это угол между касательной к проекции вспомогательной режущей кромки на основную плоскость и направлением, обратным направлению подачи – S . Углы в плане зависят от положения инструмента относительно вектора движения подачи. Так, например, изменив положение оси резца 1 (рис.2.18), значения углов φ и φ_1 изменятся. Из рисунка видно, что угол заострения в плане

$$\varepsilon = 180 - (\varphi + \varphi_1).$$

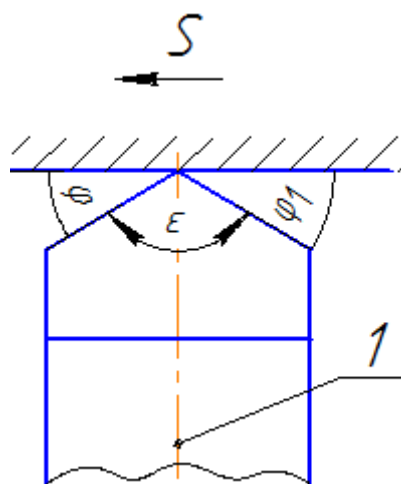


Рис. 2.18. Углы в плане

2.12. Элементы режима резания. Сечение среза

Напряжённость процесса резания характеризуется режимом резания. Режим резания определяется, главным образом, формой и размерами резца и скоростью резания.

Срез – это фигура, расположенная в основной плоскости, характеризующая слой материала, который удаляется в данный момент времени режущей кромкой инструмента. Срез определяется размерами и площадью. Размеры среза различают как физические (толщина a и ширина b), так и технологические (глубина резания t и подача S).

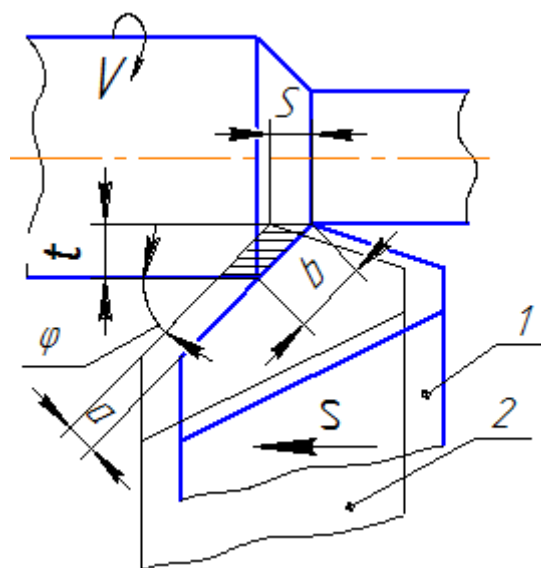


Рис. 2.19. Взаимосвязь между физическими и технологическими размерами среза

Чтобы изобразить срез при точении, нужно инструмент поставить в положение 1 и в положение 2, которые он занимал бы с разницей в один оборот детали (рис. 2.19). Ширина среза b определяется как активная часть главной режущей кромки. В соответствии со схемой на рис. 2.19 имеют место следующие соотношения между физическими и технологическими размерами среза:

$$a = S \sin \varphi; \quad b = \frac{t}{\sin \varphi}.$$

При точении на обработанной поверхности остаются шероховатости в виде резьбы с шагом, равным величине подачи S .

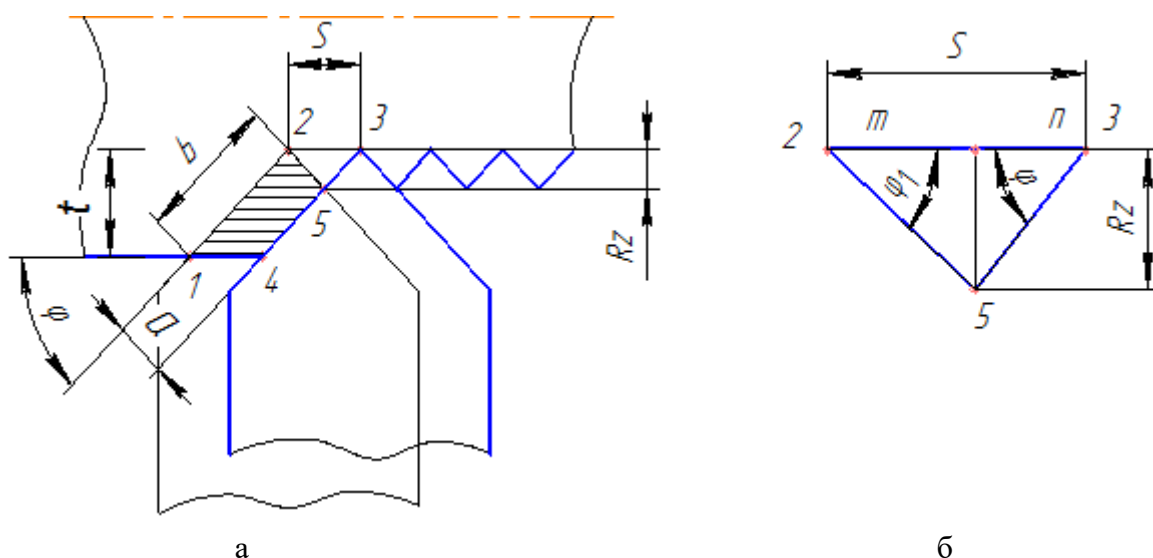


Рис. 2.20. Схема к расчёту площади среза и шероховатости при точении резцом без скругления лезвий при вершине

Различают номинальное сечение и фактическое. На рис. 2.20,а точками 1-2-3-4 очерчена фигура, представляющая номинальную площадь среза:

$$F_{ном} = ba = tS.$$

Треугольник 2-3-5 – это остаточный срез – шероховатости, которые оказываются несрезанными, их площадь

$$F_{ост} = \frac{1}{2} R_z S.$$

Поэтому фактическая площадь среза определится разностью между номинальной площадью среза и остаточной, т.е.

$$F_{факт} = F_{ном} - F_{ост} = tS - \frac{1}{2} R_z S$$

или

$$F_{\text{факт}} = S \left(t - \frac{R_z}{2} \right).$$

Используя схему на рис. 2.20,б, можно определить величину шероховатостей в зависимости от параметров процесса. Так, перпендикуляр, опущенный из вершины S на основание 2-3, делит это основание длиной S на участки m и n . Из полученных треугольников следует, что

$$\frac{m}{R_z} = \text{ctg} \varphi_1 \quad \text{и} \quad \frac{n}{R_z} = \text{ctg} \varphi.$$

Сложив левые и правые стороны этих уравнений, получим

$$\frac{m+n}{R_z} = \text{ctg} \varphi_1 + \text{ctg} \varphi;$$

$$m+n = S; \text{ следовательно, } \frac{S}{R_z} = \text{ctg} \varphi + \text{ctg} \varphi_1.$$

Откуда находим

$$R_z = \frac{S}{\text{ctg} \varphi + \text{ctg} \varphi_1}.$$

Из полученной формулы видно, что снижение подачи S улучшает качество обработки, точно так же, как и уменьшение углов φ и φ_1 . Это – чисто геометрические соотношения. Однако на практике уменьшение значения угла φ может привести к возникновению вибрации и тем самым – к снижению качества обработанной поверхности.

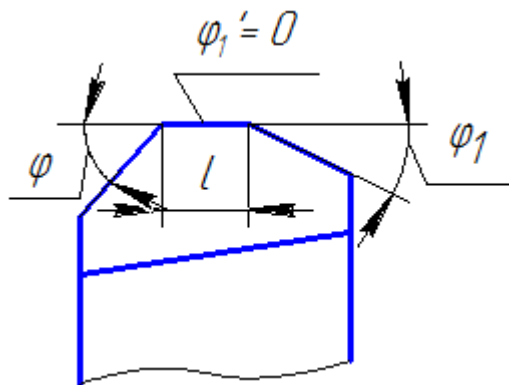


Рис. 2.21. Резец Колесова

Для снижения шероховатостей при обработке на 4ГПЗ (г. Самара) инженер Чернавский А.К. и токарь Колесов И.Г. разработали конструкцию и успешно применили на практике резец с основной главной и двумя вспомогательными кромками (рис. 2.21), одна из которых выполняется с углом $\varphi_1' = 0$ на длине l . Эта длина берётся равной или несколько больше

величины подачи. В этом случае шероховатости (зубчики на обработанной поверхности) должны теоретически срезаться полностью.

Для использования резцов Колесова необходимо достаточно точное оборудование, потому что непараллельность поперечной кромки резца с направлением подачи вызывает возникновение вибраций.

Обычно между главной и вспомогательной режущими кромками выполняется сругление по радиусу r . В этом случае обработка может осуществляться двумя соотношениями r и t : при $r < t$ и когда $r > t$.

Рассмотрим срез и шероховатость обработанной поверхности в случае $r > t$ (рис. 2.22).

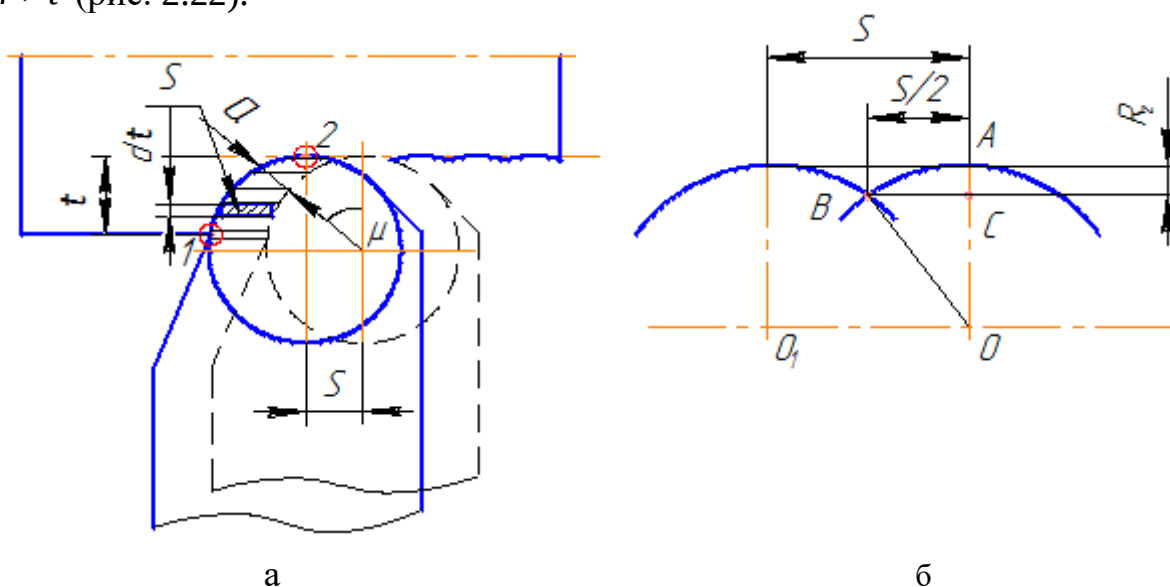


Рис. 2.22. Схема к расчёту площади среза и шероховатости при точении радиусным резцом

При работе круглым резцом ширина среза b – это активная часть режущей кромки, т.е. расстояние между точками 1-2 по окружности (рис.2.22, а). Толщина среза a зависит от угла μ . Как видно из рисунка,

$$a = S \sin \mu .$$

Чтобы определить номинальную площадь среза (фигура между двумя положениями резца за время подачи), выделим предварительно элементарный участок толщиной dt и шириной, равной величине подачи S . Площадь элементарного участка равна

$$dF_n = S dt .$$

В этом случае вся площадь среза определится интегрированием данного соотношения по t , от $t=0$ до $t=t$:

$$F_n = \int_0^t S dt = St .$$

Из полученного соотношения следует, что площадь среза при точении не зависит от формы главной режущей кромки и всегда определяется как

$$F_n = St.$$

Шероховатость поверхности при работе круглым резцом можно рассчитать в соответствии со схемой на рис. 2.22,б, где изображены два положения круглых режущих кромок с центрами в точках О и О₁ на расстоянии S друг от друга. Из вспомогательных построений видно, что

$$R_z = AC = AO - CO.$$

$AO = r$; $BO = r$, следовательно,

$$R_z = r - \sqrt{r^2 - \left(\frac{S}{2}\right)^2}.$$

Чтобы исключить квадратный корень, сделаем перестановку слагаемых и возведём в квадрат левую и правую части уравнения:

$$\sqrt{r^2 - \frac{S^2}{4}} = r - R_z; \quad -\frac{S^2}{4} = R_z^2 - 2R_z r + r^2.$$

В последнем выражении r^2 можно сократить, а величиной R_z^2 за малостью можно пренебречь. Таким образом, приходим к выражению

$$\frac{S^2}{4} = 2R_z r.$$

Откуда

$$R_z = \frac{S^2}{8r}.$$

Из соотношения для расчёта высоты шероховатостей R_z следует, что резцы с радиусной режущей кромкой позволяют получить более чистые поверхности, чем резцы с острой вершиной.

2.13. Размеры и площадь среза при обработке цилиндрической прямозубой фрезой

На рис. 2.23 показана схема процесса встречного фрезерования (верхний вид) и развёртка на обрабатываемой детали шириной b . Толщина среза $a_{z\mu}$ определяется как сечение стружки основной плоскостью (О-О на рис.2.23). Из треугольника на виде I следует, что отношение

$$\frac{a_{z\mu}}{S_z} = \sin \mu.$$

Следовательно,

$$a_{z\mu} = S_z \sin \mu.$$

Из схемы на рис. 2.23 видно, что в зоне резания от $\mu = 0$ до $\mu = \tau$ находятся два зуба (второй и третий). Площадь среза, приходящаяся на второй зуб, равна произведению ширины среза b на толщину среза $a_{z\mu}$, т. е.

$$F_z = ba_{z\mu} = bS_z \sin \mu_2.$$

Суммарная площадь среза, приходящаяся на все зубья в контакте:

$$F_{\text{ном.мгн.}} = bS_z \sum_1^m \sin \mu_i,$$

где m – количество одновременно работающих зубьев фрезы.

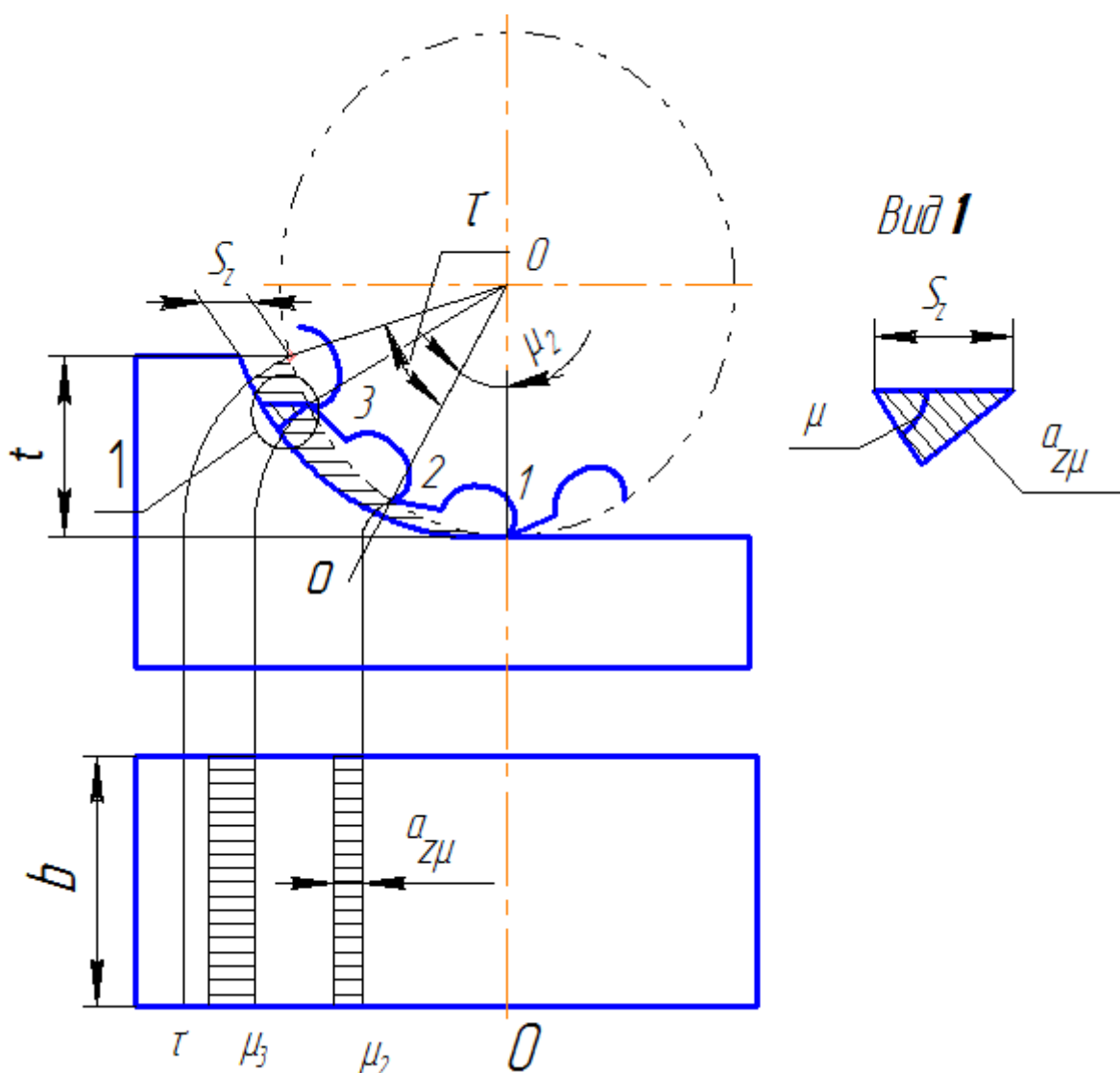


Рис. 2.23. Схема к определению размеров среза

Процесс фрезерования цилиндрической фрезой может осуществляться против направления подачи (встречное фрезерование, рис.2.24,а) и по направлению подачи (попутное фрезерование, рис. 2.24,б). При попутном фрезеровании зуб фрезы врежется в заготовку с максимальной толщиной

среза, поэтому в этом случае срезание слоя металла происходит с меньшими усилиями. При встречном фрезеровании врезание зуба фрезы в заготовку происходит практически с нулевой толщиной среза. Однако лезвие зуба фрезы не может быть абсолютно острым; всегда имеется отличный от нуля радиус скругления, поэтому при врезании возникают значительные силы трения и нагрев режущей кромки. Качество обработки при этом снижается. Недостатком процесса попутного фрезерования является то, что силы резания и движение подачи совпадают по направлению. Поэтому наличие люфтов в механизме подачи приводит к возникновению вибраций при резании и, как следствие, – к снижению качества обработки и стойкости инструмента.

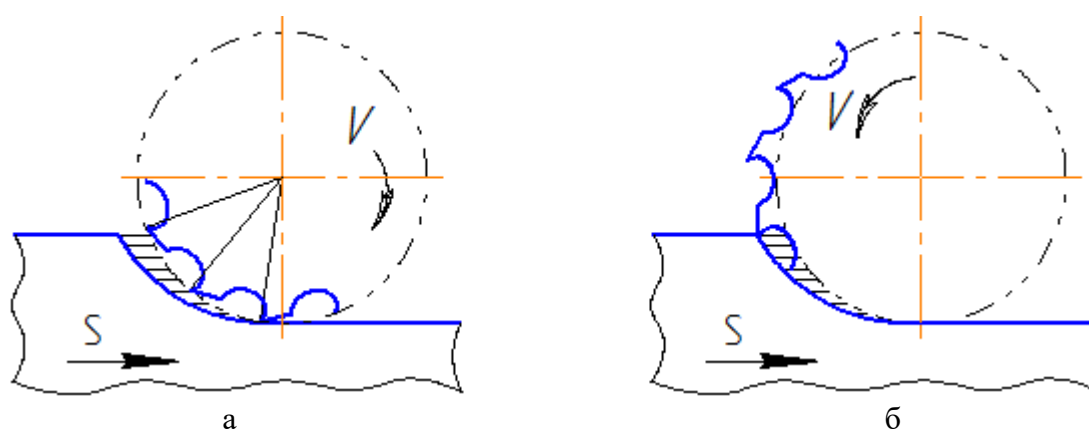


Рис. 1.24. Схемы фрезерования

2.14. Срез при работе цилиндрической фрезой с винтовыми зубьями.

На рис. 2.25 показана схема фрезерования одним зубом фрезы. Угол μ_1 – это положение передней точки зуба; угол μ_2 – положение задней точки. На нижней проекции эти углы показаны в развёрнутом виде, как отрезки дуг μ_1 и μ_2 . Угол контакта зуба фрезы с заготовкой – τ в этом случае на развёртке будет

$$\tau = \frac{\pi D}{360^\circ} \tau,$$

где D – диаметр фрезы. Размеры среза для одного зуба фрезы приведены на развёртке зоны резания – это фигура, которая обозначается точками 1-2-3-4. Ширина среза – это активная часть режущей кромки инструмента, расстояние между точками 1 и 2 (размер b). Толщина среза изменяется по ширине среза по закону

$$a_{z\mu} = S_z \sin \mu.$$

$$db = \frac{Dd_{\mu}}{2 \sin \omega}.$$

Тогда

$$dF_{ном} = \frac{DS_z}{2 \sin \omega} \sin \mu d\mu.$$

Вся площадь среза определяется интегрированием в пределах от $\mu = \mu_1$ и $\mu = \mu_2$, следовательно,

$$F_{ном.мгн.} = \frac{DS_z}{2 \sin \omega} \int_{\mu_1}^{\mu_2} \sin \mu d\mu.$$

В результате интегрирования получим

$$F_{ном.мгн.} = \frac{DS_z}{2 \sin \omega} (\cos \mu_1 - \cos \mu_2).$$

В зоне резания ($\mu_{max} = \tau$) может находиться несколько зубьев, тогда суммарная площадь среза вычисляется по формуле

$$F_{ном.сум.мгн.} = \frac{DS_z}{2 \sin \omega} \sum_{i=1}^m (\cos \mu_1^{(i)} - \cos \mu_2^{(i)}),$$

где D – диаметр фрезы,

S_z – подача на один зуб фрезы,

ω - угол спирали винтовых зубьев фрезы,

m – число зубьев, находящихся в зоне резания.

Особенность процесса фрезерования инструментом с винтовыми зубьями состоит в том, что при определённых параметрах процесса суммарное мгновенное значение площади среза останется неизменным с течением времени. Условие для равномерного фрезерования будет выполняться в том случае, когда осевой шаг фрезы t_0 укладывается целое число раз в ширине фрезерования b_u , т. е

$$\frac{b_u}{t_0} = 1; 2; 3 \dots$$

В связи с этим рассмотрим конкретный пример, когда осевой шаг фрезы t_0 укладывается два раза в ширине фрезерования b_u (рис. 2.26). В этом случае сумма $\sum_{i=1}^5 (\cos \mu_1^{(i)} - \cos \mu_2^{(i)})$ должна быть постоянной и не зависеть от угла поворота фрезы. На рис. 2.26 приведена развёртка угла контакта τ фрезы с обрабатываемой деталью, когда в зоне резания находится 5 зубьев фрезы.

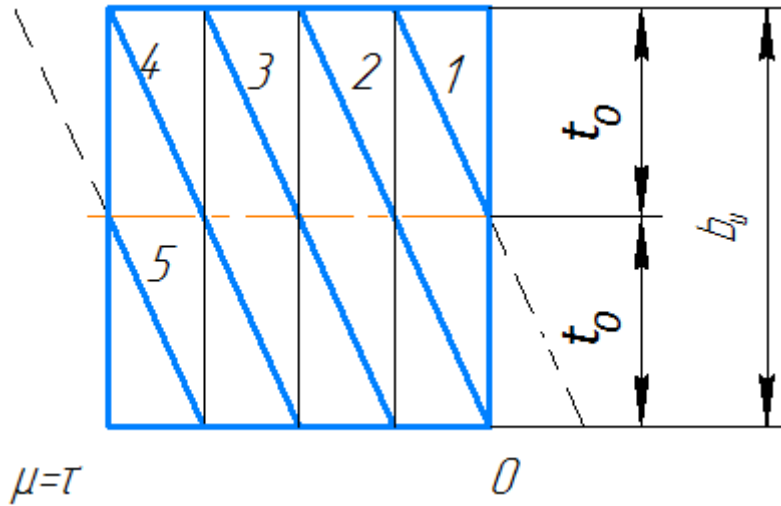


Рис. 2.26. Схема к расчёту равномерности фрезерования

Из схемы видно, что угол входа первого зуба $\mu_1^{(1)} = 0$ (пунктиром показана часть лезвия, которая ещё не вошла в данный момент времени в зону обработки).

Угол выхода из заготовки первого зуба обозначим как $\mu_2^{(1)}$. Рассмотрим положение второго зуба: угол входа $\mu_1^{(2)} = 0$, а угол выхода обозначим как $\mu_2^{(2)}$. Переходим к третьему зубу: угол входа третьего зуба равен углу выхода первого зуба, т.е. $\mu_1^{(3)} = \mu_2^{(1)}$. Для четвёртого зуба $\mu_1^{(4)} = \mu_2^{(2)}$, а $\mu_2^{(4)} = \tau$. Для пятого зуба $\mu_1^{(5)} = \mu_2^{(3)}$, а $\mu_2^{(5)} = \tau$. Для наглядности сведём эти данные в табл. 2.

Таблица 2

Положение зуба	1	2	3	4	5
Угол входа $\mu_1^{(i)}$	$\mu_1^{(1)} = 0$	$\mu_1^{(2)} = 0$	$\mu_2^{(1)}$	$\mu_2^{(2)}$	$\mu_2^{(3)}$
Угол выхода $\mu_2^{(i)}$	$\mu_2^{(1)}$	$\mu_2^{(2)}$	$\mu_2^{(3)}$	$\mu_2^{(4)} = \tau$	$\mu_2^{(5)} = \tau$

Используя данные таблицы, найдём для суммы

$$\begin{aligned}
 \sum_{i=1}^{i=5} (\cos \mu_1^{(i)} - \cos \mu_2^{(i)}) &= \cos 0 - \cos \mu_2^{(1)} + \cos 0 - \cos \mu_2^{(2)} + \\
 &+ \cos \mu_2^{(1)} - \cos \mu_2^{(3)} + \cos \mu_2^{(2)} - \cos \tau + \cos \mu_2^{(3)} - \cos \tau = \\
 &= 2(1 - \cos \tau) .
 \end{aligned}$$

Следовательно, номинальная суммарная мгновенная площадь среза в этом случае будет

$$F_{\text{ном.сум.мгн.}} = \frac{DS_z}{2\sin \omega} 2(1 - \cos \tau).$$

Поскольку

$$\cos \tau = 1 - \frac{2t}{D},$$

то после подстановки получим, что

$$F_{\text{ном.сум.мгн.}} = \frac{2tS_z}{\sin \omega} = \text{const}.$$

Условие равномерного фрезерования – это отношение $\frac{b_u}{t_0}$ должно быть равно положительному целому числу «С». Так как окружной шаг фрезы

$$t_{\text{окр}} = \frac{\pi D}{z},$$

где z – число зубьев фрезы, а $tg \omega = \frac{t_{\text{окр}}}{t_o}$,

то $t_0 = \frac{\pi D}{z tg \omega}$

и $\frac{b_u}{t_o} = \frac{b_u z tg \omega}{\pi D} = C.$ (3)

Для практического использования полученного результата, обеспечивающего условие равномерного фрезерования, возможны два случая:

1. Для массового производства, чтобы обеспечить для конкретной ширины фрезерования b_u условие (3), изготавливают оригинальную (специальную) фрезу, с отличимым от стандарта углом спирали ω .

2. Для единичного производства, когда изготовление специального инструмента экономически нецелесообразно, комплектуют из нескольких деталей суммарную ширину фрезерования b_u , которая удовлетворяла бы условию (3).

Глава 3. Физические основы процесса резания

Механика процесса резания, являющаяся частью теории резания материалов, изучает:

- 1) упругие и пластические деформации обрабатываемого материала,
- 2) трение между изделием и инструментом,
- 3) напряжения и усилия в процессе резания, затраты энергии на процесс.

Основы учения о резании заложены в работе И. А. Тиме, которая вошла в книгу «Сопротивление металла и дерева резанию», изданную в 1867 году.

Деформации и напряжения в процессе резания изучаются, главным образом, экспериментальными методами, которые могут быть непосредственными (прямыми) и косвенными.

К прямым методам исследования относятся:

- а) наблюдение боковой поверхности образца при свободном прямоугольном резании;
- б) металлографический анализ корня стружки.

К косвенным методам исследования относятся:

- а) исследование микротвердости в области корня стружки;
- б) исследование моделей в поляризованном свете.

При свободном прямоугольном резании изучают характер потемнений на полированной поверхности торца заготовки, а также изменение формы клеток сетки или окружностей, нанесенных на торцевой поверхности образцов. В этом исследовании требуется мгновенная остановка процесса резания, чтобы зафиксировать характер деформаций для конкретной скорости резания.

Наблюдение боковой поверхности осуществляется в некоторых случаях скоростной киносъемкой (до 10^5 кадров в секунду).

Исследования показывают, что в зависимости от свойств обрабатываемого материала, углов режущего клина, режимов резания и ряда других условий деформаций обрабатываемого материала, образование стружки происходит в различной форме (рис. 3.1):

1. Стружка может образовываться в виде непрерывной ленты (сливная стружка);
2. Стружка может образовываться в виде ленты с явно видимыми отдельными крупными элементами (элементообразная стружка);
3. Стружка может образовываться в виде серии элементов, малосвязанными или несвязанными друг с другом (стружка надрыва).

Форма стружки определяется параметрами процесса резания и физикомеханическими свойствами обрабатываемого материала. Так, например, сливная стружка возникает, как правило, с уменьшением толщины среза – a , с увеличением скорости резания – V , с увеличением

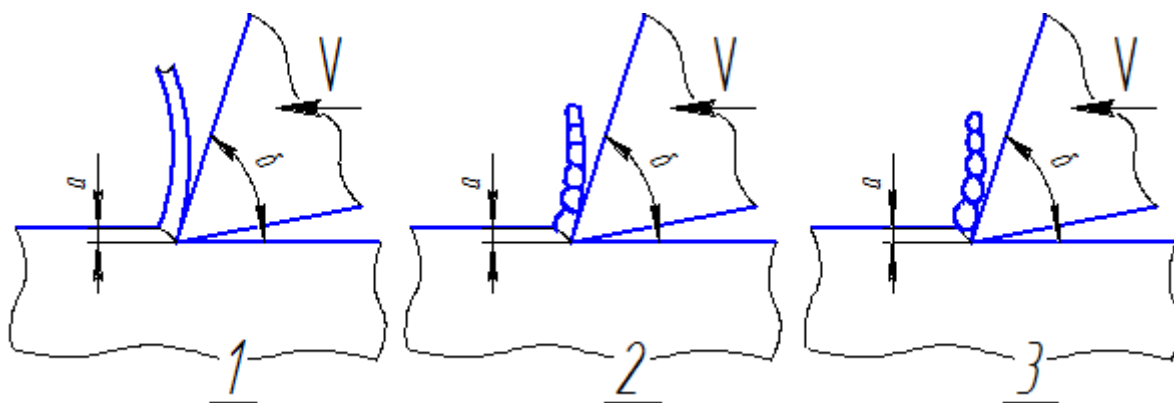


Рис. 3.1. Основные виды стружки

переднего угла – γ . В этих условиях обработки за счет стационарности динамики процесса улучшается качество обработки, повышается стойкость инструмента, но вместе с тем возникают проблемы с удалением стружки, особенно при многоинструментальной обработке.

Опытные данные показывают, что область стружкообразования может быть условно представлена в виде плоскости ON (рис. 3.2), в направлении которой происходит основная деформация при резании – деформация сдвига.

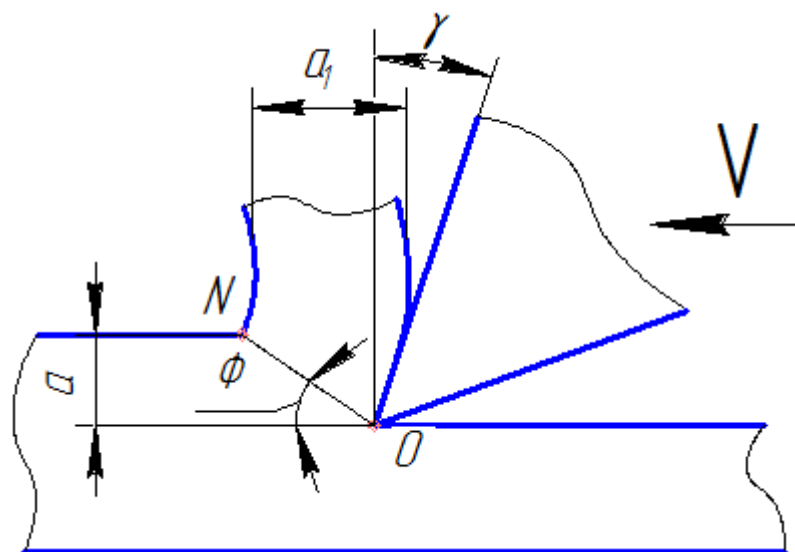


Рис. 3.2. Схема стружкообразования

Угол между плоскостью сдвига ON и направлением резания – Φ называется углом сдвига; a – толщина среза; a_1 – толщина стружки.

Соотношение между углом сдвига Φ и параметрами обработки (a, a_1, γ) можно установить из схемы на рис. 3.3.

Для этого определяется длина плоскости сдвига ON из треугольников ANO и ONB. Так из Δ ANO следует:

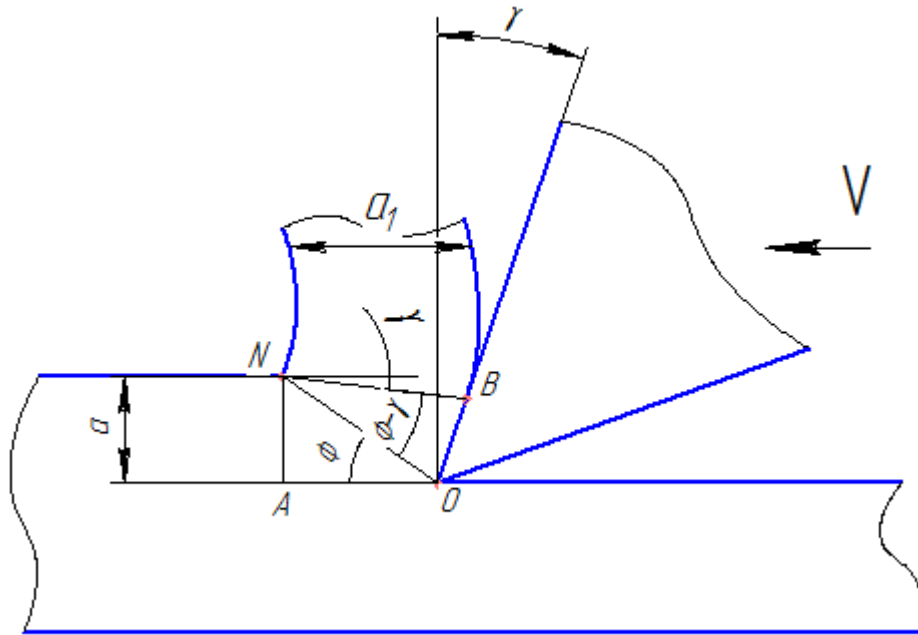


Рис. 3.3. Схема для определения угла сдвига

$$\frac{AN}{ON} = \frac{a}{ON} = \sin \Phi.$$

Откуда

$$ON = \frac{a}{\sin \Phi}.$$

Из ΔONB следует

$$\frac{NB}{ON} = \frac{a_1}{ON} = \cos(\Phi - \gamma),$$

откуда

$$ON = \frac{a_1}{\cos(\Phi - \gamma)}.$$

Таким образом,

$$\frac{a}{\sin \Phi} = \frac{a_1}{\cos(\Phi - \gamma)}$$

или

$$\frac{a_1}{a} = \frac{\cos(\Phi - \gamma)}{\sin \Phi},$$

где $\frac{a_1}{a} = k$ – коэффициент усадки стружки.

В этом случае получим, что

$$k = \frac{\cos(\Phi - \gamma)}{\sin \Phi}.$$

Поскольку коэффициент усадки стружки k легко определяется экспериментально, то по его величине определяют угол сдвига Φ :

$$k = \frac{\cos \Phi \cos \gamma + \sin \Phi \sin \gamma}{\sin \Phi} = \frac{\cos \gamma}{\operatorname{tg} \Phi} + \sin \gamma,$$

откуда

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

Нетрудно показать, что

$$\sin \Phi = \frac{\cos \gamma}{\sqrt{1 - 2k \sin \gamma + k^2}}$$

3.1. Относительный сдвиг

При резании металлов превалирует деформация сдвига. Относительный сдвиг – количественное выражение этой деформации и определяется как отношение величины деформации сдвига к толщине слоя, который претерпевает этот сдвиг.

Относительный сдвиг для свободного прямоугольного резания можно рассчитать из схемы на рис. 3.4.

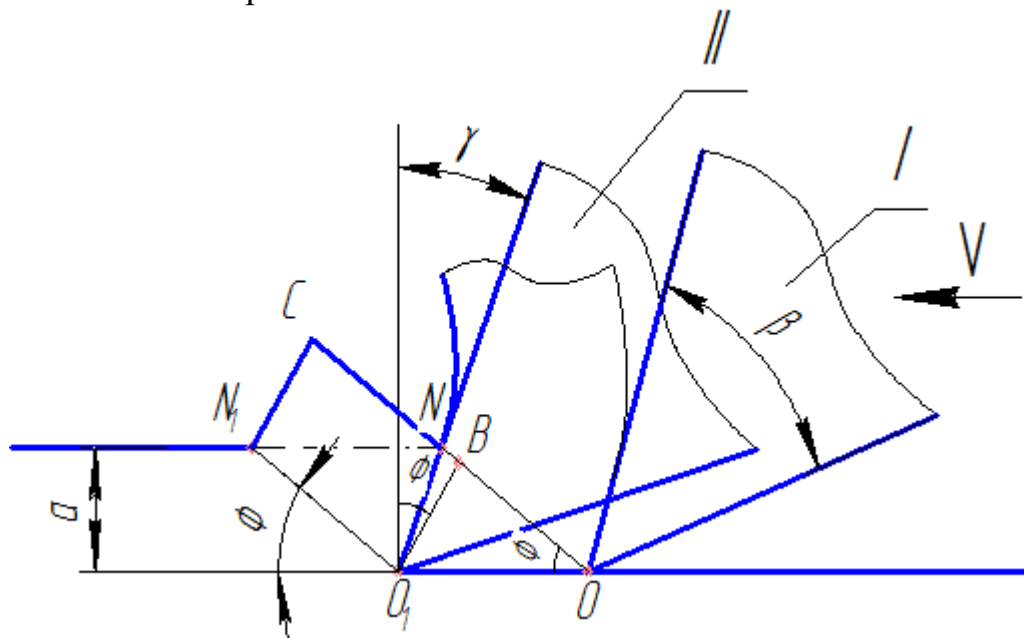


Рис. 3.4. Схема к расчету относительного сдвига

Процесс резания (рис. 3.4) выражается в том, что режущий клин с углом β движется со скоростью V и снимает слой толщиной a .

Рассмотрим плоское напряженное состояние между двумя положениями режущего клина I и II.

В первом положении клина I плоскость сдвига определяется следом – линией ON. Во втором положении резца II его передняя поверхность проходит через точку N плоскости сдвига, и для этого положения резца новая плоскость сдвига определится линией O_1N_1 .

Таким образом, исходный элемент объема обрабатываемого материала ONN_1O_1 (положение I резца) после деформации сдвига превратится в стружку с объемом, который ограничивается линиями O_1N_1CN (положение II резца). Следовательно, величина деформации сдвига – это длина плоскости сдвига ON, а толщина слоя, который претерпел эту деформацию, – это расстояние O_1B между последовательными положениями плоскостей сдвига. Отсюда следует, что относительный сдвиг

$$q = \frac{ON}{O_1B} = \frac{OB + BN}{O_1B}.$$

Из треугольника O_1BO следует, что

$$\frac{OB}{O_1B} = \operatorname{ctg} \Phi,$$

а из треугольника O_1NB следует, что

$$\frac{BN}{O_1B} = \operatorname{tg}(\Phi - \gamma).$$

Таким образом, относительный сдвиг можно выразить следующим соотношением:

$$q = \operatorname{ctg} \Phi + \operatorname{tg}(\Phi - \gamma).$$

Относительный сдвиг вместе с усадкой стружки k достаточно полно характеризует напряженность процесса резания. Так, например, можно определить, при каком значении усадки стружки величина относительного сдвига будет минимальной. Для этого воспользуемся формулой

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

Подставим значение угла Φ в формулу для относительного сдвига:

$$q = \frac{k - \sin \gamma}{\cos \gamma} + \frac{\operatorname{tg} \Phi - \operatorname{tg} \gamma}{1 + \operatorname{tg} \Phi \operatorname{tg} \gamma}$$

или

$$q = \frac{k - \sin \gamma}{\cos \gamma} + \frac{\frac{\cos \gamma}{k - \sin \gamma} - \operatorname{tg} \gamma}{1 + \frac{\cos \gamma}{k - \sin \gamma} - \operatorname{tg} \gamma}.$$

После некоторых преобразований получим, что

$$q = \frac{k^2 - 2k \sin \gamma + 1}{k \cos \gamma}.$$

Из анализа этого уравнения видно, что $k \neq q$. С увеличением k растет значение q и при $k=1$ $q \neq 0$, то есть при $k=1$ усадки стружки нет, а деформация происходит.

Можно определить при каком значении усадки стружки k деформация q принимает минимальное значение. Для этого соотношение для q представим в виде многочлена:

$$q = \frac{k}{\cos \gamma} - 2 \operatorname{tg} \gamma + \frac{1}{k \cos \gamma}.$$

Найдем производную данного выражения

$$\frac{dq}{dk} = \frac{d}{dk} \left(\frac{k}{\cos \gamma} - 2 \operatorname{tg} \gamma + \frac{1}{k \cos \gamma} \right) = \frac{1}{\cos \gamma} - \frac{1}{k^2 \cos \gamma}$$

и приравняем ее к нулю

$$\frac{1}{\cos \gamma} - \frac{1}{k^2 \cos \gamma} = 0.$$

Откуда $k^2 = 1$ и $k = 1$. Поскольку

$$\frac{d^2 k}{dk^2} = \frac{2}{k^3 \cos \gamma} > 0,$$

то при $k = 1$ деформация сдвига минимальна.

3.2. Нарост

Резание металлов представляет собой исключительно интенсивный процесс деформаций, трения и тепловыделения в очаге деформации. В зоне обработки металл испытывает давление порядка сотни тысяч кг/см². В этих условиях при определенных режимах частицы металла стружки могут отрываться и «прилипать» на передней поверхности инструмента, образуя нарост.

Прочность и твердость нароста влияют на характеристики инструмента. С появлением нароста изменяется геометрия инструмента – увеличивается передний угол (рис 3.5).

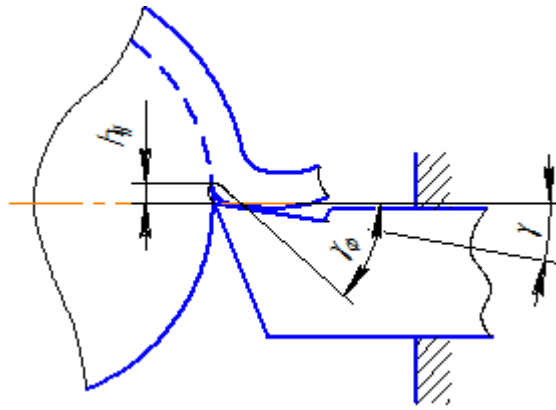


Рис. 3.5. Возникновение нароста h_n изменяет передний угол инструмента

Нарост, как правило, возникает в определенном диапазоне скоростей резания, при котором обнаруживается некоторое увеличение коэффициента трения между стружкой и передней поверхностью инструмента. Нарост оказывает влияние на основные характеристики процесса (рис.3.6). Увеличение переднего угла γ_ϕ влечет за собой снижение силы резания P_z и усадки стружки k . Вместе с тем в процессе резания нарост, достигая максимальной величины, периодически исчезает. Как неуправляемый процесс, возникновение нароста – это нежелательное явление и, чтобы его избежать, предпочитают работать со скоростями резания вне диапазона скоростей, когда он возникает.

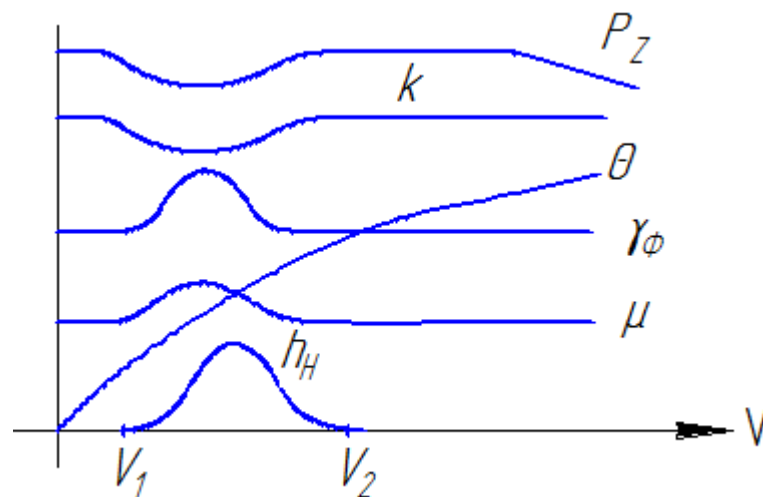


Рис. 3.6. Влияние нароста h_n на силу резания P_z и усадку стружки k в различных диапазонах скоростей: Θ - температура резания; μ - коэффициент трения инструмента со стружкой

В соответствии с графиками на рис. 3.6 диапазон скоростей v можно разделить на 3 зоны. В первой зоне при скорости резания $0 < V < V_1$ нарост отсутствует, то есть $h_n = 0$ и $\gamma = \gamma_\phi$. Во второй зоне при скорости резания

$V_1 < V < V_2$ возникает нарост h_H , увеличивается передний угол γ_ϕ и снижаются сила резания P_z и усадка стружки k . В третьей зоне скорость резания $V > V_2$, исчезает нарост и происходит соответствующее изменение параметров резания.

3.3. Контактные явления на рабочих поверхностях режущего инструмента

Рабочие поверхности инструментов чрезвычайно нагружены. На этих поверхностях возникает интенсивное трение и износ, а также высокие контактные температуры. В связи с этим изучение этих явлений представляет известный интерес как для теории, так и для практики металлообработки.

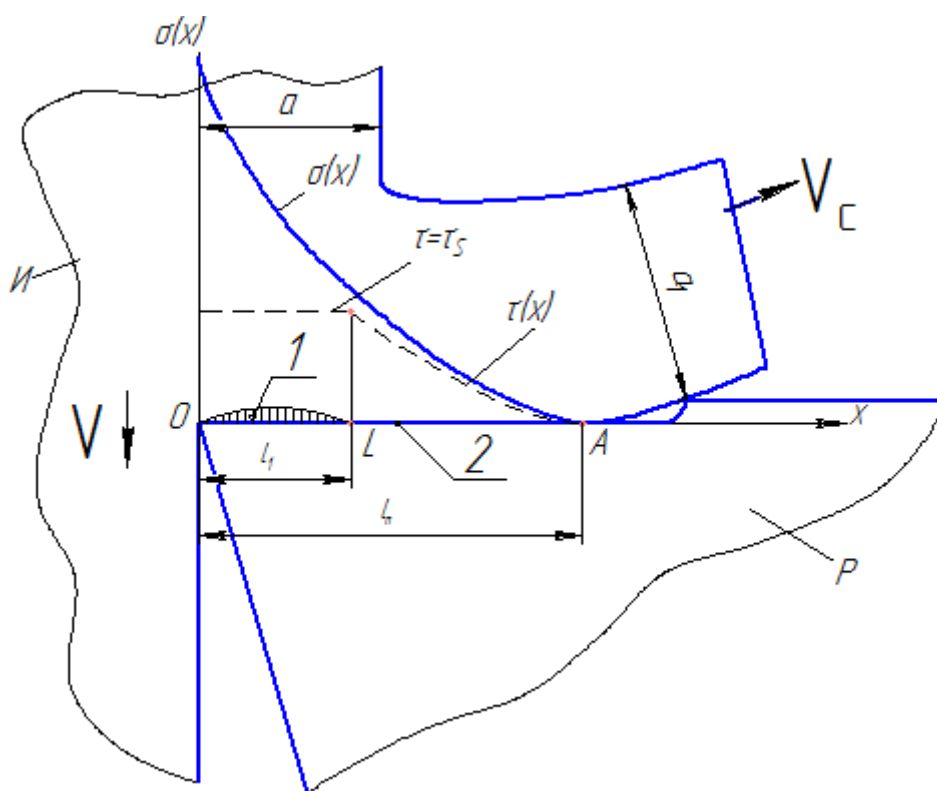


Рис. 3.7. Схема движения стружки по передней поверхности инструмента

Теория вопроса и эксперименты показывают, что нормальные напряжения $\sigma(x)$ резко изменяются на площадке контакта инструмента «Р» с изделием «И» – расстояние l_n (О-А на рис. 3.7). Нижний слой стружки настолько плотно прижимается к резцу, что прилипает к нему. Поэтому на участке OL возникает так называемый «заторможенный слой» материала стружки. Здесь стружка движется не по передней поверхности инструмента, а по заторможенному слою металла детали. Сила трения

между стружкой и инструментом на этом участке не может принимать большее значение, чем предел прочности материала стружки на сдвиг τ_s . Поэтому граничные трения при значениях удельной силы трения, больших, чем τ_s , заменяются более выгодным в энергетическом отношении внутренним трением.

Профессор Н. Н. Зорев установил, что нормальная сила на передней поверхности N_n распределена в контакте по закону

$$\sigma(x) = \sigma_0 \left(1 - \frac{x}{l_n}\right)^n,$$

где σ_0 – максимальное значение нормальных напряжений на передней поверхности в точке $x = 0$;

$n \approx 3$ – для стали.

Таким образом, на участке l_1 касательные напряжения $\tau_{x \leq l_1} = \tau_s$; для участков контакта с $x \geq l_1$ касательные напряжения определяются соотношением

$$\tau_{x \geq l_1} = \mu \sigma(x) = \mu \sigma_0 \left(1 - \frac{x}{l_n}\right)^n,$$

где μ – коэффициент трения в контакте.

Величину σ_0 можно определить из условия равенства касательных напряжений в точке $x = l_1$ значению τ_s :

$$\tau_{x=l_1} = \tau_s = \mu \sigma_0 (1 - \varepsilon)^n, \quad \text{где } \varepsilon = \frac{l_1}{l_n}.$$

Из последнего соотношения следует, что

$$\sigma_0 = \frac{\tau_s}{\mu(1 - \varepsilon)^n}.$$

Следовательно, на участке $x \geq l_1$ касательные напряжения будут

$$\tau_{x \geq l_1} = \mu \frac{\tau_s}{\mu(1 - \varepsilon)^n} \left(1 - \frac{x}{l_n}\right)^n = \tau_s \frac{\left(1 - \frac{x}{l_n}\right)^n}{(1 - \varepsilon)^n}.$$

Определим силу трения на передней поверхности как сумму сил трения на участке с $x \leq l_1 - F_n'$ и на участке с $x \geq l_1 - F_n''$:

$$F_n = F_n' + F_n''.$$

С учетом ширины среза b при свободном прямоугольном резании можно записать, что

$$F_n' = \tau_s b l_1.$$

Сила трения на втором участке определится интегралом:

$$F_n'' = \frac{b \tau_s}{(1-\varepsilon)^n} \int_{l_1}^{l_n} \left(1 - \frac{x}{l_n}\right)^n dx.$$

При замене переменных $\psi = 1 - \frac{x}{l_n}$;

$$d\psi = -\frac{1}{l_n} dx \quad \text{и} \quad dx = -l_n d\psi;$$

$$\psi_1 = 1 - \varepsilon; \quad \text{и} \quad \psi_2 = 0$$

получим, что

$$F_n'' = \frac{b \tau_s}{(1-\varepsilon)^n} (-l_n) \int_{1-\varepsilon}^0 \psi^n d\psi.$$

Поскольку

$$-\int_{1-\varepsilon}^0 \psi^n d\psi = \int_0^{1-\varepsilon} \psi^n d\psi = \frac{\psi^{n+1}}{n+1} \Big|_0^{1-\varepsilon} = \frac{(1-\varepsilon)^{n+1}}{n+1},$$

то после подстановки и преобразования параметров получим

$$F_n'' = b l_n \tau_s \frac{1-\varepsilon}{n+1}.$$

Таким образом, сила трения в контакте

$$F_n = F_n' + F_n'' = \tau_s b l_1 + \tau_s b l_n \frac{1-\varepsilon}{n+1}$$

или

$$F_n = \tau_s b l_n \frac{\varepsilon n + 1}{n+1}.$$

Следовательно, чтобы рассчитать силу трения на передней поверхности инструмента, необходимо определить длину контакта l_n и величину ε , которая находится в пределах 0,3-0,5.

Профессор А. Н. Резников предложил принять распределение касательных напряжений в контакте в соответствии с соотношением:

$$\tau(x) = \tau_s \exp \left[-3 \left(\frac{x}{l_n} \right)^2 \right].$$

В этом случае сила трения в контакте инструмента со стружкой опишется выражением:

$$F_n = b \tau_s \int_0^{l_n} \exp \left[-3 \left(\frac{x}{l_n} \right)^2 \right] dx.$$

Обозначим

$$\psi = \frac{x}{l_n} \quad \text{и} \quad d\psi = \frac{dx}{l_n},$$

тогда

$$dx = l_n d\psi; \quad \psi_1 = 0; \quad \psi_2 = 1.$$

После замены переменной получим

$$F_n = \tau_s b l_n \int_0^1 e^{-3\psi^2} d\psi.$$

Известно, что

$$\int_0^u e^{-q^2 \psi^2} d\psi = \frac{\sqrt{\pi}}{2q} \Phi(qu),$$

где $\Phi(qu)$ – модифицированный интеграл вероятности.

В этом случае получим:

$$F_n = \frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{3}} \tau_s b l_n \Phi(\sqrt{3})$$

или

$$F_n \approx 0,505 \tau_s b l_n.$$

Профессор М.Ф. Полетика показал, что сила трения на задней поверхности инструмента распределена по закону

$$\tau_3(y) = \tau_{03} \exp \left[-3 \left(\frac{y}{l_3} \right)^2 \right],$$

где $\tau_{03} = \frac{\sigma_b}{2}$; σ_b – предел прочности обрабатываемого материала.

В этом случае сила трения на задней поверхности инструмента определится формулой

$$F_3 = 0,25 \sigma_b b l_3,$$

где l_3 – длина площадки контакта на задней поверхности.

Силы трения на задней поверхности могут привести к значительным остаточным напряжениям в обрабатываемом изделии, которые, как известно, оказывают существенное влияние на циклическую прочность изделий: при напряжениях растяжения на поверхности циклическая прочность снижается.

3.4. Силы резания

Силы резания определяют мощность и работу процесса резания, определяют нагрузку на инструмент, влияют на точность обработки. На режущий клин β инструмента (рис. 3.8) действуют четыре силы: нормальная сила N_n на передней поверхности; сила трения F_n на передней поверхности; нормальная сила N_3 на задней поверхности и сила трения F_3 на задней поверхности.

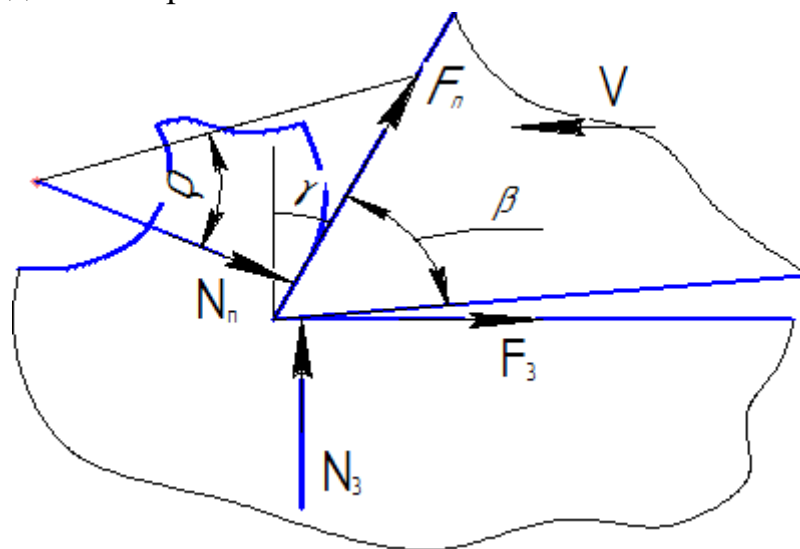


Рис. 3.8. Силы, действующие на режущий клин: V - вектор скорости резания; N_n и N_3 - нормальные силы; F_n и F_3 - силы трения

Равнодействующую, проекцию которой на оси n и z определяют силы P_Z и P_N , можно определить векторной суммой всех сил (рис.3.9).

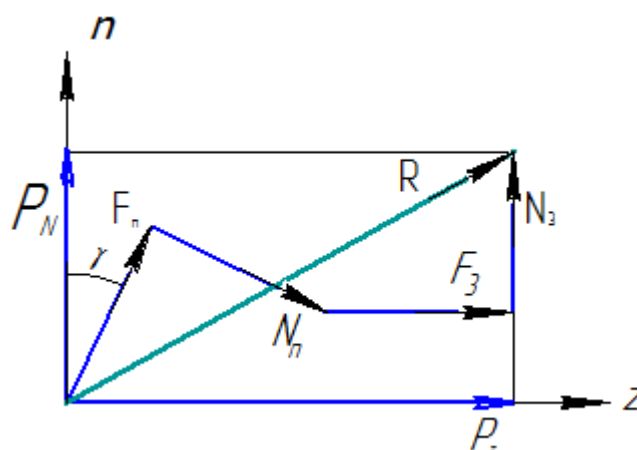


Рис. 3.9. Векторная сумма сил F_n, N_n, F_3, N_3 . Силы P_N и P_Z - проекции силы R на оси n и z

Из рис. 3.9 видно, что

$$P_Z = F_n \sin \gamma + N_n \cos \gamma + F_3,$$

$$P_N = F_n \cos \gamma - N_n \sin \gamma + N_3,$$

$$R = \sqrt{P_Z^2 + P_N^2}.$$

Сила P_Z всегда направлена в сторону режущего клина, поскольку проекции ее составляющих имеют одинаковый знак. Силу P_N определяют проекции составляющих с разными знаками, поэтому сила $P_N \leq 0$ или $P_N \geq 0$, т.е. может иметь противоположные направления или даже полностью отсутствовать.

Если условно принять для остро заточенного клина $N_3 \approx 0$, то получим, что

$$P_N = F_n \cos \gamma - N_n \sin \gamma$$

или

$$P_N = N_n \sin \gamma \left(\frac{F_n \cos \gamma}{N_n \sin \gamma} - 1 \right).$$

Отношение $\frac{F_n}{N_n}$ определяет коэффициент трения μ на передней поверхности, который можно выразить через угол трения ρ (см. рис. 3.8), т.е. $\mu = \operatorname{tg} \rho$.

Следовательно, силу P_N можно выразить в виде соотношения

$$P_N = N_n \sin \gamma \left(\frac{\operatorname{tg} \rho}{\operatorname{tg} \gamma} - 1 \right),$$

из которого видно, что при $\rho > \gamma$ сила $P_N > 0$, и, наоборот, при $\rho < \gamma$ $P_N < 0$.

В случаях, когда $P_N < 0$, инструмент затягивается в обрабатываемую деталь, что, естественно, нежелательно, так как может привести к браку или поломке инструмента.

Известно, что очень низкий коэффициент трения на передней поверхности возникает при обработке пластмасс (капрон, фторопласт и др.). Для этих материалов всегда $\mu < \gamma$ при обычных значениях переднего угла инструмента. Поэтому обработка этих материалов ведется с нулевым или отрицательным значением переднего угла. В общем случае силу P_N желательно иметь по возможности меньшую, но не со знаком «минус».

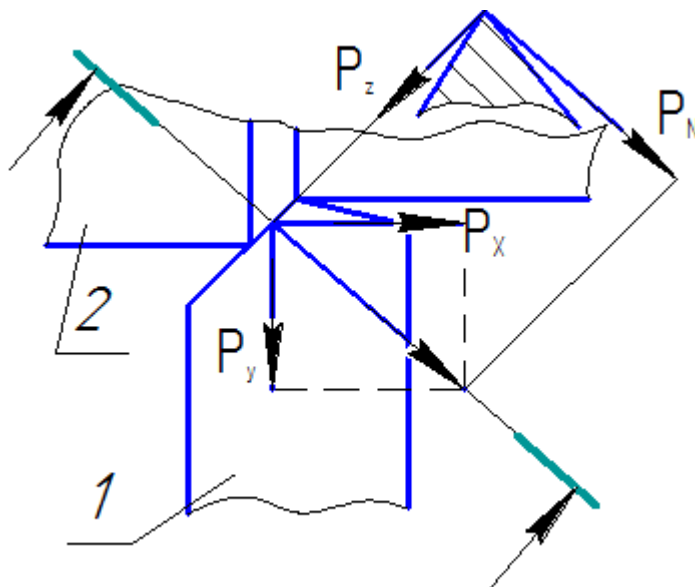


Рис.3.10. Схема сил, действующих на инструмент при точении:
1 – резец, 2 – обрабатываемая деталь

Сила P_N действует в главной секущей плоскости (рис. 3.10). В основной плоскости ее можно разложить на составляющие P_x и P_y . Для свободного прямоугольного резания силу P_z можно определить путем расчета из условия равновесия элемента материала в плоскости сдвига.

3.5. Аналитический расчет тангенциальной составляющей силы при свободном прямоугольном резании

Теоретический подход к расчету силы P_z основывается на условии равновесия материала изделия в плоскости сдвига между силами резания и силами сопротивления резанию.

Рассмотрим схему действия силы из формулы

$$P_z = F_n \sin \gamma + N_n \cos \gamma + F_3,$$

которая возникает в очаге деформации при принудительном движении резца со скоростью V (рис.3.11).

Если принять, что в плоскости сдвига сила Q , которая является суммой сил N_n и F_n , равна противодействующей силе Q' , то, определив последнюю, можно в соответствии со схемой рассчитать составляющую P_z как проекции всех сил, действующих в направлении скорости V , т. е.

$$P_z = R + F_3.$$

Итак, силу $Q' = Q$ можно разложить на составляющие T и S . Сила T действует в плоскости сдвига, поэтому она может быть определена как

произведение предела прочности материала изделия τ_s на площадь плоскости сдвига

$$f = \frac{ab}{\sin \Phi},$$

где a – толщина среза, Φ – угол сдвига, b – ширина среза.

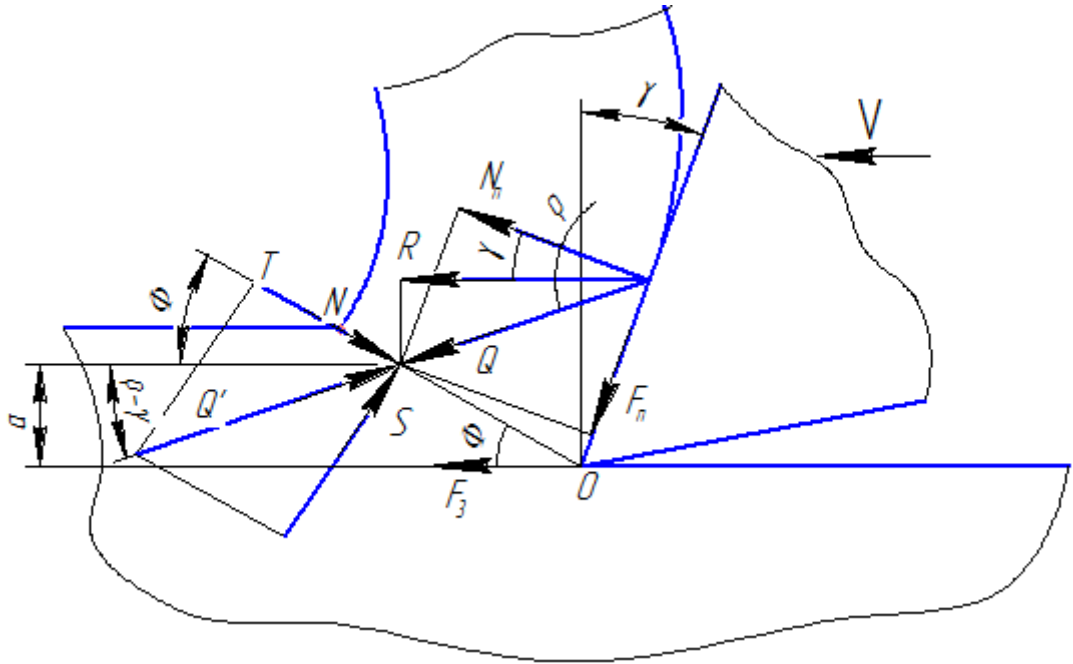


Рис. 3.11. Схема сил в очаге деформации к расчету составляющей P_z при свободном резании с $\lambda = 0$

Таким образом, сила

$$T = \frac{\tau_s ba}{\sin \Phi},$$

а так как между силами T и Q' имеется угол, равный $\Phi + \rho - \gamma$, то можем записать, что

$$Q' = \frac{\tau_s ba}{\sin \Phi \cos(\Phi + \rho - \gamma)} = Q.$$

И, наконец, поскольку сила

$$R = Q \cos(\rho - \gamma),$$

то приходим к соотношению

$$P_z = R + F_3 = \frac{\tau_s ba \cos(\rho - \gamma)}{\sin \Phi \cos(\Phi + \rho - \gamma)} + F_3,$$

где $\rho = \arctg \frac{F_n}{N_n}$.

Ранее было показано, что $F_3 = 0,25\sigma_b bl_3$, следовательно,

$$P_Z = \frac{\tau_s b a \cos(\rho - \gamma)}{\sin \Phi \cos(\Phi + \rho - \gamma)} + 0,25 b l_3 \sigma_b.$$

В такой форме иногда удастся представить аппроксимацию результатов экспериментального исследования сил. Так, например, при алмазном точении титанового сплава в результате обработки опытных данных была получена формула

$$P_Z = 354ba + 1,7b.$$

Предел прочности материала на сдвиг можно также рассчитать по формуле Н. Н. Зорева:

$$\tau_s = \frac{0,6\sigma_b}{1 - 0,017\psi},$$

где σ_b – предел прочности материала, кг/мм²,

ψ – относительное сужение материала при растяжении, %.

В большинстве случаев результаты экспериментов при расчете сил резания описываются степенной формулой. Этот вид формулы получил название формулы Челюсткина для сил P_Z и P_N в виде:

$$P_Z = C_{P_Z} b^{X_{P_Z}} a^{Y_{P_Z}} V^{Z_{P_Z}} \delta^{U_{P_Z}},$$

$$P_N = C_{P_N} b^{X_{P_N}} a^{Y_{P_N}} V^{Z_{P_N}} \delta^{U_{P_N}},$$

где δ – угол резания; X, Y, Z, U – степень влияния соответствующих параметров; C_{P_Z} и C_{P_N} – коэффициенты, учитывающие влияние других условий резания на силы P_Z и P_N .

3.6. Силы резания при продольном точении

Силы P_Z и P_N действуют в главной секущей плоскости, используя их, можно определить значения составляющих P_X , действующей в направлении движения подачи, и P_Y , действующей по нормали к обработанной поверхности, и значение равнодействующей R как векторную сумму сил P_Z и P_N .

Как видно из схемы действия сил (рис. 3.12), составляющие силы будут определяться по следующим соотношениям:

$$P_X = P_N \sin \varphi; \quad P_Y = P_N \cos \varphi; \quad P_N = \sqrt{P_X^2 + P_Y^2}$$

и равнодействующая $R = \sqrt{P_N^2 + P_Z^2}$ или после подстановки значения P_N :

$$R = \sqrt{P_X^2 + P_Y^2 + P_Z^2}.$$

Как видно из рис. 3.12, угол между векторами составляющей P_z и равнодействующей R равен углу η . В зависимости от условий обработки угол η может быть больше заднего угла инструмента α . В этом случае закрепление пластинки 3 из инструментального материала может быть обеспечено силами резания. Именно этот принцип используется при закреплении в державке резца неперетачиваемых многогранных и круглых твердосплавных пластинок. Механическое закрепление таких пластинок с помощью центрального штифта и клина предназначено только для фиксации необходимого взаимного расположения державки и пластины.

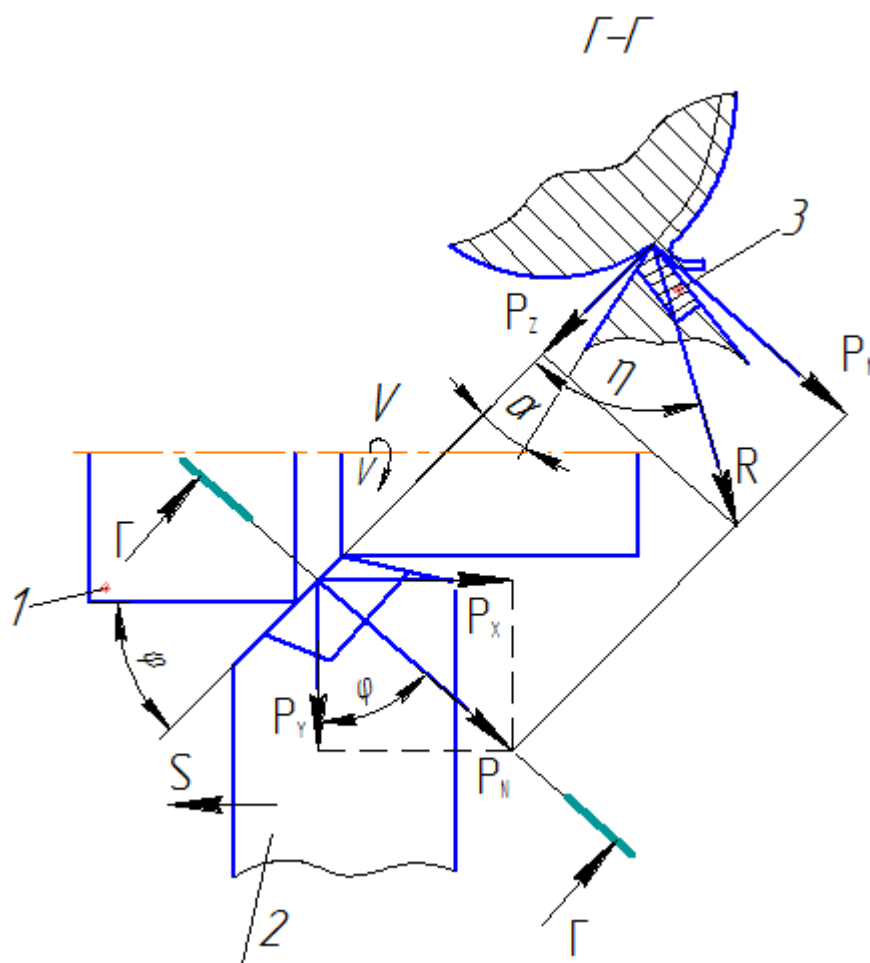


Рис.3.12. Схема к расчету сил резания при точении

Из соотношения

$$P_y = P_N \cos \varphi$$

следует, что теоретически радиальная составляющая сил резания P_y может быть равной нулю при $\varphi = 90^\circ$. Это обстоятельство часто используется при обработке мало жестких и тонкостенных деталей, когда значение P_y желательно иметь минимальным.

Применительно к процессу точения формулы Челюсткина можно выразить более точно, если подставить в них значения ширины и толщины среза. Поскольку

$$b = \frac{t}{\sin \varphi} \quad \text{и} \quad a = S \sin \varphi ,$$

то сила P_Z может быть представлена в виде:

$$P_Z = C_{P_Z} \frac{t^{X_{P_Z}}}{\sin^{X_{P_Z}} \varphi} S^{Y_{P_Z}} \sin^{Y_{P_Z}} \varphi V^{Z_{P_Z}} \delta^{U_{P_Z}} .$$

Обозначив через

$$C_Z = \frac{t^{X_{P_Z}}}{\sin^{X_{P_Z}} \varphi} S^{Y_{P_Z}} \sin^{Y_{P_Z}} \varphi ,$$

получим, что силу P_Z можно выразить соотношением:

$$P_Z = C_Z t^{X_{P_Z}} S^{Y_{P_Z}} V^{Z_{P_Z}} \delta^{U_{P_Z}} .$$

Аналогично можно получить соотношения для сил P_Y и P_X

$$P_Y = C_Y t^{X_{P_Y}} S^{Y_{P_Y}} V^{Z_{P_Y}} \delta^{U_{P_Y}} ,$$

$$P_X = C_X t^{X_{P_X}} S^{Y_{P_X}} V^{Z_{P_X}} \delta^{U_{P_X}} ,$$

в которых показатели степени принимают значения:

$$\begin{aligned} X_{P_X}, X_{P_Y}, X_{P_Z} &\approx 1, \\ Y_{P_X}, Y_{P_Y}, Y_{P_Z} &\approx 0,8 \dots 0,6 . \end{aligned}$$

Показатели степени $Z_{P_X}, Z_{P_Y}, Z_{P_Z}$ в зависимости от условий обработки могут принимать значения положительные, отрицательные или равные нулю.

3.7. Расчет момента резания при сверлении

При сверлении сила резания P_Z (рис. 3.13) изменяется по радиусу от центра сверла, поскольку в этом направлении изменяется скорость резания в соответствии с соотношением

$$V = \frac{2\pi n r}{1000}$$

и передним углом по формуле

$$\operatorname{tg} \gamma_r = \frac{2r}{D} \operatorname{tg} \gamma_D ,$$

где r – расстояние от центра сверла до соответствующей точки режущей кромки с передним углом γ_r ; D – диаметр сверла; γ_D – передний угол на периферии сверла; n – частота вращения сверла.

Определим значение составляющей P_z на элементарном участке среза $a \times db$:

$$dP_z = C_z db^{X_{P_z}} a^{Y_{P_z}} \left(\frac{2\pi n}{1000} \right)^{Z_{P_z}} \delta_r^{U_{P_z}}.$$

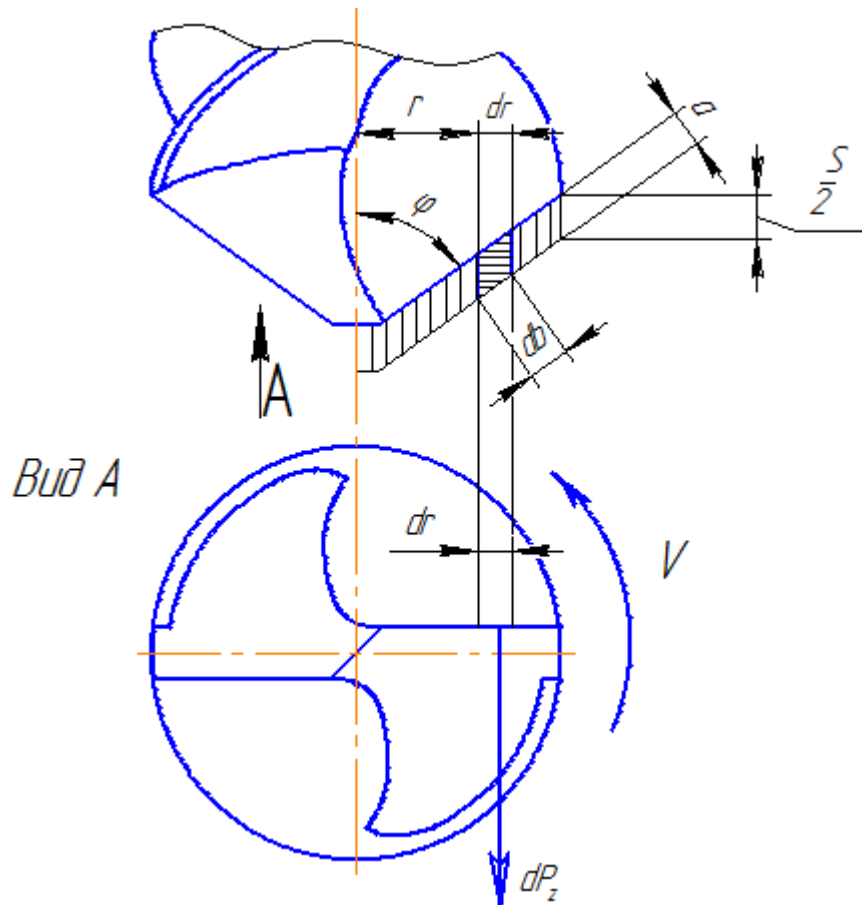


Рис. 3.13. Схема к расчету момента резания при сверлении

В данном соотношении при $X_{P_z} = 1$ обозначим

$$db = \frac{dr}{\sin \varphi}; \quad a = \frac{1}{2} S \sin \varphi; \quad \delta_r \approx \frac{C}{r^q}.$$

Тогда получим:

$$dP_z = C_z \frac{dr}{\sin \varphi} \frac{S^{Y_{P_z}} \sin^{Y_{P_z}} \varphi}{2^{Y_{P_z}}} \left(\frac{2\pi n}{1000} \right)^{Z_{P_z}} r^{Z_{P_z}} \frac{C^{U_{P_z}}}{r^{qU_{P_z}}}.$$

Обозначим

$$C_0 = \frac{C_Z \sin^{Y_{P_z}} \varphi C^{U_{P_z}}}{2^{Y_{P_z}} \sin \varphi} \left(\frac{2\pi n}{1000} \right)^{Z_{P_z}}.$$

В этом случае выражение упростится:

$$dP_Z = C_0 S^{Y_{P_z}} r^{Z_{P_z} - qU_{P_z}} dr.$$

Поскольку момент силы на этом участке выражается соотношением

$$dM = dP_Z r = C_0 S^{Y_{P_z}} r^{1+Z_{P_z} - qU_{P_z}} dr,$$

то момент резания на всей режущей кромке будет выражаться соотношением

$$M = C_0 S^{Y_{P_z}} \int_0^{D/2} r^{1+Z_{P_z} - qU_{P_z}} dr.$$

Так как

$$\int_0^{D/2} r^{1+Z_{P_z} - qU_{P_z}} dr = \frac{D^{2+Z_{P_z} - qU_{P_z}}}{(2 + Z_{P_z} - qU_{P_z}) 2^{2+Z_{P_z} - qU_{P_z}}},$$

то окончательно с соответствующими сокращениями получим, что

$$M = C_M D^{X_M} S^{Y_M},$$

где $Y_M = Y_{P_z}$; $X_M = 2 + Z_{P_z} - qU_{P_z}$; C_M – коэффициент, который учитывает влияние остальных параметров на момент резания.

3.8. Расчет сил резания при фрезеровании прямозубой цилиндрической фрезой

Суммарная сила резания при фрезеровании зависит от числа зубьев фрезы, находящихся в зоне резания (рис. 3.14).

Силы, действующие на каждый зуб фрезы, рассчитываются по формулам Челюсткина с учетом того, что ширина среза b – это ширина обрабатываемой детали, а толщина среза

$$a_{Z_\mu} = S_Z \sin \mu.$$

В этом случае соотношения для расчета P_Z и P_N будут иметь следующий вид:

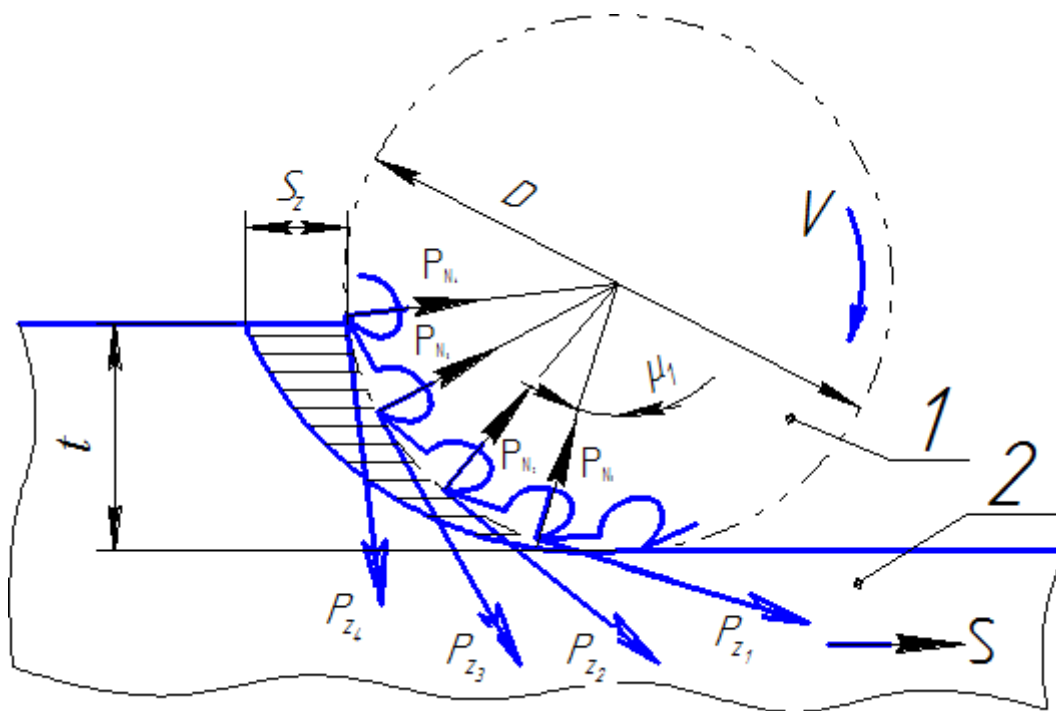


Рис. 3.14. Схема действия сил при цилиндрическом фрезеровании: 1 – инструмент, 2 – обрабатываемая деталь

$$P_{Z_i} = C_Z b^{X_{P_Z}} S_Z^{Y_{P_Z}} V^{Z_{P_Z}} \delta^{U_{P_Z}} \sin^{Y_{P_Z}} \mu_i,$$

$$P_{N_i} = C_N b^{X_{P_N}} S_Z^{Y_{P_N}} V^{Z_{P_N}} \delta^{U_{P_N}} \sin^{Y_{P_N}} \mu_i.$$

Силы P_Z и P_N увеличиваются по мере выхода зубьев из зоны резания, поскольку в этом случае непрерывно увеличивается толщина среза.

Равнодействующая сил в зоне резания определится векторной суммой всех значений P_Z и P_N . Графически это можно определить, построив многоугольник сил путем соответствующего последовательного переноса векторов со схемы на рис. 3.14 (рис. 3.15).

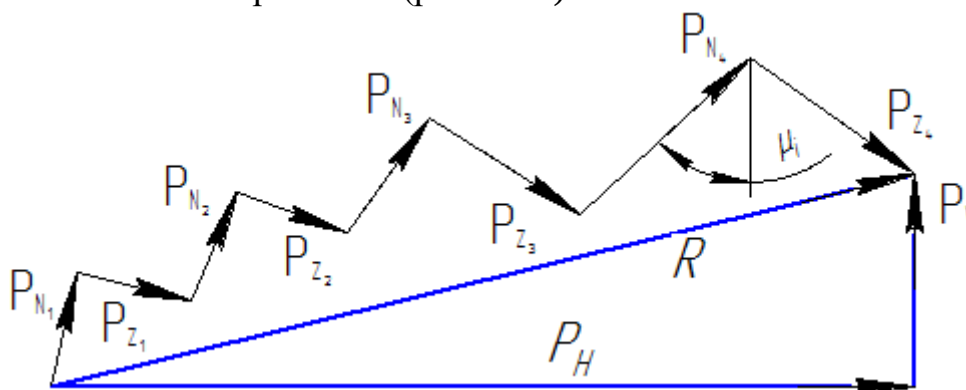


Рис. 3.15. Многоугольник сил в зоне фрезерования

В результате векторного суммирования получим равнодействующую R , которую можно разложить на горизонтальную и вертикальную составляющие P_H и P_V как проекции всех сил, действующих в зоне резания. В соответствии со схемой на рис.3.15 можно записать, что

$$P_H = \sum_{i=1}^m P_{Z_i} \cos \mu_i + \sum_{i=1}^m P_{N_i} \sin \mu_i ,$$

$$P_V = \sum_{i=1}^m P_{Z_i} \sin \mu_i - \sum_{i=1}^m P_{N_i} \cos \mu_i .$$

Данные соотношения определяют составляющие P_H и P_V при встречном фрезеровании (фрезерование против направления движения подачи). В этом случае всегда $P_H > 0$, а составляющая P_V может менять знак в процессе резания, т. е. P_V может принимать значения положительные, отрицательные или равные нулю.

При попутном фрезеровании (по направлению подачи) деталь всегда прижимается к столу станка, т. е. $P_V > 0$, в то время как горизонтальная составляющая может изменять направление в зависимости от условий обработки, т. е. P_H может принимать значения положительные, отрицательные или равные нулю. При встречном фрезеровании съём металла происходит, начиная с нулевой толщины среза, когда $\mu = 0$. В связи с этим резко возрастают трение при врезании и износ зуба фрезы. Этот недостаток отсутствует при фрезеровании по направлению подачи, когда врезание начинается с максимальной толщины среза

$$a_{\max} = S_z \sin \mu_{\max} .$$

Однако в связи с тем, что горизонтальная составляющая P_H совпадает с направлением подачи, в процессе резания могут возникнуть вибрации при наличии люфтов в механизме подачи фрезерного станка. Кроме того, фрезерование прямозубой цилиндрической фрезой связано с изменением в процессе резания сил и момента резания по мере врезания, так как в момент выхода зуба фрезы из зоны резания происходит резкое падение нагрузки.

3.9. Средний момент резания при фрезеровании

Наибольший момент резания при фрезеровании подсчитывается по формуле:

$$M_{\max} = \frac{D}{2} \sum_{i=1}^m P_{Z_i}^{(\max)} .$$

Однако в некоторых случаях необходимо определить среднее значение момента и мощности при резании с точки зрения расхода электроэнергии и

других целей. Рассмотрим упрощенную схему зависимости момента резания от угла поворота μ фрезы (рис. 3.16).

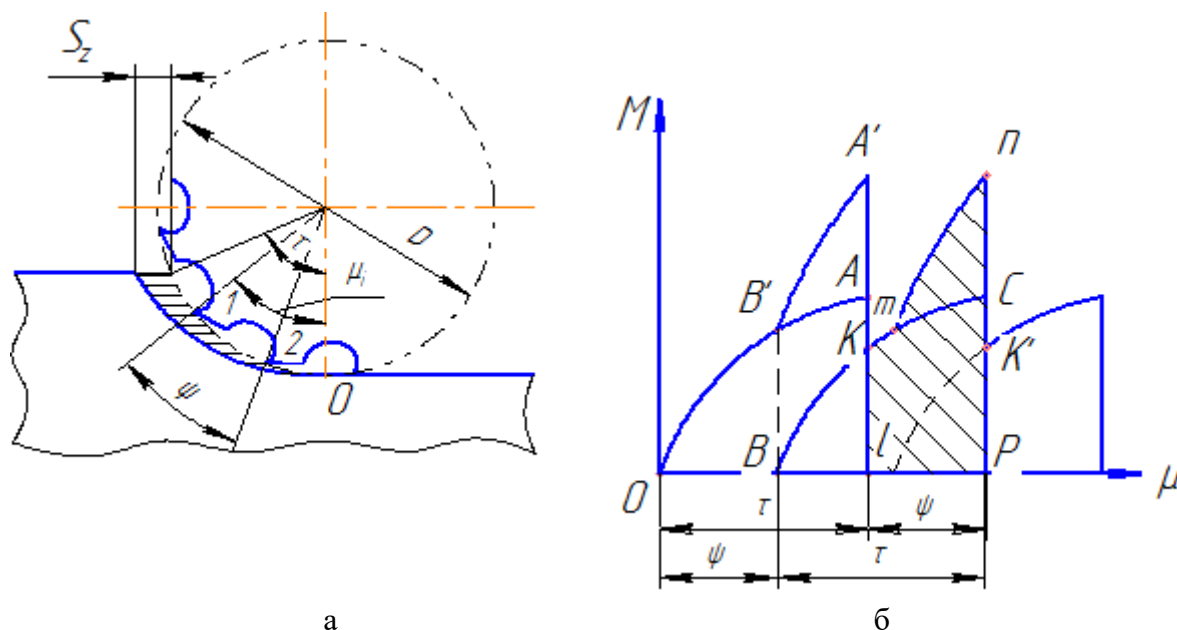


Рис. 3.16. Схема к расчету среднего момента резания при фрезеровании

График изменения момента при работе зуба 1 можно изобразить кривой OA (рис. 3.16, б), где точка O – врезание зуба 1 при $\mu=0$, и точка A соответствует моменту, когда зуб 1 будет в положении $\mu=\tau$. Поскольку угол между двумя соседними зубьями определится по формуле:

$$\psi = \frac{360^\circ}{Z}, \text{ где } Z - \text{число зубьев фрезы,}$$

то в момент времени, когда μ будет иметь значение ψ , в работу вступает 2-й зуб фрезы. График зависимости момента для 2-го зуба – кривая BC , аналогичная кривой OA , но смещенная относительно последней на угол ψ . Далее в работу вступит 3-й зуб с отставанием по μ на угол ψ и т. д. После суммирования получим следующую зависимость. Начиная с точки O работает 1-й зуб, в точке $B(B')$ вступает в работу 2-й зуб, и момент резания подскакивает до точки A' . В этот момент времени μ достигает значения τ , и из зоны резания выходит 1-й зуб, и момент резания скачком опускается до точки K . В работе остается один зуб до точки m на графике, когда в зону резания войдет 3-й зуб, момент резания увеличится до точки n . При выходе из зоны резания следующего зуба момент резания упадет до точки K' и т. д.

Из рис. 3.16,б видно, что циклически повторяется график зависимости, определяемый кривыми $K-m-n-K'$. Площадь, очерченная этой ломаной, равна площади под графиком $O-A-l$. Следовательно,

средний момент можно вычислить как площадь фигуры $O-A-l$, деленную на угол ψ , т. е.

$$M_{cp} = \frac{nl.l - k - m - n - p}{\psi} = \frac{nl.O - A - l}{\psi} = \frac{1}{\psi} \int_0^{\tau} P_Z \frac{D}{2} d\mu.$$

Следовательно, с учетом формулы Челюсткина:

$$M_{cp} = \frac{D}{2\psi} C_Z b^{X_{P_Z}} S_Z^{Y_{P_Z}} V^{Z_{P_Z}} \delta^{U_{P_Z}} \int_0^{\tau} \sin^{Y_{P_Z}} \mu d\mu.$$

Так называемый «фрезерный интеграл»:

$$I = \int_{\mu_1}^{\mu_2} \sin^{Y_{P_Z}} \mu d\mu = \frac{2^{Y_{P_Z}+1}}{Y_{P_Z}+1} \left(\sin^{Y_{P_Z}+1} \frac{\mu_2}{2} - \sin^{Y_{P_Z}+1} \frac{\mu_1}{2} \right).$$

Подставив значение I , получим:

$$M_{cp} = \frac{Dz}{4\pi} C_Z b^{X_{P_Z}} S_Z^{Y_{P_Z}} V^{Z_{P_Z}} \delta^{U_{P_Z}} \frac{2^{Y_{P_Z}+1}}{Y_{P_Z}+1} \sin^{Y_{P_Z}+1} \frac{\tau}{2}.$$

Если свести все постоянные параметры к коэффициенту C_M , то окончательно получим:

$$M_{cp} = C_M Dz b^{X_{P_Z}} S_Z^{Y_{P_Z}} \sin^{Y_{P_Z}+1} \frac{\tau}{2},$$

где D – диаметр фрезы, Z – число зубьев фрезы, b – ширина среза, S_Z – подача на зуб, τ – угол контакта фрезы с заготовкой.

3.10. Силы резания при фрезеровании фрезой с винтовыми зубьями

Фрезерование цилиндрическими фрезами с винтовыми зубьями позволяет существенно повысить качество обработки, а при определенных значениях параметров обработки обеспечить равномерное фрезерование, когда размеры среза и силы резания не зависят от угла поворота и вращения инструмента. Положение зуба фрезы в зоне резания характеризуется углами: углом входа μ_1 и углом выхода μ_2 из зоны резания. Сечение среза (рис. 3.17) определяется шириной среза b и толщиной среза a_{Z_μ} , последняя изменяется в зависимости от угла μ :

$$a_{Z_\mu} = S_Z \sin \mu$$

в пределах угла контакта от $\mu = 0$ до $\mu = \tau$.

Определим силу резания P_Z по формуле Челюсткина на участке режущей кромки шириной db :

$$dP_Z = C_Z (db)^{X_{P_Z}} a_{Z\mu}^{Y_{P_Z}} V^{Z_{P_Z}} \delta^{U_{P_Z}}.$$

Положив $X_{P_Z} = 1$ и $a_{Z\mu} = S_Z \sin \mu$, получим:

$$dP_Z = C_Z db S_Z^{Y_{P_Z}} \sin^{Y_{P_Z}} \mu V^{Z_{P_Z}} \delta^{U_{P_Z}}.$$

В этом соотношении переменная – угол μ с дифференциалом $d\mu$. Как видно из схемы на рис. 3.17,

$$db = \frac{D}{2 \sin \omega} d\mu.$$

Следовательно, после подстановки получим:

$$dP_Z = C_Z \frac{D}{2 \sin \omega} S_Z^{Y_{P_Z}} V^{Z_{P_Z}} \delta^{U_{P_Z}} \sin^{Y_{P_Z}} \mu d\mu.$$

В этом случае сила резания на всем лезвии инструмента – это окружная сила, которая может быть получена интегрированием выражения для dP_Z в пределах от μ_1 до μ_2 , т.е.

$$P_{окр.мгн.} = \frac{C_Z D}{2 \sin \omega} S_Z^{Y_{P_Z}} V^{Z_{P_Z}} \delta^{U_{P_Z}} \int_{\mu_1}^{\mu_2} \sin^{Y_{P_Z}} \mu d\mu.$$

Подставив в последнее выражение значение «фрезерного интеграла», получим:

$$P_{окр.мгн.} = \frac{2^{Y_{P_Z}} C_Z D}{(Y_{P_Z} + 1) \sin \omega} S_Z^{Y_{P_Z}} V^{Z_{P_Z}} \delta^{U_{P_Z}} \sin^{Y_{P_Z} + 1} \frac{\mu_2}{2} - \sin^{Y_{P_Z} + 1} \frac{\mu_1}{2}.$$

Поскольку в зоне резания от $\mu = 0$ до $\mu = \tau$ может находиться несколько зубьев фрезы, то окружная мгновенная суммарная сила резания определяется суммой окружных мгновенных значений сил:

$$P_{окр.мгн.сум.} = \frac{2^{Y_{P_Z}} C_Z D}{(Y_{P_Z} + 1) \sin \omega} S_Z^{Y_{P_Z}} V^{Z_{P_Z}} \delta^{U_{P_Z}} \sum_{i=1}^m \left(\sin^{Y_{P_Z} + 1} \frac{\mu_2^{(i)}}{2} - \sin^{Y_{P_Z} + 1} \frac{\mu_1^{(i)}}{2} \right),$$

где m – число зубьев фрезы, находящихся в зоне резания, D – диаметр фрезы, ω – угол подъема зубьев фрезы.

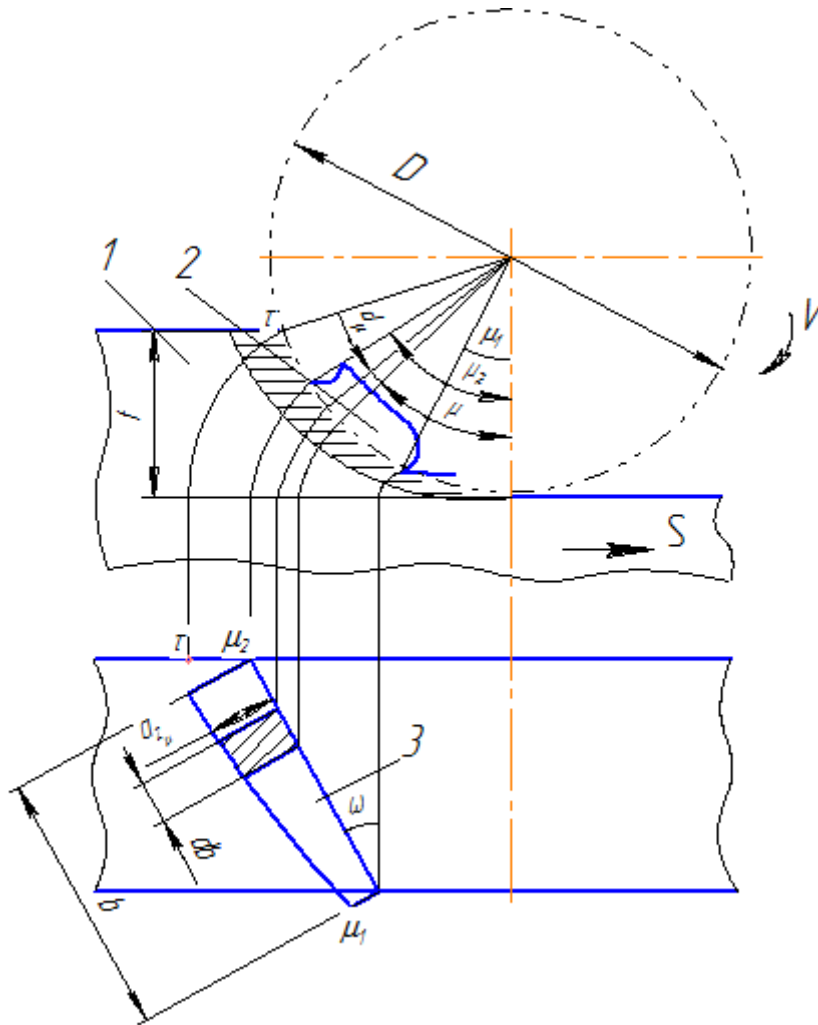


Рис. 3.17. Схема к расчету сил резания при работе фрезой с винтовыми зубьями:
1 – обрабатываемая деталь, 2 – зуб фрезы, 3 – режущая кромка фрезы в развертке с углом спирали ω

3.11. Силы резания при торцевом фрезеровании

При торцевом фрезеровании детали шириной b_u зуб фрезы работает против направления подачи первую половину пути, а затем вторую половину пути идет по направлению подачи (рис.3.18).

При произвольном положении зуба

$$a'_{z_\mu} = S_z \sin \mu ,$$

при этом толщина среза в нормальном сечении

$$a_{z_\mu} = a'_{z_\mu} \sin \varphi = S_z \sin \varphi \sin \mu .$$

Ширина среза

$$b = \frac{t}{\sin \varphi} .$$

Поэтому сила резания на одном зубе фрезы в соответствии с формулой Челюсткина определится выражением:

$$P_{Z\mu} = C_Z b^{X_{P_z}} a^{Y_{P_z}} V^{Z_{P_z}} \delta^{U_{P_z}}.$$

Положив $a = S_z \sin \varphi \sin \mu$ и $b = \frac{t}{\sin \varphi}$, получим:

$$P_{Z\mu} = C_Z \frac{t^{X_{P_z}}}{\sin^{X_{P_z}-Y_{P_z}} \varphi} S_Z^{Y_{P_z}} V^{Z_{P_z}} \delta^{U_{P_z}} \sin^{Y_{P_z}} \mu.$$

Если в зоне резания участвует m зубьев, то окружная сила резания определится суммой сил:

$$P_{окр.} = C_Z \frac{t^{X_{P_z}}}{\sin^{X_{P_z}-Y_{P_z}} \varphi} S_Z^{Y_{P_z}} V^{Z_{P_z}} \delta^{U_{P_z}} \sum_{i=1}^m \sin^{Y_{P_z}} \mu_i.$$

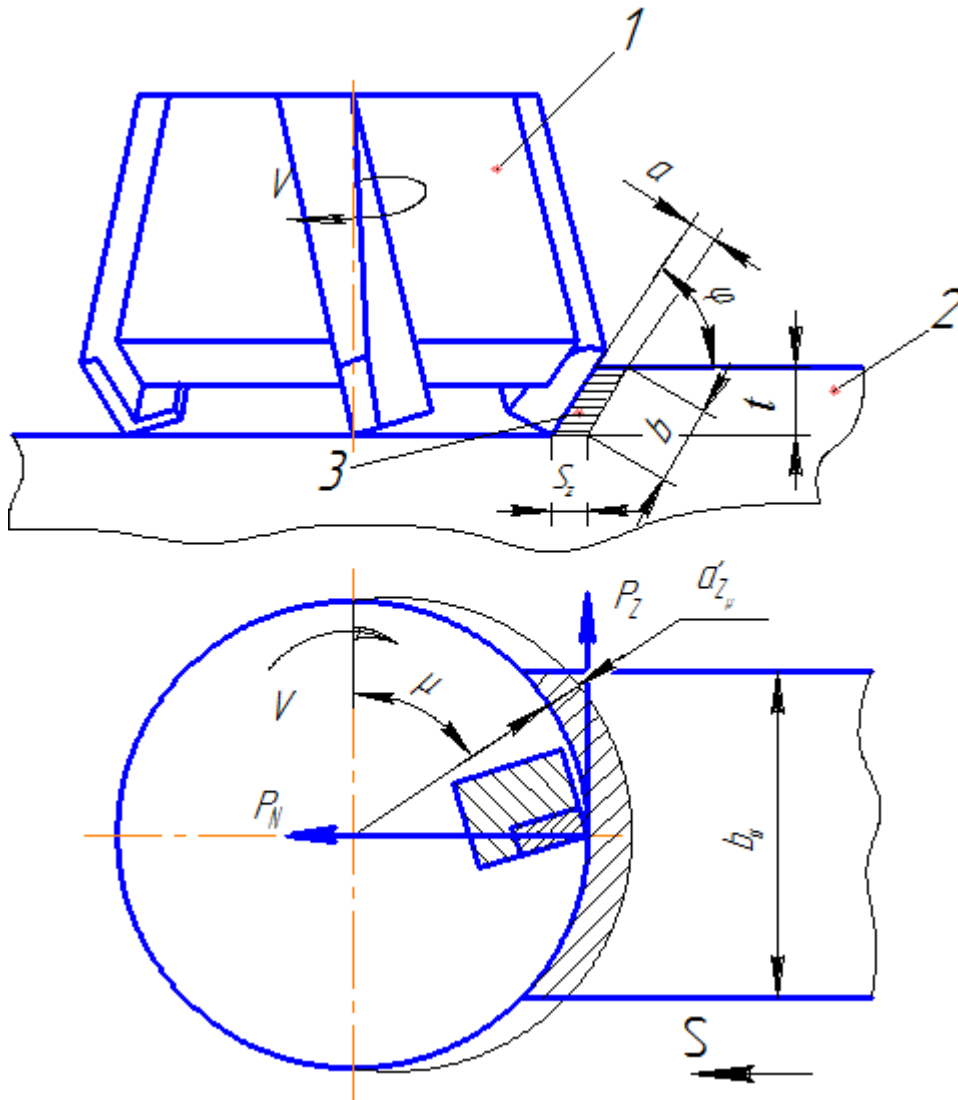


Рис. 3.18. Схема торцевого фрезерования: 1 – инструмент, 2- обрабатываемая деталь, 3 – сечение среза $b \times a$

3.12. Силы резания при протягивании

Сила резания одним зубом протяжки определяется размером среза (рис.2.19). Для круглой протяжки размеры среза $a\pi d_i$. Поэтому сила резания

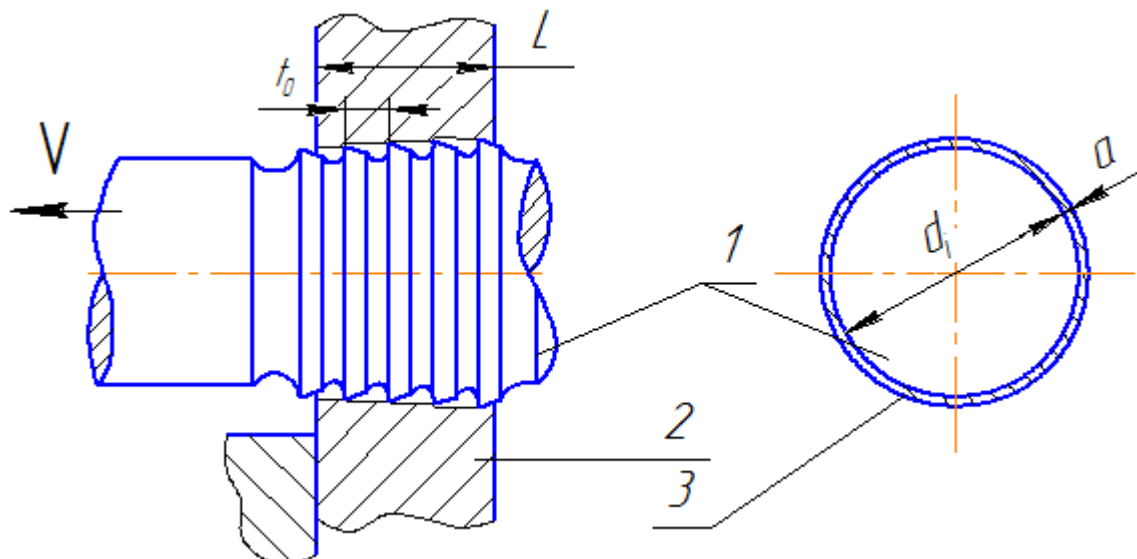


Рис. 3.19. Схема процесса резания круглой протяжкой: 1 – круглая протяжка, 2 – обрабатываемая деталь, 3 – сечение срезаемого слоя металла

в направлении скорости обработки на i -м зубе протяжки определяется выражением:

$$P_{Zi} = C_Z (\pi d_i)^{X_{P_z}} a^{Y_{P_z}} V^{Z_{P_z}} \delta^{U_{P_z}}.$$

Поскольку в зоне резания находится m зубьев, где $m = \frac{L}{t_0}$, L – длина протягивания, t_0 – шаг зубьев протяжки, то общее тяговое усилие на протяжке определится соотношением:

$$P_{тяг.} = C_Z \frac{L}{t_0} (\pi D)^{X_{P_z}} a^{Y_{P_z}} V^{Z_{P_z}} \delta^{U_{P_z}},$$

где D – максимальный диаметр зуба протяжки, $\delta = 90^\circ - \gamma$ – угол резания. Эта сила используется для расчета наиболее слабого сечения протяжки, которое из конструктивных соображений должно быть предусмотрено на хвостовике протяжки.

Глава 4. Инструментальные материалы

Огромное влияние на производительность процессов механической обработки резанием материалов оказывает совершенствование свойств инструментальных материалов.

Современная металлообрабатывающая промышленность широко использует станочное оборудование с числовым программным управлением. Работа такого оборудования характеризуется ужесточением условий эксплуатации режущего инструмента, в связи с все больше возрастающими скоростями механической обработки материалов. При этом затраты на инструментальные материалы в ряде случаев составляют до 20% затрат на механическую обработку. Таким образом, повышение режущих свойств инструмента и инструментального материала при обеспечении высокой надежности, является одной из важнейших задач повышения эффективности механической обработки материалов.

В процессе выполнения своих функций контактные площадки инструмента подвергаются интенсивному воздействию высоких контактных напряжений и температур, значения которых имеют переменный характер, а взаимодействие с обрабатываемым материалом и реагентами из окружающей среды приводит к протеканию интенсивных физико- химических процессов (адгезии, диффузии, окисления и коррозии).

Поэтому инструментальные материалы должны обладать:

1. Высокой твердостью и износостойкостью.
2. Высокой теплостойкостью - способностью сохранять режущие свойства при высоких температурах.
3. Высокой прочностью и ударной вязкостью.
4. Технологичностью и экономичностью - хорошей обрабатываемостью и минимальным содержанием дефицитных легирующих элементов без ущерба для режущих свойств.

4.1 Углеродистые и легированные инструментальные стали.

Для изготовления режущего инструмента применяют высокоуглеродистые, высококачественные стали с содержанием углерода 0,9...1,3% (У9А, У10А, У12А и т. д.).

Углеродистые инструментальные стали обозначаются буквой *У*, за которой следует цифра, характеризующая массовое содержание углерода в стали, умноженная на 0,1. Так в стали марки У10 массовое содержание углерода составляет 1%. Буква *А* в обозначении соответствует высококачественным сталям с пониженным массовым содержанием

примесей.

Таблица 4.1. Некоторые свойства наиболее применяемых углеродистых инструментальных сталей.

Марка стали	Физико-механические свойства				Теплостойкость, °С
	ρ г/см ³	НВ, МПа	После отжига	После закали и отпуска	
			НВ, МПа	HRC ₃	
У10;У10А	7,81	321	197	63-65	200-250
У11;У11А	7,81	341	207	63-65	200-250
У12;У12А	7,81	341	207	63-65	200-250
У13;У13А	7,81	341	217	63-65	200-250

После полной термической обработки они имеют высокую твёрдость (63...65 HRC₃), что позволяет режущему инструменту, изготовленному из данных сталей, обрабатывать заготовки из углеродистых сталей и чугунов в отожжённом и нормализованном состоянии с твёрдостью 30...32 HRC₃. Из-за низкой теплостойкости режущий инструмент, изготовленный из них, работает на скоростях резания не выше 20...25 м/мин.

Износостойкость углеродистых сталей в указанном диапазоне скоростей резания может быть повышена путём легирования их небольшим количеством вольфрама, хрома, кремния и марганца. Такие инструментальные стали получили название легированных (9ХС, ХВГ, ХВ6 и др.).

Таблица 4.2. Некоторые свойства наиболее применяемых легированных инструментальных сталей.

Марка стали	Физико-механические свойства				Теплостойкость, °С
	ρ г/см ³	НВ, МПа	После отжига	После закали и отпуска	
			НВ, МПа	HRC ₃	
11Х;11ХФ	7,82	341	217	63-65	200-250
9ХС	7,83	415	241	63-66	240-250
ХВСГ	7,83	388	255	62-64	200-220
ХВГ	7,83	5140	255	63-66	200-220
Х6ВФ	-	5780	229	59-61	400-500
Х12Ф1	-	5780	225	63-65	490-510
Х12М	-	5780	255	63-65	490-510

Легированные инструментальные стали обозначаются цифрой, характеризующая массовое содержание углерода в десятых долях процента (если цифра отсутствует, то содержание углерода 1%), за которой следуют буквы, соответствующие легирующим элементам (Г-марганец, Х-хром, С- кремний, В-вольфрам, Ф-ванадий), и цифры, обозначающие содержание элемента в процентах. Они обладают повышенной твёрдостью (HRCэ 63...65), средняя теплостойкость – 250 °С. Из легированных сталей изготавливают сложнопрофильные мелкоразмерные инструменты: развёртки, фасонные резцы, метчики, плашки.

4.2 Быстрорежущие стали

Доля режущего инструмента из быстрорежущей стали (в общем объёме режущего инструмента) составляет до 70%.

Повышенная теплостойкость быстрорежущих сталей определяется введением в их состав легирующих элементов (W, Mo, Cr, V и Co), образующих сложные карбиды, которые связывает практически весь углерод. Поэтому коагуляция карбидов происходит при повышенных температурах и теплостойкость стали повышается до 580...700 °С. Высокая твёрдость быстрорежущих сталей (63...70 HRCэ), прочность на изгиб и сжатие связаны с переходом остаточного аустенита в мартенсит. Быстрорежущие стали обозначаются буквами, соответствующие карбидообразующим и легирующим элементам (В-вольфрам, М-молибден, Ф-ванадий, А-азот, К- кобальт). За буквой следует цифра, обозначающая среднее массовое содержание элемента в процентах. Цифра, стоящая в начале обозначения стали, указывает содержание углерода в десятых долях процента.

По уровню теплостойкости быстрорежущие стали делятся на три группы:

1. Стали нормальной теплостойкости – вольфрамовые быстрорежущие (P18, P9, P12) и вольфрамомолибденовые быстрорежущие стали (P6M5, P8M3).
2. Стали повышенной теплостойкости – вольфрамокобальтовые быстрорежущие (P9K5, P9K10, P6M5K5), вольфрамованадиевые быстрорежущие стали (P12Ф3, P6M5Ф3).
3. Стали высокой теплостойкости (B11M7K23, B14M7K25).

Быстрорежущие стали нормальной теплостойкости. Стали данной группы имеют твердость в закаленном состоянии 63-65 HRCэ, предел прочности при изгибе 2,9-3,4 ГПа, ударную вязкость 2,7-4,8 Дж/м², теплостойкость 620-630 °С (табл. 3). Указанные в табл.3 марки сталей

получили наиболее широкое распространение для изготовления режущего инструмента.

Режущие инструменты, изготовленные из сталей нормальной теплостойкости, используются при обработке заготовок из конструкционных сталей, чугунов, цветных сплавов и конструкционных пластмасс. Применяются стали дополнительно легированные азотом, например, Р6АМ5, которые являются модификациями обычных быстрорежущих сталей. Легирование азотом повышает твердость стали и режущие свойства инструмента.

Таблица 4.3. Некоторые свойства быстрорежущих сталей нормальной теплостойкости.

Марка стали	ρ г/см ³	Твердость		Температура, °С		Тепло- стойкость, °С
		После отжига, НВ	После закалки и отпуска, HRC _Э	Закалки	Отпуска	
P18	8,75	265	63	1270	560	620
P9	8,3	255	63	1220	550	620
P6M5; P6AM5	8,15	255	64	1220	550	620
11P3AM3Ф2	7,9	255	63	1200	550	620
P6M5Ф3	8,15	269	64	1220	550	630
P12Ф3	8,39	269	64	1250	560	630
P9K5	8,25	269	64	1230	570	630
P6M5K5	8,15	269	65	1230	550	630
P9M4K8	8,3	285	65	1230	550	630

Быстрорежущие стали повышенной теплостойкости. Повышение износостойкости и теплостойкости быстрорежущих сталей достигается дополнительным легированием их ванадием и кобальтом с соответствующим изменением содержания углерода (табл. 4.4, 4.5).

Таблица 4.4. Некоторые составы высокованадиевых сталей.

Марка стали	Химический состав, % (масса)				
	C	W	Mo	Cr	V
P12Ф4	1,27	12	до 1	4,0	4,0
P6M5Ф3	1,2	5,8	5,0	4,2	3,0
P6M5Ф4	1,3	5,8	5,0	4,2	4,0

Стали данной группы характеризуются повышенным содержанием углерода. Твердость сталей в закаленном состоянии достигает 65-67 HRCэ, теплостойкость сталей – 640-650 °С. Инструменты, изготовленные из сталей повышенной теплостойкости, используются при обработке заготовок из жаропрочных и нержавеющей сталей и сплавов, а также конструкционных сталей повышенной прочности.

Наиболее распространенные кобальтовые стали представлены в табл.4.5.

Таблица 4.5. Составы наиболее применяемых кобальтовых быстрорежущих сталей.

Марка стали	Химический состав, % по массе					
	C	W	Mo	Cr	V	Co
P9K5	0,9	9,0	до 1,0	4,0	2,3	5,0
P9K10	0,9	9,0	до 1,0	4,0	2,3	10,0
P18Ф2K5	0,77	18,0	до 1,0	4,0	1,5	5,0
P6M5K5	0,88	6,2	5,0	4,0	1,9	5,0
P6M5K8	0,90	6,2	5,0	4,1	1,9	8,0
P2M9K8	0,90	1,8	8,6	4,0	2,0	8,2
P12Ф4K5	1,35	12,2	до 1,0	4,5	4,0	4,8

Наряду с большими достоинствами по износостойкости, твердости, теплостойкости и теплопроводности, кобальтовые стали имеют существенные недостатки: относительно низкая пластичность, высокая склонность к обезуглероживанию, в процессе нагрева под горячее деформирование и закалку, сниженная прочность при изгибе.

Быстрорежущие стали высокой теплостойкости (стали с интерметаллидным упрочнением). Данные стали характеризуются пониженным содержанием углерода (содержание C до 0,3%) и большим количеством легирующих элементов (B11M7K23, B14M7K25) (табл. 4.6). Они имеют твердость 69-70 HRCэ и теплостойкость 700-720 °С.

Таблица 4.6. Составы некоторых сталей высокой теплостойкости.

Марка стали	Химический состав, % по массе					
	C	W	Mo	Cr	V	Co
B11M7K23	0,1	11,0	7,0	-	0,5	23,0
B14M7K25	0,1	14,0	7,0	-	0,5	25,0

Высокая теплостойкость, твердость и износостойкость сталей данной группы определяется повышением уровня температур, приводящих к

фазовым превращениям, а также большой сопротивляемостью коагуляции интерметаллидной фазы.

4.3 Твердые сплавы.

Твёрдые сплавы являются основным инструментальным материалом, обеспечивающим высокопроизводительную обработку материалов резанием.

Общее количество режущего инструмента из твердого сплава не превышает 25%, но из-за высокой скорости резания (в 2,5...3 раза выше по сравнению с быстрорежущим инструментом) они снимают до 65% всей стружки (из всего объёма стружки, снимаемой инструментами из всех имеющих инструментальных материалов). Стандартные твердые сплавы состоят из тугоплавких соединений (карбидов вольфрама, титана и тантала) и связующей фазы (кобальт) и подразделяются на три группы:

1. однокарбидные (вольфрамо-кобальтовые, группа ВК, (WC + Co));
2. двухкарбидные (титановольфрамовые, группа ТК, (WC + TiC + Co));
3. трёхкарбидные (титано-тантало-вольфрамовые, группа ТТК, (WC + TiC + TaC + Co)).

Обозначение твердых сплавов включает буквы, характеризующие карбидообразующие элементы (В-вольфрам, Т-титан, вторая буква Т-тантал) и связку (К-кобальт). Цифра после буквы К обозначает массовую долю связки в процентах. Массовая доля карбидообразующих элементов в однокарбидных сплавах, содержащих только карбид вольфрама, определяется разностью между 100% и массовой долей связки. Например, сплав ВК4 содержит 4% кобальта и 96% WC. В двухкарбидных WC+TiC сплавах цифра после буквы карбидообразующего элемента обозначает массовую долю карбида этого элемента (TiC), а массовая доля карбида второго элемента (WC) определяется разницей между 100% и массовыми долями связки и карбида первого элемента (например, сплав Т5К10 содержит 5% TiC, 10% Co и 85% WC). В трехкарбидных WC+TiC+TaC сплавах цифра после букв ТТ означает массовую долю карбидов титана и тантала. Массовая доля карбида вольфрама определяется разницей между 100% и массовыми долями связки и карбидов TiC и TaC. Например, сплав ТТ7К12 содержит 12% Co, 7% карбидов титана и тантала (TiC+TaC) и 81% WC.

Вольфрамо-кобальтовые твердые сплавы

Вольфрамо-кобальтовые сплавы (ВК) состоят из карбида вольфрама и кобальта. Марки сплавов этой группы различаются по содержанию в них кобальта, размерами зерен карбида вольфрама (WC) и технологией

изготовления. Для оснащения режущего инструмента применяются сплавы с содержанием кобальта от 3% до 10% весовых (табл. 4.7).

Таблица 4.7. Физико-механические характеристики
вольфрамкобальтовых сплавов.

Марка сплава	Состав, %			Плотность ρ , г/см ³	HRA, не менее
	WC	Другие соединения	Co		
ВК3	97	-	3	15,0-15,3	89,5
ВК3-М	97	-	3	15,0-15,3	91,0
ВК6	94	-	6	14,6-15,0	88,5
ВК6-М	94	-	6	14,8-15,1	90,0
ВК6-ОМ	92	TaC	6	14,7-15,0	90,5
ВК8	92	-	8	14,4-14,8	87,5
ВК10- ХОМ	88	Cr ₂ C ₃	10	14,3-14,6	89,0

При увеличении в сплавах содержания кобальта в рассматриваемом диапазоне предел прочности при поперечном изгибе и эксплуатационная прочность при резании возрастают, в то время как твердость и износостойкость уменьшаются. Так, сплав ВК3 с минимальным содержанием кобальта, как наиболее износостойкий, но наименее прочный, рекомендуют для чистовой обработки с максимально допустимой скоростью резания, а сплавы ВК8 и ВК10-ХОМ – для черновой обработки с пониженной скоростью резания и увеличенным сечением среза в условиях ударных нагрузок.

Вольфрамкобальтовые сплавы рекомендуются преимущественно для обработки материалов, дающих дискретные типы стружек (элементная, стружка надлома): чугуны, цветные материалы, стеклопластики, фарфор и труднообрабатываемые материалы (коррозионностойкие, высокопрочные стали, жаропрочные сплавы на основе никеля и титана и т.д.).

Титановольфрамовые твердые сплавы

Титановольфрамовые сплавы (ТК) выпускают главным образом для оснащения инструментов при обработке резанием сталей, дающих сливную стружку. По сравнению со сплавами ВК они обладают большей стойкостью против окисления, твердостью и теплостойкостью (теплостойкость сплавов ТК~900°С, сплавов ВК~800°С), в то же время меньшую теплопроводность и электропроводность, а также меньший модуль упругости.

Повышенная способность титановольфрамовых сплавов

сопротивляться адгезионно-усталостному изнашиванию объясняется тем, что температурный порог их схватывания со сталью существенно выше, чем у сплавов WC-Co. Титановольфрамовые сплавы позволяют применять более высокие скорости резания при обработке стали и существенно повысить стойкость инструмента.

Сплавы группы ТК стандартных марок имеют различный состав в зависимости от условий их применения. Содержание карбида титана колеблется в пределах 5-30%, кобальта от 4 до 10% (табл.4. 8).

Таблица 4.8. Физико-химические характеристики титано-вольфрамо-кобальтовых сплавов (ГОСТ 3882-74)

Марка сплава	Состав, %			Плотность ρ , г/см ³	HRA, не менее
	WC	TiC	Co		
T30K4	66	30	4	9,5-9,8	92,0
T15K6	79	15	6	11,1-11,6	90,0
T14K8	78	14	8	11,2-11,6	89,5
T5K10	85	6	9	12,4-13,1	88,5

Так же, как и у сплавов WC-Co, предел прочности при изгибе и сжатии, а также ударная вязкость у сплавов ТК увеличивается с ростом содержания кобальта. С увеличением содержания углерода в пределах трехфазовой области прочность при изгибе растет, а твердость и износостойкость снижаются. В соответствии с приведенными закономерностями меняются и режущие свойства сплавов: увеличение содержания кобальта приводит к снижению износостойкости сплавов при резании, а с ростом содержания карбида титана (при постоянном объемном содержании кобальта) повышается износостойкость, но одновременно снижается эксплуатационная прочность. Поэтому такие марки сплавов, как T30K4 и T15K6, обладающие максимальным запасом пластической прочности, применяются в условиях чистовой и получистовой обработки стали с высокой скоростью резания, малыми или умеренными нагрузками на инструмент. Сплавы T5K10, T5K12 с наибольшим содержанием кобальта и запасом хрупкой прочности предназначены для работы в тяжелых условиях ударных нагрузок с пониженной скоростью резания.

Титано-тантало-вольфрамовые твердые сплавы

Промышленные титано-тантало-вольфрамовые твердые сплавы (сплавы ТТК) состоят из трех основных фаз: твердого раствора (Ti, W, Ta)C, карбида вольфрама и твердого раствора на основе кобальта.

Введение в сплавы карбида тантала улучшает их физико-механические и эксплуатационные свойства, что выражается в увеличении прочности при изгибе и твердости при комнатной и повышенной температурах, увеличении работы деформации при

повышенных температурах. Карбид тантала в сплавах снижает ползучесть, существенно повышает предел усталости трехфазных сплавов при циклическом нагружении, а также повышает термостойкость и стойкость против окисления на воздухе.

Отечественный стандарт (ГОСТ 3882-74) включает следующие марки сплавов этой группы – ТТ8К6, ТТ10К8Б, ТТ7К12, ТТ20К9, в которых содержание карбида тантала колеблется от 2 до 12% (табл. 9).

Исследование режущих свойств сплавов ТТК показало, что увеличение в сплаве содержания карбида тантала повышает его износостойкость при резании, особенно за счет меньшей склонности к лункообразованию и разрушению под действием термоциклических и усталостных нагрузок.

Таблица 4.9. Состав и характеристики физико-механических свойств титано-тантало-вольфрамовых марок твердых сплавов для резания(ГОСТ 3882-74)

Марка сплава	Состав, %				Плотность ρ , г/см ³	HRA, не менее
	WC	TiC	TaC	Co		
ТТ7К12	81	4	3	12	13,0-13,8	87,0
ТТ8К6	84	8	2	6	12,8-13,3	90,5
ТТ10К8-Б	82	3	7	8	13,5-13,8	89,0
ТТ20К9	67	9,4	14,1	9,5	12,0-13,0	91,0

С учетом отмеченных свойств, сплавы ТТК рекомендуют для тяжелой обработки, резания труднообрабатываемых материалов при значительном термомеханическом нагружении инструмента, а также операций прерывистого резания, особенно фрезерования, отличающихся переменным сечением среза и циклическими термомеханическими нагрузками на режущую часть инструмента.

4.4 Минералокерамика (режущая керамика).

Промышленность страны выпускает несколько групп минералокерамики: оксидную (белая керамика) на основе Al₂O₃ (Евростандарт – A1 – pure ceramic), оксиднокарбидную (черная керамика) на основе композиции Al₂O₃-TiC (Евростандарт – A2 – mixed ceramic), оксидонитридную (кортинит) на основе Al₂O₃-TiN и нитридокремниевую керамику на основе Si₃N₄ (Евростандарт – B – reinforced ceramic).

Основной особенностью режущей керамики является отсутствие связующей фазы, что значительно снижает степень ее разупрочнения при нагреве в процессе изнашивания, повышает пластическую прочность, что

и предопределяет возможность применения высоких скоростей резания, намного превосходящих скорости резания инструментом из твердого сплава. Если предельный уровень скоростей резания для твердосплавного инструмента при точении сталей с тонкими срезами и малыми критериями затупления составляет 500-600 м/мин, то для инструмента, оснащенного режущей керамикой, этот уровень увеличивается до 900-1000 м/мин

Составы основных типов режущей керамики и некоторых физико-механические свойства представлены в табл. 4.10.

Таблица 4.10. Состав, свойства и области применения минералокерамики

Марки керамики	Состав	Плотность, ρ г/см ³	HRA, не менее	Область применения
ЦМ332	Al ₂ O ₃ -99%, MgO-1%	3,85-3,90	91	K01-K05
ВО-13	Al ₂ O ₃ -99%	3,92-3,95	92	P01-P10, K01-K05
ВШ-75	Al ₂ O ₃	3,98	91-92	K01-K05
В-3	Al ₂ O ₃ -60%, TiC-40%	4,2	94	P01-P10
ВОК-63	Al ₂ O ₃ -60%, TiC-40%	4,2-4,6	94	P01-P05, K01-K05
ВОК-71	Al ₂ O ₃ -60%, TiC-40%	4,5-4,6	94	P01-P05, K01-K05
ОНТ-20 (кортинит)	Al ₂ O ₃ >70% TiN-30%	4,3	90-92	K01-K05
РК-30	Si ₃ N ₄ , Y ₂ O ₃ , TiC	3,2-3,4	94	K10-K20

Отсутствие связующей фазы оказывает и отрицательное влияние на эксплуатационные свойства керамического инструмента. В частности, снижаются хрупкая прочность, ударная вязкость, трещиностойкость. Это оказывает сильное влияние на характер изнашивания керамического инструмента.

Например, низкая трещиностойкость сплава является причиной формирования фронта трещин, которые из-за отсутствия пластической

связующей фазы не встречают барьеров, способных затормозить или остановить их развитие.

Инструмент рекомендуют для чистовой обработки серых, ковких, высокопрочных и отбеленных чугунов, низко- и высоколегированных сталей, в том числе улучшенных, термообработанных (HRCэ до 55-60), цветных сплавов, конструкционных полимерных материалов (K01-K05, P01- P05). В указанных условиях инструмент, оснащенный пластинами из режущей керамики, заметно превосходит по работоспособности твердосплавный инструмент.

4.5 Сверхтвердые синтетические поликристаллические инструментальные материалы (СТМ)

Сверхтвердыми принято считать инструментальные материалы, имеющие твердость по Виккерсу свыше 35ГПа.

Природный алмаз – самый твердый материал на Земле, который издавна применяется в качестве режущего инструмента. Принципиальное отличие монокристаллического природного алмаза от всех других инструментальных материалов, имеющих поликристаллическое строение, с точки зрения инструментальщика состоит в возможности получения практически идеально острой и прямолинейной режущей кромки. В Современной обрабатывающей промышленности применение резцов из природных алмазов для микроточения зеркально чистых поверхностей оптических деталей, дисков памяти, барабанов копировальной техники и т.п. постоянно возрастает. Однако из-за дороговизны и хрупкости природные алмазы не применяются в общем машиностроении, где требования к обработке деталей не столь высоки.

В 60-х годах 19 века методом каталитического синтеза при высоких статических давлениях из гексагональных фаз графита (С) и нитрида бора (BN) были получены мелкие частицы кубических фаз синтетического алмаза и нитрида бора. Крупные поликристаллы, предназначенные для лезвийных инструментов, были получены в промышленных условиях в начале 70-х годов.

В нашей стране первым способом получают поликристаллический кубический нитрид бора (ПКНБ) марок композит 01 (эльбор РМ) и композит 02 (бельбор), а также поликристаллический алмаз (ПКА) марок АСПК (карбонадо) и АСЕ (баллас). За рубежом изготовителями СТМ по технологии спекания являются три крупнейшие фирмы «General Electric» (США), «De Beers» (ЮАР) и «Sumitomo Electric» (Япония). Режущие инструменты из поликристаллов этих трех поставщиков производят сотни фирм во всем мире.

Поликристаллические сверхтвердые инструментальные материалы являются принципиально новыми, как по технологии изготовления, так и

по условиям эксплуатации, инструментальными материалами, которые позволяют обрабатывать изделия при скоростях резания на порядок выше скоростей, допускаемых при использовании твердосплавного инструмента. Сравнительные свойства СТМ на основе алмазов и КНБ представлены в табл. 4.11.

Таблица 4.11. Усредненные показатели физико-механических свойств современных СТМ и твердых сплавов

Свойства	Поликристаллические СТМ		Вольфрамо-кобальтовые твердые сплавы
	На основе нитрида бора	На основе алмаза	
HV, ГПа	40-45	70-100	17-19
E, ГПа	700-800	800-900	400-600
σ_u , МПа	600-800	800-1100	1400-2000
σ_b , МПа	400-500	800-1300	1400-1700
σ_{-b} , МПа	2500-5000	7000-8000	4000-5000
K_{1C} , МПа/м ^{-1/2}	6,5-8,5	-	10-17
Работа излома G_{1C} , Дж/м ⁻²	130-160	-	220
λ , Вт/(м·К)	5,0-10	7,0-15,0	10,0
$\alpha \cdot 10^{-5}$, 1/К	5-7	3,5-5	5-6
Коэффициент R^*	15	25	65
Жаропрочность, °С	1000-1200	700-750	80-900
Характеристика w_4^{**}	2	2	2

Вся гамма поликристаллов разделяется на пять основных групп: СТМ на основе алмаза (СПА), СТМ на основе плотных модификации нитрида бора (СПНБ), композиционные сверхтвердые материалы (КСТМ), двухслойные сверхтвердые композиционные материалы (ДСКМ).

СТМ на основе алмазов. Поликристаллы на основе синтетического алмаза можно разделить на четыре разновидности:

1. Поликристаллы, получаемые спеканием мелких алмазных порошков в чистом виде или после специальной предварительной обработки для активации процесса спекания. Изготовленные по такой схеме поликристаллы представляют собой, как правило, однофазный продукт. Примером могут служить мегадаймонд, карбонит.

2. Поликристаллы алмаза типа СВ. Они представляют собой гетерогенный композит, состоящий из частиц алмаза, скрепленных связкой – второй фазой, которая располагается в виде тонких прослоек между кристаллами алмаза.

3. Синтетические карбонады типа АСПК, получаемые путем воздействия на углеродосодержащее вещество со значительным

количеством катализатора одновременно высоким давлением и высокой температуры. АСПК обладают меньшей твердостью и прочностью, чем поликристаллы первых двух разновидностей.

4. Поликристаллы алмаза, получаемые пропиткой алмазного порошка металлическим связующим при высоких давлениях и температурах. В качестве связки используются никель, кобальт, железо, хром.

Физико-механические свойства СТМ на основе алмазов представлены в табл. 4.12.

Таблица 4.12. Физико-механические свойства СТМ на основе алмазов

Материал	Нагрузка на индентор, Н	Твердость, ГПа
Природный алмаз	9,8	56-102
АСБ	2,0	60
СВА-15Б	-	65-80
СВБ	-	90-100
Мегадаймонд	-	78
Карбонит	9,8	39,2-44,2
АЛВ	9,8	50-65
Компакс	9,8	65-80
Синдит 025	19,6	49,8
Сумидиа ДА-150	9,8	42-50
Сумидиа ДА-200	9,8	42-50
WD-210	9,8	30

Теплопроводность поликристаллов алмаза превышает теплопроводность меди и серебра, а в ряде случаев достигает значений теплопроводности монокристаллов алмаза. Теплопроводность поликристаллов зависит от температуры. Причем для одних материалов с увеличением температуры до 450 °С теплопроводность возрастает, достигая максимума, а затем снижается. Для других, типа АСБ и СКМ, - монотонно снижается до 900 °С.

СТМ на основе кубического нитрида бора. Существует несколько разновидностей СТМ на основе нитрида бора:

1. Поликристаллы, синтезируемые из гексагонального нитрида бора (ГНБ) в присутствии растворителя ВМгВМсф (типичным представителем является композит 01);
2. Поликристаллы, получаемые в результате прямого перехода гексагональной модификации в кубическую ВN_rBN (композит 02);
3. Поликристаллы, получаемые в результате превращения вюрцитоподобной модификации в кубическую BN_g - ВМдф.

Поскольку полнота перехода регулируется параметрами спекания, то к этой группе относятся материалы с заметно отличающимися свойствами (композит 10, композит 09);

4. Поликристаллы, получаемые спеканием порошков кубического нитрида бора (КНБ) с активирующими добавками (композит 05-ИТ, киборит и др.).

Основные физико-механические характеристики различных марок СТМ на основе плотных модификаций нитрида бора приведены в табл.4.13.

СТМ на основе плотных модификаций нитрида бора, незначительно уступая алмазу по твердости, отличаются высокой термостойкостью, стойкостью к циклическому воздействию высоких температур и, что особенно важно, более слабым химическим взаимодействием с железом, являющимся основным компонентом большинства материалов, подвергаемых в настоящее время обработке резанием

Таблица 4.13. Основные физико-механические характеристики СТМ на основе плотных модификаций нитрида бора

Материал	Твердость, ГПа	σ_u , МПа	Коэффициенты			Е, ГПа	ρ , г/см ³	λ , Вт/(м К)
			K_{1C} , МПа/м ^{1/2}	μ	$\alpha \cdot 10^{-5}$, 1/К			
Композит 01 (эльбор-Р)	35-37	-	3,9-4,2	0,16	-	840	3,4	60-80 (при 350-360К)
Композит 02 (бельбор)	-	700	-	-	-	720	3,5	160-180 (при 900-950К)
Композит 05-ИТ	19	470	4,6-6,7		-	620	4,0-4,3	
Композит 10 (гексанит-Р)	30,5-38,5	1000-1500	3,8-5,9 8,2	0,14-0,16	-	715 880	3,28 3,2-3,4	25-30 (при 360 К)
Киборит	38-42	-		0,16	-			40-60 (при 950К)
Боразон	45	-	-	-	5,6	-	3,48	100-135
Амборит	40	570	6,3	-	4,9	680	-	100
Сумиборон	30-35	-	-	-	4,7-5,6	-	4,2	37,8
Вюрцин	30-40	800	13,0	-	7,9	-	-	20 (при 673 К)

Композиционные сверхтвердые материалы (КСТМ). Однородные по объему КСТМ получают спеканием смеси порошков синтетического алмаза и кубического или вюрцитного нитрида бора. Сюда относятся материалы типа ПКНБ – АС, СВАБ (СНГ), компакт (Япония). Эти материалы следует рассматривать как перспективные.

Из материалов этого класса наибольшей микротвердостью обладают марки СВ-1 и СВ-40, а наименьшей – СВ-14, СВАБ. Не восстановленная микротвердость изменяется от 47,0 до 66,0 ГПа, а модуль упругости – от 640 до 810 ГПа.

К классу композиционных относят также алмазосодержащие материалы на основе твердых сплавов. Из материалов этой группы, хорошо зарекомендовавших себя в эксплуатации, следует отметить «Славутич» (из природных алмазов) и твесалы (из синтетических алмазов).

Двухслойные композиционные поликристаллические материалы (ДСКМ). Принципиальной особенностью ДСКМ является то, что спекание порошков сверхтвердых материалов производится при высоких температурах и давлениях на подложке из твердых сплавов на основе карбидов вольфрама, титана, тантала, в результате чего образуется слой ПСТМ толщиной 0,5-1 мм, прочно связанный с материалом подложки. Алмазоносный слой может содержать компоненты подложки.

Двухслойные материалы имеют некоторые преимущества по сравнению с однородными по объему СТМ. Упрощается технология крепления режущего инструмента в корпусе державки путем пайки к твердосплавной подложке. Наличие подложки, прочно соединенной с рабочим слоем из СТМ, придает материалам повышенную ударную прочность, а использование слоя СТМ малой толщины (0,5-2 мм) делает их более экономичными, поскольку при затачивании и перетачивании инструмента значительно уменьшаются безвозвратные потери дорогостоящих сверхтвердых материалов.

Промышленность стран СНГ производит двухслойные сверхтвердые композиционные материалы из кубического нитрида бора, к которым относятся следующие марки: композит 05-ИТ2С, композит 10Д, ВПК, на основе алмаза – ДАП, АМК-25, АМК-27, БПА, АТП.

Области применения инструмента из СТМ. Основная область эффективного применения лезвийного режущего инструмента из СТМ – автоматизированное производство на базе станков с ЧПУ, многоцелевых станков, автоматических линий, специальных скоростных станков.

В табл. 4.14 приведены скорости резания, рекомендуемые для обработки различных материалов инструментом из СТМ.

Таблица 4.14. Скорости резания, рекомендуемые для инструмента из СТМ

СТМ	Обрабатываемый материал	Скорость резания, м/мин	
		Точение	Фрезерование
ПКНД	Конструкционные и инструментальные стали, термически не обработанные (HRC<30)	-	400-900
	Закаленные стали (HRC 35-55) Закаленные стали (HRC 55-70)	50-200 40-120	200-400 80-300
	Серые и высокопрочные чугуны (HB 150-300)	300-1000	600-3000
	Отбеленные и закаленные чугуны (HB 400-650)	40-200	150-800
ПКА	Алюминий и алюминиевые сплавы	600-3000	600-6000
	Алюминиево-кремниевые сплавы (Si<20%)	500-1500	500-2500
	Медь и медные сплавы	300-1000	300-2000
	Композиционные неметаллические материалы и пластмассы	200-1000	200-2000
	Древесностружечные материалы	-	2000-4000
	Спеченные WC-Co твердые сплавы	15-30	15-45

Следует отметить, что для инструмента из СТМ рекомендуемые скорости резания для фрезерования в 1,5-3 раза выше, чем у точения, что не характерно для стандартного инструмента, оснащенного твердосплавными пластинами.

Глава 5. Абразивная обработка.

Как известно, абразивные инструменты отличаются от лезвийных, главным образом, множеством режущих элементов (зёрен), расположенных, как правило, в случайном порядке, а также неопределённостью формы режущих элементов и геометрической формой отдельно взятого абразивного зерна.

В этой связи абразивные инструменты характеризуются:

- 1) материалом зёрен;
- 2) зернистостью (размером зёрен);
- 3) концентрацией зёрен в объёме инструмента (круга);
- 4) видом связки;
- 5) твёрдостью круга;
- 6) структурой шлифовального круга;
- 7) формой и размерами круга.

5.1. Концентрация и размер абразивного зерна

Концентрация абразивов – это характеристика, главным образом для алмазных кругов, которая задаётся в соответствии с соотношением:

$$K = 400 \frac{W_a}{W} \quad \%,$$

где W_a – объём абразивов в инструменте,

W – объём алмазоносного слоя.

Коэффициент “400” отражает то обстоятельство, что 100%-ной концентрацией условно считается абразивный инструмент, в алмазоносном слое которого имеется 25 % по объёму алмазов.

Если известны концентрация и размеры зёрен, то можно определить количество зёрен в объёме алмазоносного слоя или на поверхности круга.

Так, например, в 1 мм^3 $W_a = \frac{K}{400}$.

Экспериментально установлено, что если размер зерна – d , то объём отдельного зерна

$$\Delta = \alpha \frac{\pi d^3}{6},$$

где $\frac{\pi d^3}{6}$ – объём шара диаметром d ;

$\alpha \approx 0,3...0,4$ – часть от объёма шара.

Таким образом, количество зёрен в 1 мм^3 составит

$$n_w = \frac{W_a}{\Delta} = \frac{6 \cdot K}{400 \cdot \alpha \cdot \pi \cdot d^3}.$$

Следовательно, если в 1 мм^3 число зёрен n_w , то по ребру куба будет находиться

$$n_1 = \sqrt[3]{n_w} = \sqrt[3]{\frac{6K}{400 \cdot \pi \cdot \alpha \cdot d^3}},$$

а на поверхности в 1 мм^3 (грань куба) количество зёрен составит

$$n_2 = n_1^2 = \frac{1}{d^2} \left(\frac{6K}{400\pi\alpha} \right)^{\frac{3}{2}}.$$

5.2. Размеры среза при шлифовании

Размеры среза при шлифовании могут быть определены в целом на шлифовальный круг или на одно отдельно взятое зерно. Так, для наружного круглого шлифования [1] сечение среза определяется соотношением:

$$F = \frac{Q}{L},$$

где Q – объём сошлифованного металла в единицу времени,

L – путь шлифовального круга за это же время.

Если $Q = 1000v_u tS$ мм³/мин и $L = 60 \cdot 1000 \cdot V_K$ мм/мин, то

$$F = \frac{V_u}{60V_K} tS,$$

где V_u – скорость изделия при круглом шлифовании, м/мин;

V_K – скорость круга, м/с.

Чтобы рассчитать толщину среза, приходящегося на одно абразивное зерно [2], рассмотрим идеализированный процесс круглого шлифования, когда зёрна расположены равномерно на поверхности круга и выступают от поверхности круга на одну и ту же высоту (рис.5.1).

Предположим, что за определённый промежуток времени t абразивное зерно в точке O круга переместится в точку A . За это же время изделие с точкой A переместится в точку B , т.е. на расстояние AB .

Поскольку

$$AO = V_K t \text{ и } AB = V_u t, \text{ то } AB = \frac{V_u}{V_K} AO.$$

Следовательно, за промежуток времени t абразивный круг сошлифует в изделии объём металла с сечением в виде фигуры OAB . Толщина среза при этом будет соответствовать отрезку BC . Из рис.5.1 видно, что $BC \approx AB \cdot \sin(\alpha + \beta)$

или

$$BC = \frac{V_u}{V_K} AO \sin(\alpha + \beta).$$

Если зёрна расположены равномерно по окружности круга, то

$$AO = ml_0,$$

где m – число зёрен на длине AO . В этом случае получим, что толщина среза на m зёрен будет

$$BC = ml_0 \frac{V_u}{V_K} \sin(\alpha + \beta).$$

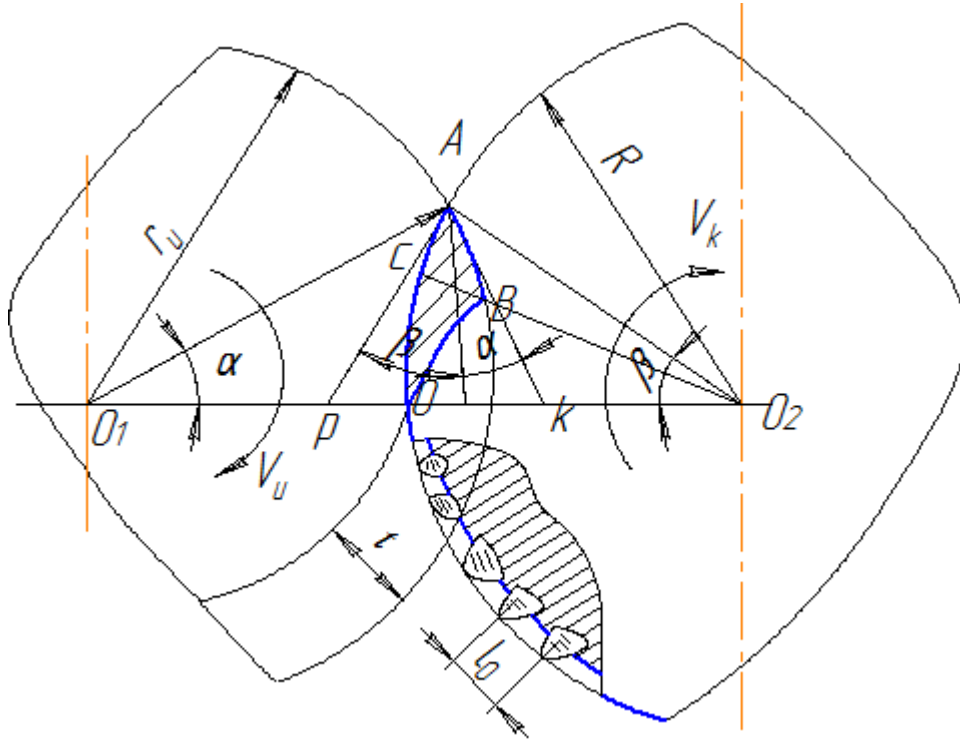


Рис.5.1. Схема к расчёту толщины среза при круглом шлифовании: R - радиус шлифовального круга; r_u - радиус изделия; t - глубина шлифования

Следовательно, толщина среза на одно зерно будет

$$a_z = \frac{BC}{m} = l_0 \frac{V_u}{V_K} \sin(\alpha + \beta).$$

Из треугольника O_1AO_2 можно, пренебрегая значением t^2 , найти, что

$$\cos(\alpha + \beta) = \frac{t}{R} + \frac{t}{r_u} - 1,$$

следовательно,

$$\sin(\alpha + \beta) = \sqrt{2t} \cdot \sqrt{\frac{1}{R} + \frac{1}{r_u}}.$$

Подставляя последнее выражение в формулу для a_z , получим

$$a_z = 2l_0 \frac{V_u}{V_K} \sqrt{\frac{t}{D_K} + \frac{t}{d_u}}.$$

Если на одном мм длины (по ребру куба) число зёрен

$$n_1 = \frac{1}{d} \cdot \sqrt[3]{\frac{6K}{400\pi\alpha}},$$

то

$$l_0 = \frac{1}{n}$$

и

$$a_z = \frac{2 \cdot V_u}{V_K \cdot n_1} \cdot \sqrt{\frac{t}{D_K} + \frac{t}{d_u}},$$

где $D_K = 2R$ и $d_u = 2r_u$.

В соотношении для a_z предполагается, что все n_1 зёрен участвуют в резании. В действительности, как показывает опыт, активных зёрен при оптимальной глубине резания t бывает примерно около 10–12 %.

Можно рассчитать вероятное количество активных зёрен при глубине резания $y = t$, если предположить, что зёрна выступают над поверхностью связки максимум на величину $\Delta_{\max}$ и, что при такой глубине резания участвуют все абразивные зёрна (рис.5.2) при распределении зёрен над связкой по нормальному закону Гаусса в соответствии с уравнением

$$x = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(y - \bar{\Delta})^2}{2\sigma^2}\right].$$

В соответствии с этим законом можно рассчитать вероятное количество зёрен $P(t)$ на расстоянии t от поверхности круга

$$P(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^t \exp\left[-\frac{(y - \bar{\Delta})^2}{2\sigma^2}\right] dy.$$

Полагая $\bar{\Delta} = \frac{\Delta_{\max}}{2}$, $\Delta_{\max} \cong 6\sigma$, можно найти, что

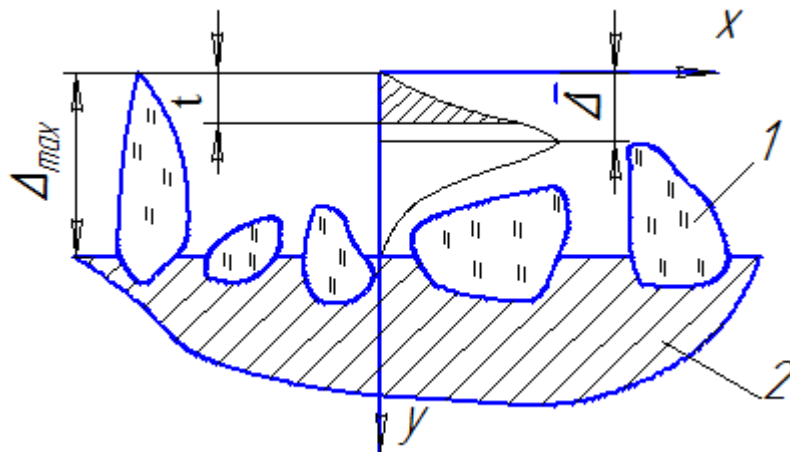


Рис.5.2. Схема к расчету вероятного количества зёрен при шлифовании с глубиной $y=t$:
1- абразивное зерно, 2- связка

$$P(t) = 0,5 \left[\frac{6}{\sqrt{2}} \Phi \left(\frac{t}{\Delta_{\max}} - 0,5 \right) + \Phi \left(\frac{3}{\sqrt{2}} \right) \right],$$

где

$$\Phi(u) = \frac{2}{\pi} \int_0^u e^{-u^2} du.$$

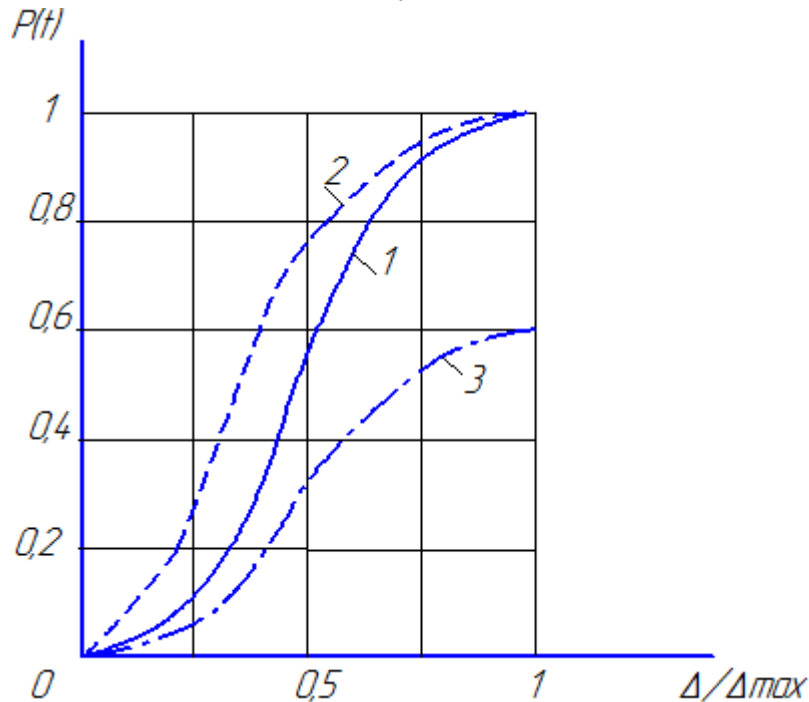


Рис.5.3. Графики функции $P(t)$ в зависимости от $\Delta/\Delta_{\max}$: 1- аналитическая зависимость для АСО6, $K=200\%$; 2- опытные данные для АСО6, $K=200\%$; 3- опытные данные для АСО25, $K=200\%$

С учётом вероятности $P(t)$ толщина среза, приходящаяся на одно активное зерно при глубине шлифования t , определится соотношением

$$a_z = \frac{2V_u}{V_K n_1 P(t)} \cdot \sqrt{\frac{t}{D_K} + \frac{t}{d_u}}.$$

На рис.5.3 приведены значения функции $P(t)$ в зависимости от отношения $\Delta/\Delta_{\max}$. Кривая 1 – это теоретическая кривая для круга из материала АСО6 при $K=200\%$; кривая 2 описывает результаты опытных данных для круга из материала АСО6 при $K=200\%$; кривая 3 описывает результаты опытных данных для круга из материала АСО25 при $K=200\%$.

5.3. Тангенциальная составляющая силы резания, приходящаяся на одно активное зерно

Процесс резания одним абразивным зерном при отсутствии площадки износа может быть условно представлен движением поверхности шара, вдавленного в шлифуемую поверхность на глубину шлифования t с силой P (рис. 5.4).

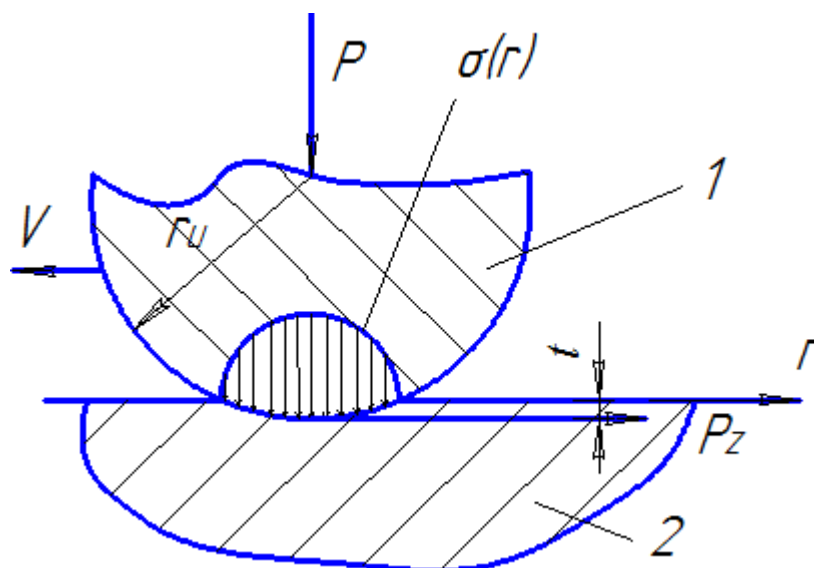


Рис. 5.4. Схема к расчёту силы P_z при шлифовании неизношенным абразивным зерном: 1 - абразивное зерно; 2 - обрабатываемая деталь

В условиях упруго-пластического контактирования распределение радиальной силы на поверхности контакта может быть представлено функцией [3]:

$$\sigma(r) = \sigma_0 \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right),$$

где σ_0 – максимальное значение нормальных напряжений,

R – радиус площадки контакта.

В процессе движения абразивного зерна на площадке с упругими деформациями возникают касательные напряжения:

$$\tau(r) = \mu \cdot \sigma(r),$$

где μ – коэффициент трения на упругих участках контакта. Однако, с увеличением нормальных напряжений $\sigma(r)$ в центральной части контакта, граничное трение в контакте трансформируются в энергетически более выгодное трение, когда касательные напряжения достигнут предела

прочности материала детали на сдвиг τ_s . В этом случае сила трения в пластичной зоне взаимодействия радиусом R_0 составит

$$F_1 = \tau_s \cdot \pi \cdot R_0^2,$$

а на упругих участках контакта определится интегралом

$$F_2 = \frac{2\pi\tau_s}{1-\varepsilon^2} \int_{R_0}^R r \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right) dr.$$

После вычисления интеграла с учётом силы F_1 окончательно получим, что

$$P_z = F_1 + F_2 = \frac{\tau_s \cdot \pi R^2}{2} (1 + \varepsilon^2),$$

где $\varepsilon = R_0 / R$ в зависимости от твёрдости обрабатываемого материала может находиться в диапазоне от $\varepsilon = 0,4$ до $\varepsilon = 0,6$.

Радиус пятна контакта абразивного зерна с обрабатываемой деталью можно определить из зависимости ширины царапания от глубины вдавливания по результатам опытных данных С. Г. Редько [4], представленных на рис. 5.5 для зернистости 25.

Если рабочая поверхность зерна хорошо аппроксимируется сферой, то радиус пятна контакта можно определить по формуле [4]:

$$R = \sqrt{2r_u \cdot h - h^2},$$

где r_u – радиус рабочего участка абразивного зерна, который может быть принят равным половине зернистости шлифовального круга.

При наличии площадки износа абразивного зерна тангенциальная составляющая может быть определена по методу Н. Н. Зорева, когда нормальные напряжения в контакте распределены в соответствии с соотношением

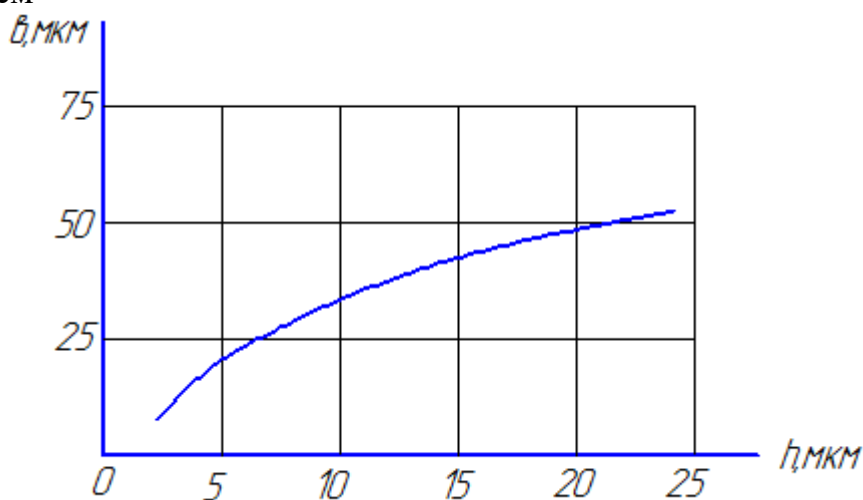


Рис.5.5. Зависимость ширины царапины на обрабатываемой поверхности b , мкм от глубины вдавливания абразивного зерна

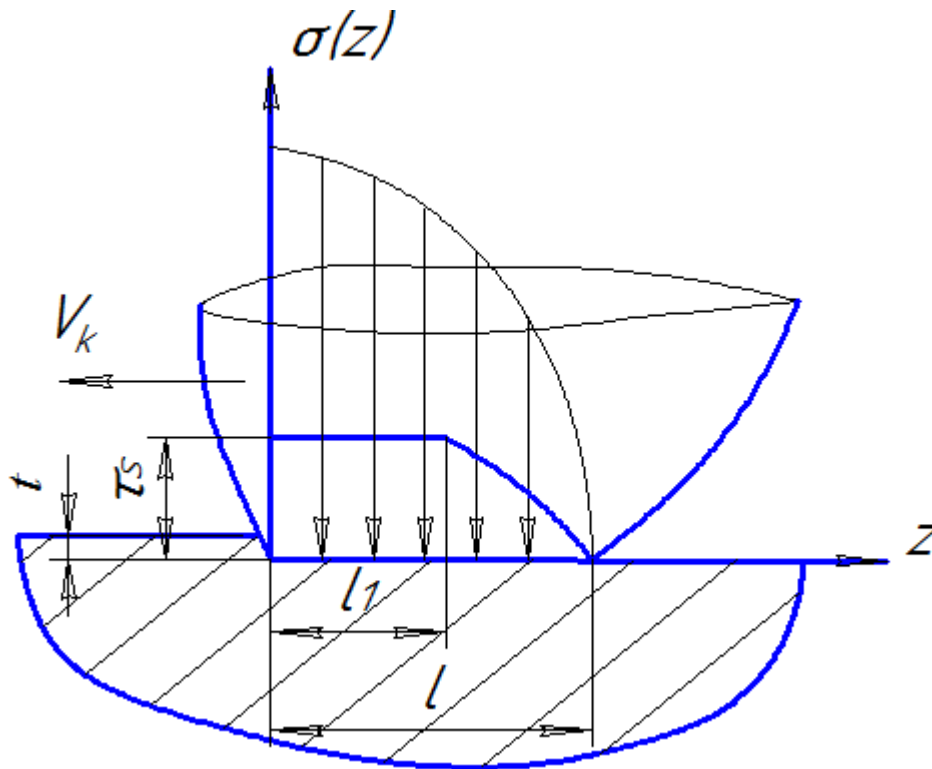


Рис.5.6. Схема к расчёту P_z при шлифовании абразивным зерном с площадкой износа величиной l (l_1 - размер пластического участка в контакте)

$$\sigma(x) = \sigma_0 \left(1 - \frac{z}{l} \right)^n.$$

Так же, как в условиях взаимодействия с неизношенными абразивным зерном, сила трения на пластичном участке взаимодействия определится соотношением (рис. 5.6):

$$F_1 = \tau_s l_1^2,$$

где τ_s – предел прочности материала детали на сдвиг. В этом случае сила трения на всей площадке контакта может быть рассчитана по формуле Н.Н. Зорева:

$$P_z = \tau_s \cdot l^2 \cdot \frac{\varepsilon \cdot n + 1}{n + 1},$$

где $n \approx 3...4$ в зависимости от твёрдости обрабатываемого материала или по формуле А. Н. Резникова [5]:

$$P_z = 0,5 l^2 \cdot \tau_s.$$

В последнем случае касательные напряжения в контакте аппроксимируются экспонентой

$$\tau(z) = \tau_s \exp \left[-3 \left(\frac{z}{l} \right)^2 \right].$$

Глава 6. Экспериментальные методы измерения сил резания

6.1. Виды динамометров

Измерение сил в процессе резания осуществляется устройством – динамометром. Структурная схема (рис. 6.1) динамометра состоит, главным образом, из трех систем:

1. Базирующая система (БС), где осуществляется закрепление инструмента или изделия, на которые действует нагрузка.
2. Передаточно-трансформирующая система (ПТС), в которой передаются в том или ином виде сигналы от базирующей системы, либо преобразуются каким-либо способом.
3. Измерительные устройства (ИУ).

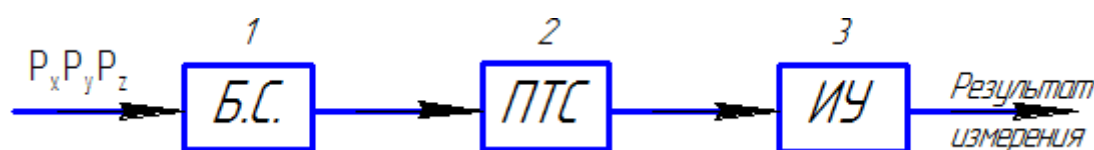


Рис. 6.1. Структурная схема динамометра

Динамометры отличаются друг от друга, главным образом, блоком ПТС и могут быть:

1. *Гидравлические*, в которых сила резания через поршень гидроцилиндра передается посредством жидкости на манометр, как измерительное устройство.
2. *Механические* с упругим элементом, деформация которого измеряется непосредственно.
3. *Электрические*, в блоке ПТС которых механические измерения преобразуются в электрические сигналы. Этот тип динамометров в зависимости от используемых датчиков подразделяется на емкостные, индуктивные и тензометрические.

На рис. 6.2 показан динамометр конструкции Гордона, который состоит из корпуса 1 с неподвижно закрепленной пластиной 2. В корпусе на элементах качения смонтирована люлька 3 с пластиной 4. В процессе резания сила F_n вызывает соответствующее перемещение люльки 3 и деформирование упругого элемента 5, которое фиксируется измерительным устройством 6.

Изменяя размер Δ на неподвижной пластине 2 от минимального возможного значения до размера площадки контакта l_n , можно установить закон распределения сил трения на передней поверхности резца.

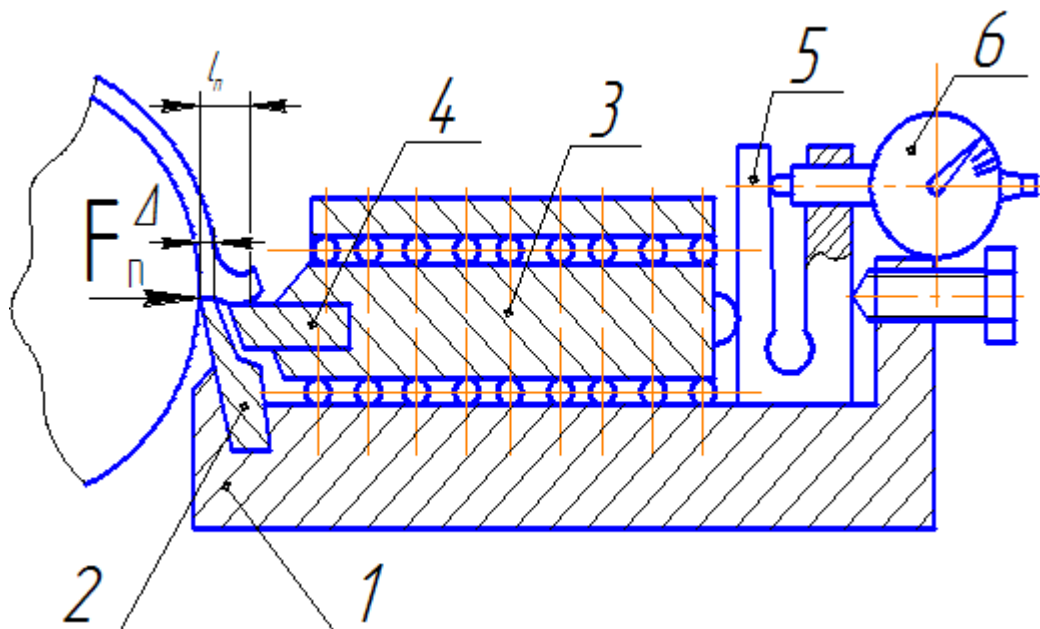


Рис. 6.2. Динамометр – «разрезной резец» проф. Гордона для измерения сил трения на передней поверхности резца

В емкостном динамометре (рис. 6.3) деформация, которую вызывает сила P_z , будет изменять зазор Δ между обкладками емкостного датчика и соответствующее изменение емкости, которое далее фиксируется измерительным устройством.

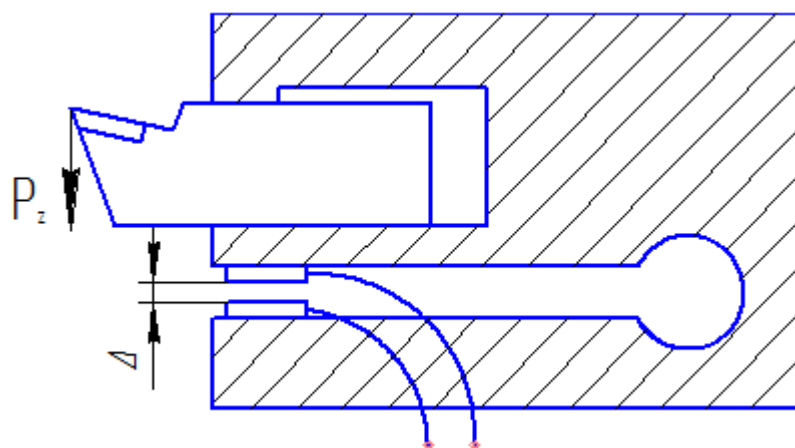


Рис.6.3. Схема устройства емкостного динамометра

Вместо емкостного датчика в такой конструкции может быть использован индуктивный датчик. Тогда механическое перемещение упругой части будет изменять индуктивность датчика.

Аналогично упругая часть динамометра может быть смонтирована датчиком сопротивления (тензодатчики, рис. 6.4). В этом случае перемещение упругого элемента с наклеенными тензодатчиками будет изменять омическое сопротивление в соответствии с соотношением:

$$R = \rho \frac{l}{S},$$

где l – длина проволоки датчика, S – сечение проволоки, ρ – коэффициент.

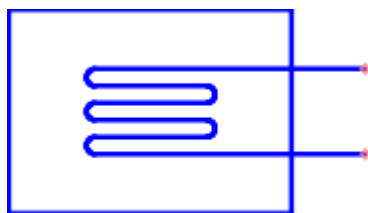


Рис. 6.4. Тензодатчик

В цепи измерительного устройства датчики, например сопротивления, монтируются в электрический мост (рис. 6.5), в котором сопротивление датчиков D_3 и D_4 может регулироваться. При отсутствии деформации датчиков сопротивления всех датчиков должны быть равными, т. е. $D_1 = D_2 = D_3 = D_4$. В этом случае ток в диагонали 1 моста будет отсутствовать. При возникновении силы и деформации изменяется сопротивление одного из датчиков, происходит дисбаланс моста с возникновением тока в диагонали 1.

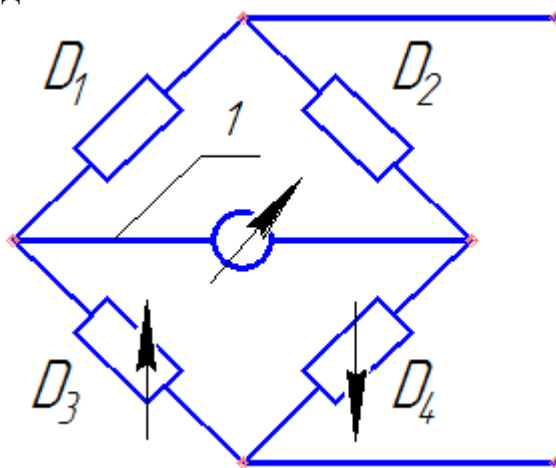


Рис. 6.5. Схема измерительного моста

6.2. Планирование и обработка экспериментов

Планирование экспериментов может осуществляться различными способами. Если опытов проведено малое количество, то эксперименты целесообразно проводить по системе «квадрат».

Так, например, исследование силы P_Z от двух параметров

$$P_Z = f(t, S)$$

в диапазоне до пяти фиксированных значений t_1, t_2, t_3, t_4 и t_5 , а также S_1, S_2, S_3, S_4 и S_5 проводится заполнением ячеек квадрата сочетания t и S (рис. 6.6).

$\begin{array}{c} t \\ \backslash \\ S \end{array}$	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5
S_1	+	+	+	+	+
S_2	+	+	+	+	+
S_3	+	+	+	+	+
S_4	+	+	+	+	+
S_5	+	+	+	+	+

Рис. 6.6. План экспериментов «квадрат» из 25 опытов и по кресту из 9 опытов

Планирование «квадрат» дает наиболее полную информацию, но связан с большим числом опытов. Более экономный с точки зрения количества экспериментов, метод по «кресту», когда делается серия экспериментов по параметру t при фиксированном значении параметра S (на рис. 6.6 это S_3), а затем делается серия экспериментов S по фиксированному значению параметра t . В этом случае вместо 25 экспериментов по «кресту» приходится выполнить только 9 опытов (одно сочетание повторяется). При большом количестве варьируемых параметров используется метод многофакторного планирования.

Результаты экспериментов, полученные тем или другим методом планирования, должны быть обработаны в виде графиков или формул. При исследовании сил было показано, что данные экспериментов по определению сил резания хорошо описываются степенным соотношением, например,

$$P_Z = C_Z t^{X_{P_Z}} S^{Y_{P_Z}} V^{Z_{P_Z}} \delta^{U_{P_Z}}.$$

В этом соотношении можно выделить частную зависимость $P_Z = f(t)$. Обозначив в этом случае

$$C_0 = C_Z S^{Y_{P_Z}} V^{Z_{P_Z}} \delta^{U_{P_Z}},$$

получим, что $P_Z = C_0 t^{X_{P_Z}}$.

Логарифмирование этого соотношения приводит к линейной зависимости вида $y = kx + b$:

$$\lg P_Z = \lg C_0 + X_{P_Z} \lg t,$$

которая на графике $\lg P_Z = f(\lg t)$ должна быть представлена прямой (рис.6.7).

Как правило, экспериментальные точки не совпадают с прямой на величину Δ_i , что связано со случайными погрешностями измерения, которые определяются дисперсией

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i^2}{n},$$

где n – число варьируемых параметров.

Следовательно, дисперсия (рассеивание) будет иметь наименьшее значение, когда

$$\sum_{i=1}^n \Delta_i^2 = \min.$$

Эта формула определяет так называемый «метод наименьших квадратов». На графике (рис. 6.7), следовательно, прямая должна быть проведена таким образом, чтобы сумма площадей квадратов со сторонами Δ_i имела наименьшее значение.

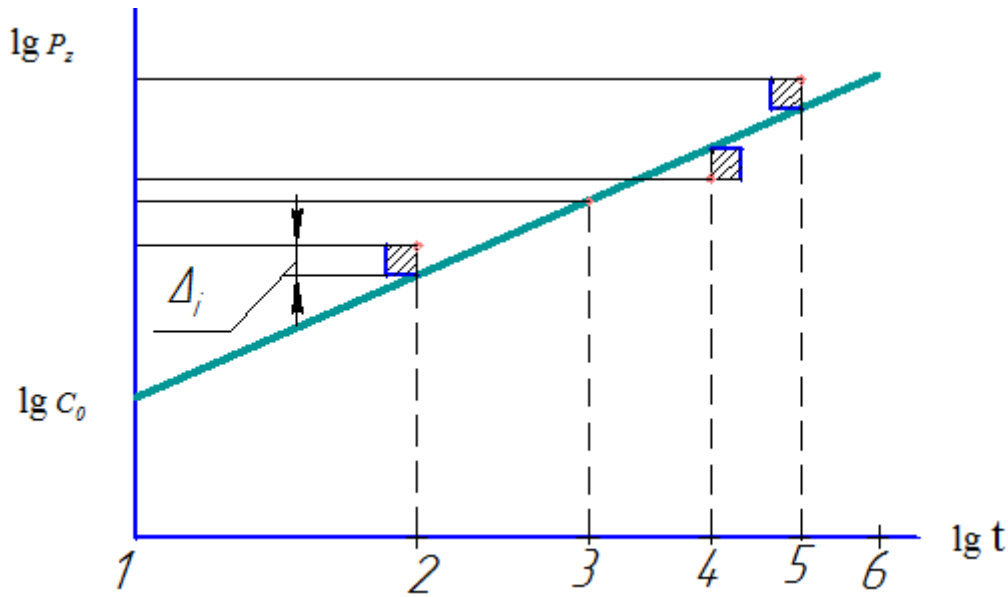


Рис. 6.7. График зависимости $\lg P_z = f(\lg t)$

Математическая обработка с использованием «метода наименьших квадратов» может быть проиллюстрирована следующим примером. Допустим, есть зависимость

$$\lg P_z = \lg C_0 + X_{P_z} \lg t .$$

В этом соотношении неизвестными параметрами являются C_0 и X_{P_z} , а опытные данные – это P_{z_i} и t_i . Поскольку эксперимент всегда связан со случайной погрешностью Δ_i , то

$$\lg P_{z_i} - \lg C_0 - X_{P_z} \lg t_i = \Delta_i .$$

Задача состоит в том, чтобы

$$\sum_{i=1}^n (\lg P_{z_i} - \lg C_0 - X_{P_z} \lg t_i)^2 = \min .$$

Для того, чтобы обеспечить минимум, необходимо частные производные по $\lg C_0$ и X_{P_z} приравнять к нулю и из полученной системы уравнений найти неизвестные C_0 и X_{P_z} .

Обозначим

$$\sum_{i=1}^n (\lg P_{z_i} - \lg C_0 - X_{P_z} \lg t_i)^2 = \sigma ,$$

тогда

$$\frac{\partial \sigma}{\partial X_{P_z}} = -2 \left[\sum_{i=1}^n \lg t_i (\lg P_{Z_i} - \lg C_0 - X_{P_z} \lg S_i) \right] = 0$$

или

$$\sum_{i=1}^n \lg t_i \lg P_{Z_i} - \lg C_0 \sum_{i=1}^n \lg t_i - X_{P_z} \sum_{i=1}^n (\lg t_i)^2 = 0. \quad (4)$$

Далее определяем вторую частную производную

$$\frac{\partial \sigma}{\partial (\lg C_0)} = -2 \left[\sum_{i=1}^n (\lg P_{Z_i} - \lg C_0 - X_{P_z} \lg S_i) \right] = 0.$$

После преобразования получим второе уравнение:

$$\sum_{i=1}^n \lg P_{Z_i} - n \lg C_0 - X_{P_z} \sum_{i=1}^n \lg S_i = 0. \quad (5)$$

Затем берут экспериментальные данные по каждому из n экспериментов, которые подставляют в соотношения (4) и (5) и из решения системы из двух уравнений находят неизвестные C_0 и X_{P_z} в виде конкретных чисел.

Следовательно, соотношение

$$P_z = C_0 t^{X_{P_z}},$$

C_0 и X_{P_z} – числа, полученные путем решения системы из уравнений (4) и (5), определяет силу P_z , наиболее полно соответствующую данным эксперимента в соответствии с «методом наименьших квадратов».

Глава 7. Экспериментальные методы измерения температур в зоне резания.

Эксперимент ставится в зависимости от того, что необходимо установить экспериментально. В большинстве случаев целью эксперимента является определение:

- 1) температуры в отдельных точках зоны резания;
- 2) средней температуры на площадке контакта между инструментом и обрабатываемым материалом;
- 3) закона распределения температур на площадках контакта инструмента и детали.

7.1. Температура в отдельных точках

Температура в отдельных точках инструмента может быть измерена термопарой с электродами 1 и 2 (рис. 7.1), которая в металлообработке получила название «искусственная термопара».

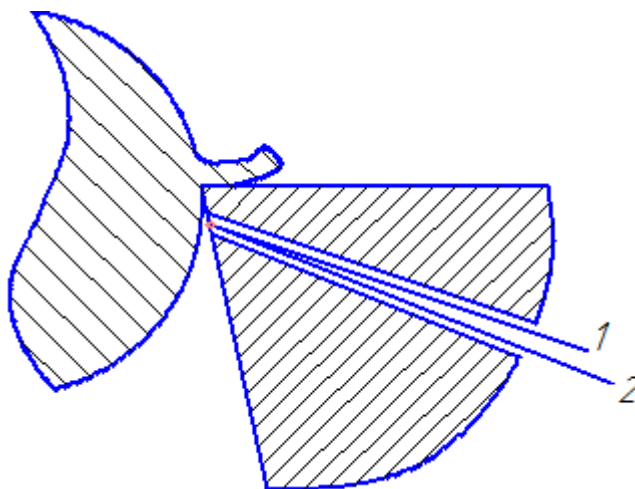


Рис. 7.1. Схема установки искусственной термопары в резце

Для измерения температуры в отдельных точках инструмента используется также так называемая «полуискусственная термопара», электродами которой являются провод 1 и материал обрабатываемой детали 2 (рис. 7.2). В этом случае головка термопары (горячий спай) возникает в точке соприкосновения детали с проводником.

Такие термопары широко применяются для измерения температуры при шлифовании (рис. 7.3).

Искусственная термопара дает некоторые погрешности: если приложить головку термопары к поверхности, то на самом деле измеряется термо-ЭДС (температура) в месте соединения электродов с головкой (рис. 7.4).

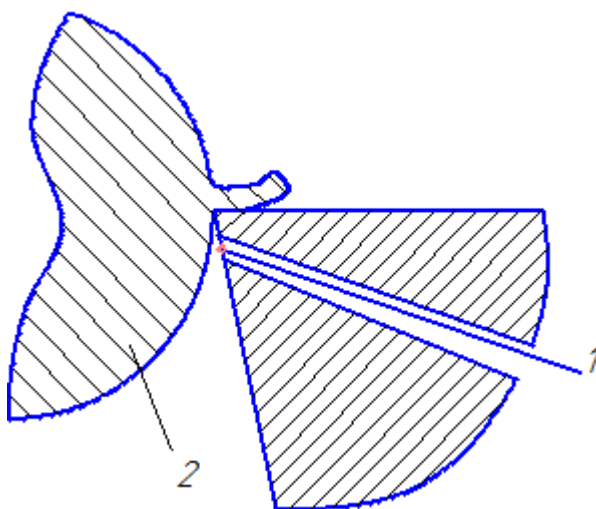


Рис. 7.2. Схема измерения температуры полуискусственной термопарой

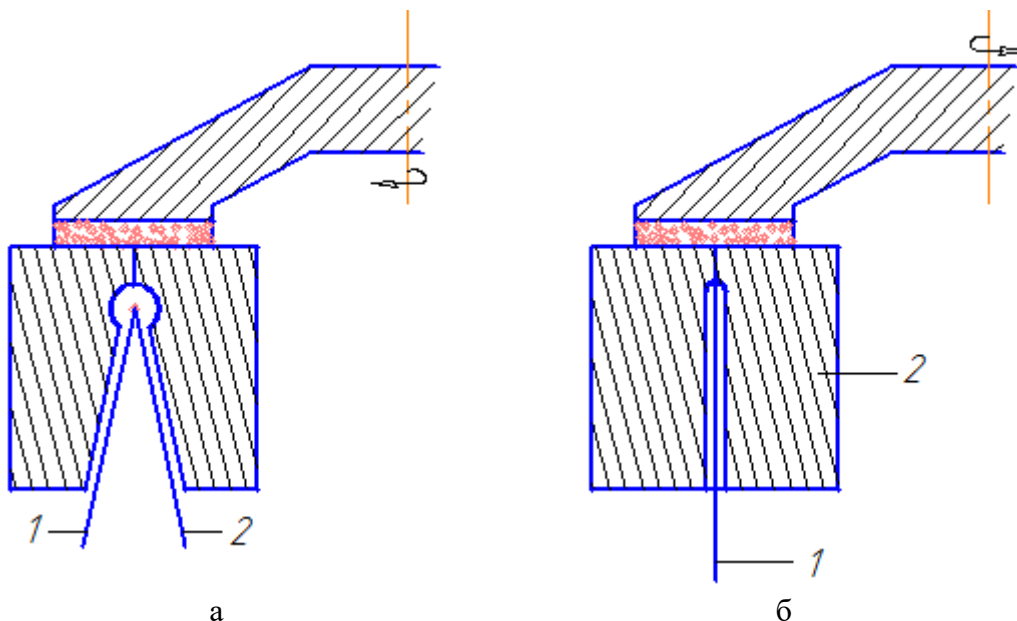


Рис. 7.3. Схема измерения температуры в отдельных точках детали при шлифовании: а) искусственной термопарой с электродами 1 и 2; б) полуюскусственной термопарой с электродами 1 и 2. В качестве электрода 2 используется обрабатываемый материал

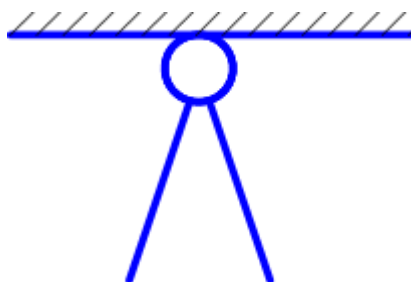


Рис. 7.4. Искусственная термопара

7.2. Измерение средней температуры при резании

Среднюю температуру в области контактирования инструмента и детали можно измерить «естественной температурой», электродами которой являются инструмент и деталь.

Допустим, что закон распределения температуры на площадках контакта – $\theta_n(x)$ и $\theta_z(z)$ (рис. 7.5), тогда средняя температура будет:

$$\theta_{cp} = \frac{\int_0^{l_n} \theta_n(x) dx + \int_0^{l_z} \theta_z(z) dz}{l_n + l_z}.$$

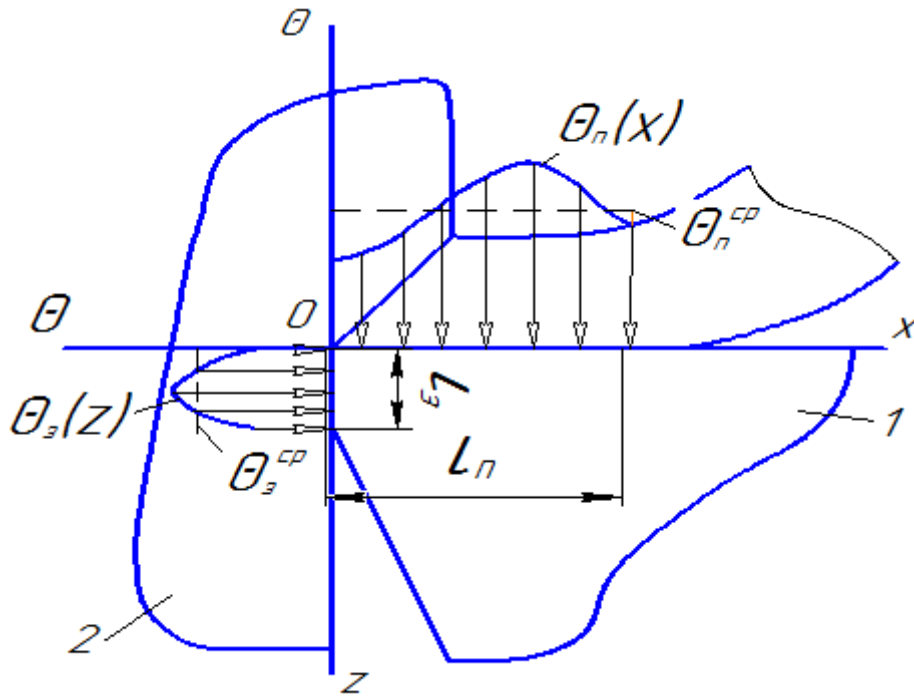


Рис. 7.5. Схема измерения температуры с электродами 1 (инструмент) и 2 (деталь)

Если каким-то образом известны температуры θ_n^{cp} и θ_z^{cp} , то

$$\theta_{cp} = \frac{\theta_n^{cp} l_n + \theta_z^{cp} l_z}{l_n + l_z}.$$

Метод двух резцов при измерении средней температуры. В этом случае производится обработка одного и того же материала одновременно двумя резцами, причем глубина резания t , подача S и геометрия для них одинаковы. Различие состоит только в том, что резец 1 из одного материала, а резец 2 – из другого (рис. 7.7).

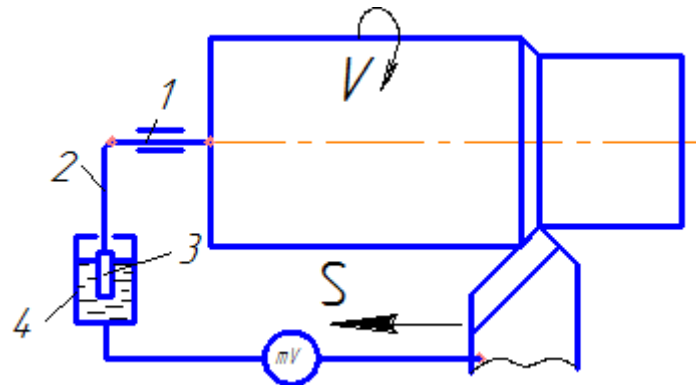


Рис. 7.6. Схема измерения температуры естественной термопарой:
1 – проводник-стержень; 2 – гибкий валик; 3 – контактный наконечник;
4 – ртутная ванночка.

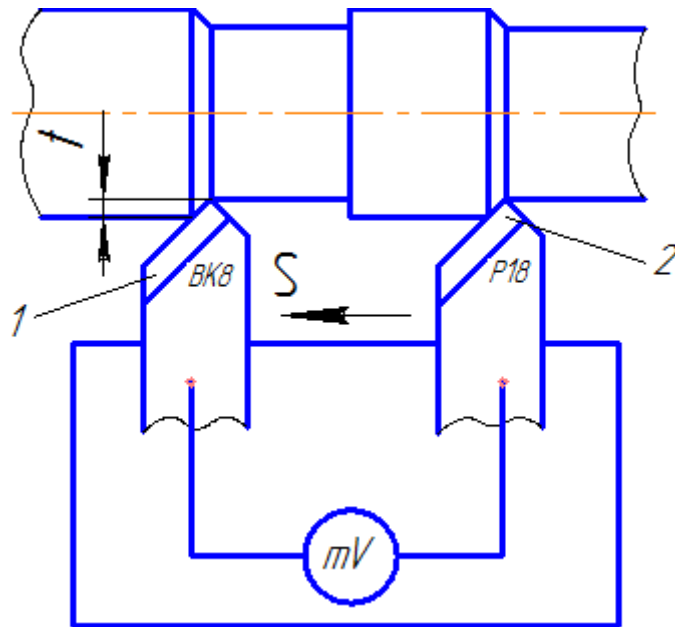


Рис. 7.7. Схема измерения средней температуры методом двух резцов

Этот метод отличается тем, что нет необходимости в тарировке при изменении обрабатываемого материала, так как для такой термопары материал обрабатываемой детали не влияет на термо-ЭДС термопары резец 1 – резец 2.

Формула, полученная в результате экспериментального измерения температуры, имеет вид:

$$\theta_{cp} = C_{\theta} b^{x_{\theta}} a^{y_{\theta}} V^{z_{\theta}} \delta^{u_{\theta}}.$$

Ответ показывает, что резцы теряют режущие свойства при определенной температуре: θ_{cp} для P18 это 600-650°C; для T15K6 – 800-850°C. Поэтому, если положить $\theta_{cp} = \theta_{onm}$, то из этого выражения можно определить оптимальную скорость:

$$V_{onm} = \left(\frac{\theta_{onm}}{C_{\theta} b^{x_{\theta}} a^{y_{\theta}} \delta^{u_{\theta}}} \right)^{\frac{1}{z_{\theta}}} = \frac{C_v}{b^{x_v} a^{y_v}},$$

здесь коэффициент и показатели степени искусственно свернуты.

7.3. Способы измерения температур при резании

Распределение температур на передней и задней поверхностях инструмента может быть измерено различными способами. Чаще всего используются:

1. Разрезной резец для измерения распределения температур на передней поверхности.
2. Измерение за счет инфракрасного излучения.
3. Способ перерезаемой полусинтетической термопары.

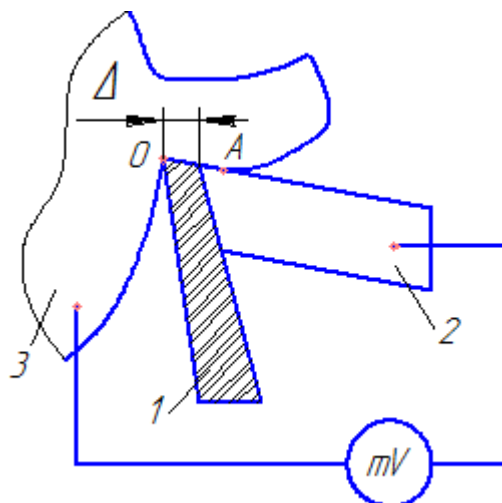


Рис. 7.8. Схема измерения температуры с использованием разрезного резца.
Термопара: резец 2 – изделие 3

Разрезной резец. Резец изготавливают из двух частей. Первая часть 1 – минералокерамика – токонепроводящий материал, вторая часть резца 2 – инструментальный материал. В процессе проведения эксперимента величину Δ в пределах инструментальной площадки $OA = \ell_n$ изменяют (рис. 7.8). В этом случае каждый раз фиксируется средняя температура на участке $\ell_n - \Delta$. Изменяя Δ от минимально возможного значения до $\Delta = \ell_n$, можно с достаточной степенью приближения установить характер изменения температуры на передней поверхности инструмента.

Инфракрасное излучение при измерении температуры. Образцом для исследования температуры является кольцо с радиальным отверстием d (рис. 7.9). При движении отверстия по задней поверхности резца фиксируется температура этой поверхности. Недостаток: размеры отверстия могут быть того же порядка что и ℓ_3 .

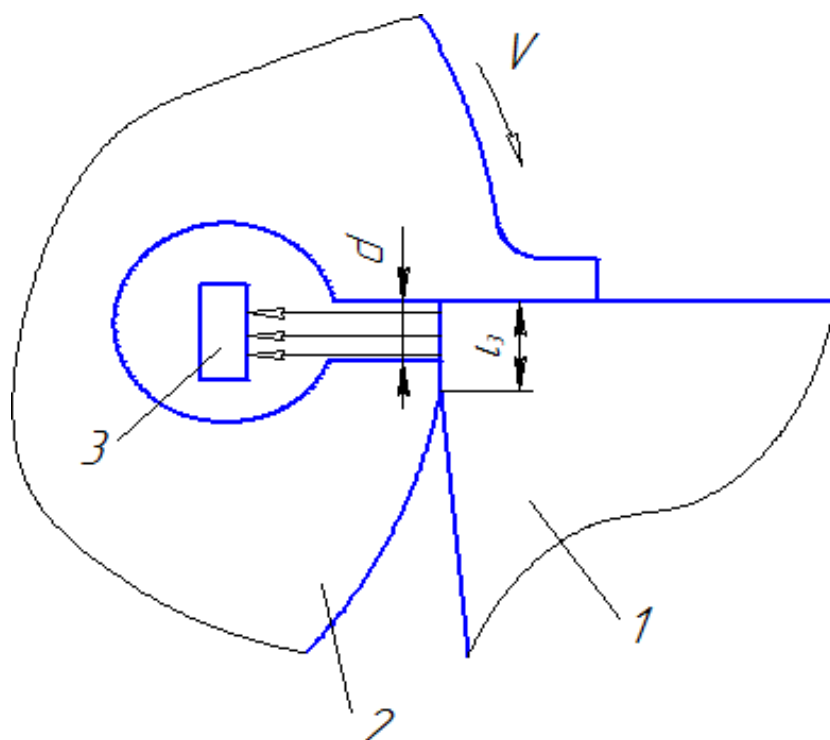


Рис. 7.9. Схема измерения температуры на задней поверхности резца. 1 – резец; 2 – обрабатываемое кольцо; 3 – фотодатчик.

Перерезаемые термопары. Сущность метода состоит в том, что во время сверления электрод 3 (проволочка) при перерезании режущей кромкой замыкается с материалом детали 2, образуя горячий спай термопары проволочка – изделие, которая фиксирует температуру на задней поверхности инструмента (рис. 7.10).

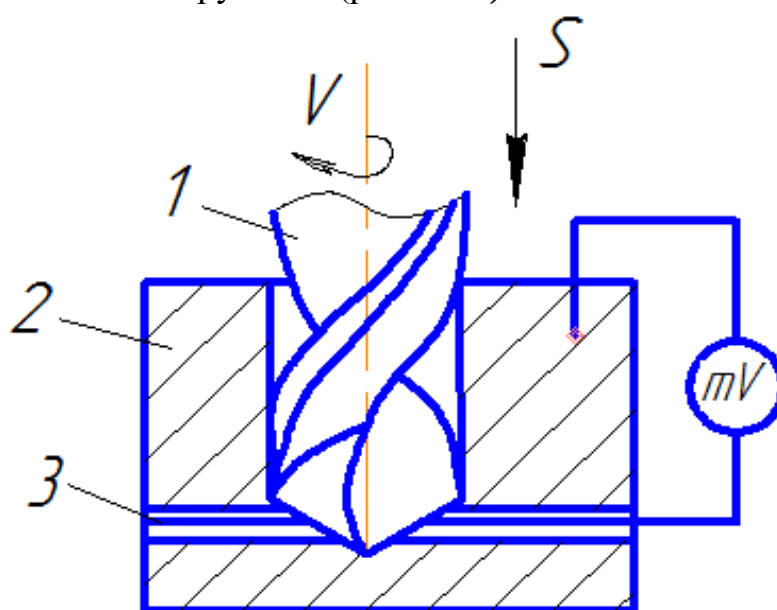


Рис. 7.10. Схема измерения температуры перерезаемой термопарой

Как следует из табл. 7.1, стали, как правило, имеют положительную термо-эдс относительно платины, а твердые сплавы – отрицательную. Поэтому термопара сталь-твердый сплав имеет термо-ЭДС, равную по величине сумме термо-ЭДС стали и твердого сплава, взятых относительно платины.

Таблица 7.1

Термо-ЭДС металлов и сплавов в паре с химически чистой платиной при разных температурах в милливольтгах

Наименование материала	Температура горячего слоя °С		
	100	500	700
Хромель	+2.4	+16.0	+22.5
Нихром	+2.2	+12.9	+18.6
Железо	+1.8	+6.3	+8.0
Быстрорежущая сталь	+1.3	+9.0	-
Сталь 40	+0.95	+5.0	+7.4
Платинорадий	+0.64	+4.17	+6.23
Латунь	+0.60	+5.3	+8.7
T30K4	-0.25	-0.30	-0.45
T15K6	-0.75	-2.55	-2.80
T5K10	-1.00	-4.35	-5.15
BK8	-1.35	-5.85	-6.8
BK6	-1.55	-6.4	-
BK3	-1.7	-8.5	-
Алюмень	-1.7	-4.7	-6.6
Константан	-3.5	-19.8	-29.0
Копель	-4.0	-23.5	-35.4

Глава 8. Износ инструмента.

Если известны законы износа инструмента, то его лучше вовремя заменить. Износ влияет на качество, точность, экономику и т.д.

Износ – это комплекс сложных физических явлений:

- 1) адгезионное схватывание (молекулярное схватывание);
- 2) диффузионное взаимодействие (взаимное проникновение материалов детали и инструмента друг в друга);
- 3) химические явления – образование пленок и окислов;
- 4) механический отрыв под действием сил и напряжений – выкрашивание и т.п.;
- 5) электроэрозия от термо-ЭДС и под воздействием электрического тока.

Только эти пять видов разрушения показывают, что явления износа и затупления инструмента весьма сложные. Поэтому принимают пока что экспериментальные методы исследования.

8.1. Методы исследования износа

Износ бывает по передней поверхности – h и по задней поверхности – W (рис 8.1).

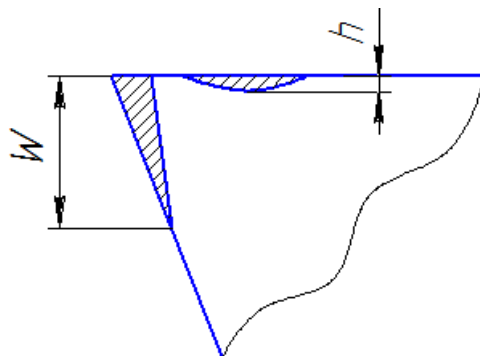


Рис. 8.1. Формы износа режущего клина: h - на передней поверхности; W - на задней поверхности

На рис. 8.2 приведены: участок I – время неорганизованного трения; участок II – время износа по линейному закону, откуда можно сделать заключение, что износ происходит за счет истирания и адгезии. Износ здесь прямо пропорционален затраченной работе трения:

$$\Delta = K_0 \cdot A \text{ мм}^3/\text{Дж},$$

где Δ – объем изношенного материала инструмента.

Работа может быть представлена формулой:

$$A = F_{T3} \cdot V \cdot \tau \text{ Дж},$$

где F_{T3} – сила трения на задней поверхности; V – скорость резания.

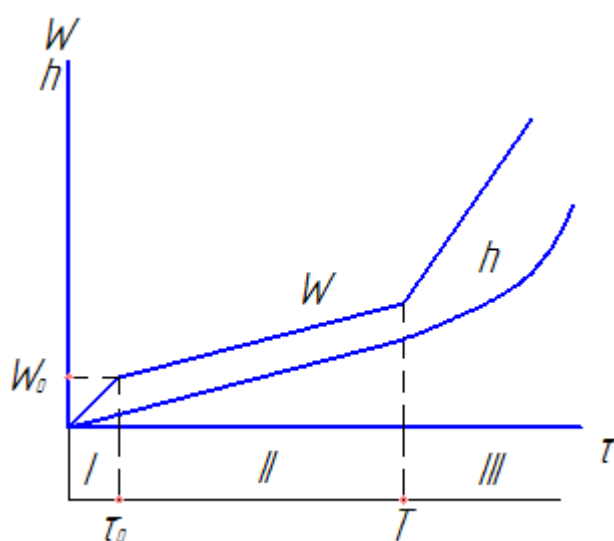


Рис. 8.2. Графики зависимости величин износа h и W от времени τ работы инструмента: W_0 и τ_0 - износ и время приработки; T - теоретическая стойкость

Известно, что

$$F_{T3} = 0.25 \cdot \sigma_b \cdot b \cdot \ell_3.$$

Для изношенного резца $\ell_3 = W$, тогда

$$F_{T3} = 0.25 \cdot \sigma_b \cdot b \cdot W,$$

где W – износ по задней поверхности, σ_b – предел прочности материала инструмента.

В этом случае получим, что

$$\Delta = K_0 \cdot 0.25 \cdot \sigma_b \cdot b \cdot V \cdot \tau \cdot W,$$

где b – ширина среза.

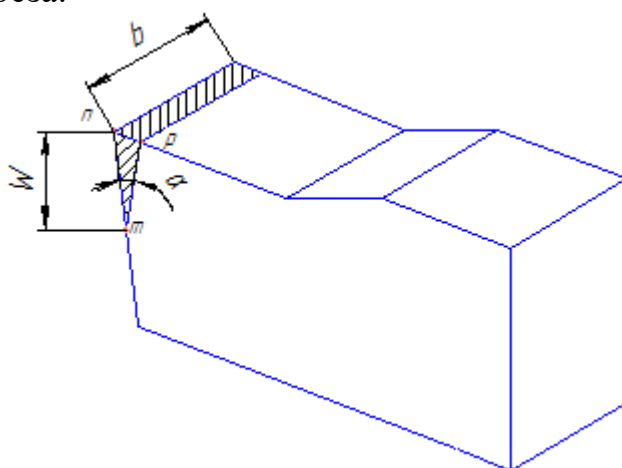


Рис. 8.3. Схема для расчета объема Δ изношенного материала при $\gamma = 0$

Из геометрических соображений (рис. 8.3) получим объем износа по эскизу:

$$\Delta = \frac{1}{2} b \cdot W^2 \cdot \operatorname{tg} \alpha.$$

Приравняв значения Δ :

$$\Delta = \frac{1}{2} b \cdot W^2 \cdot \operatorname{tg} \alpha = \frac{1}{4} K_0 \cdot \sigma_b \cdot b \cdot V \cdot \tau \cdot W,$$

найдем, что износ на участке Π

$$W = \frac{K_0 \sigma_b}{2 \operatorname{tg} \alpha} V \tau.$$

В общем виде с учетом износа и временем приработки можно записать, что

$$W = \frac{K_0 \sigma_b}{2 \operatorname{tg} \alpha} V (\tau - \tau_0) + W_0.$$

В результате обработки результатов экспериментального исследования износ W можно представить степенной зависимостью:

$$W = C_w t^{X_w} S^{Y_w} V^{Z_w} \tau^{U_w},$$

где t – глубина резания, мм; S – величина подачи, мм/об; V – скорость резания, м/мм; τ – время, мин; C_w – коэффициент, учитывающий другие факторы при резании.

Если допустимое значение износа W_{don} , то оно по последней формуле соответствует времени T – стойкости инструмента (время работы инструмента до затупления). В этом случае

$$W_{don} = C_w t^{X_w} S^{Y_w} V^{Z_w} T^{U_w},$$

откуда стойкость инструмента

$$T = \left(\frac{W_{don}}{C_w t^{X_w} S^{Y_w} V^{Z_w}} \right)^{\frac{1}{U_w}}.$$

Если все параметры процесса известны (кроме V), то между T и V существует связь:

$$T = \frac{C_T}{V^P}. \quad (20)$$

Относительно V это выражение примет вид:

$$V = \left(\frac{W_{don}}{C_w t^{X_w} S^{Y_w} T^{Z_w}} \right)^{\frac{1}{Z_w}}$$

или

$$V = \frac{C_V}{t^{X_V} S^{Y_V} T^m}.$$

Поскольку доминирующее влияние на скорость резания оказывает стойкость инструмента, то, обозначив через $A = \frac{C_V}{t^{X_V} S^{Y_V}}$, получим, что

$$V = \frac{A}{T^m}, \quad (21)$$

где m – показатель относительной стойкости; чем меньше m , тем сильнее

V влияет на T , поскольку $T = \frac{C_T}{V^{\frac{1}{m}}}$.

В теории резания выражение (21) называют законом «стойкость – скорость» ($T-V$). Показатели во всех этих формулах – величины не постоянные даже для одного и того же обрабатываемого материала.

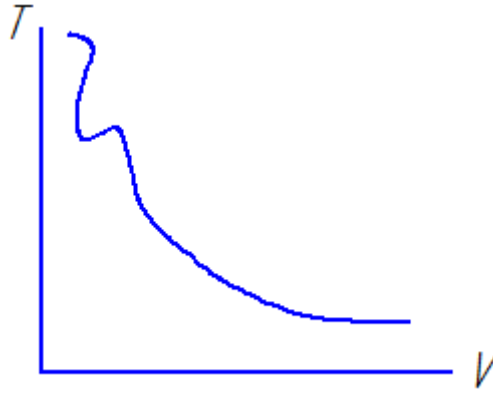


Рис. 8.4. График зависимости стойкость – скорость ($T - V$)

Немонотонность зависимости $T - V$ (рис. 8.4) связана с целым рядом явлений и, прежде всего, с наростом, который периодически возникает на малых скоростях.

Если нужно перейти на новую скорость для желательной стойкости T , то это можно сделать, так как

$$\frac{V_1}{V_2} = \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^m.$$

Из выражения

$$V = \frac{C_V}{t^{X_V} S^{Y_V} T^m} \quad (22)$$

можно ответить на вопрос, как лучше работать: на максимальной скорости или на максимальной подаче (силовое или скоростное резание). Известно, что

$$\tau_{\text{маш}} = \frac{\ell}{nS} \text{ мин,}$$

или

$$\tau_{\text{маш}} = \frac{\pi D \ell}{1000 V S} = \frac{B}{V S}.$$

Здесь не видно, чему отдать приоритет, так как при увеличении или скорости, или подачи прямо пропорционально уменьшится производительность.

Если свернуть выражение (22) в вид $V = \frac{C}{S^{Y_V}}$, имея в виду, что для V_1

соответствует S_1 , то из соотношения $\frac{V_1}{V_2} = \left(\frac{S_2}{S_1} \right)^{Y_V}$, где $Y_V \approx 0.5$, можно сделать соответствующий вывод: в пределах технологических

возможностей выгодно работать с наибольшими возможными подачами, а затем подбирать скорость, соответствующую заданной стойкости инструмента.

8.2. Критерии износа инструмента

В процессе резания непрерывно происходит затупление режущего лезвия инструмента в связи с износом. Предельно допустимая величина износа режущего клина, при достижении которого инструмент подлежит восстановлению, определяется по следующим критериям:

- 1) самый универсальный критерий – это появление блестящей полосы на изделии;
- 2) возрастание сил резания P_y и P_x ;
- 3) выход изделий за пределы заданной точности;
- 4) выход изделий за пределы заданной шероховатости поверхности;
- 5) повышение величины износа, целесообразной по экономическим соображениям.

Появление блестящей полосы связано с тем, что резец изнашивается, и образуется площадка износа, острые грани скругляются, на изделии появляется наклеп и соответственно блестящая полоса. Сейчас этот критерий практически не применяют.

Рост сил P_y и P_x . Опытные данные показывают, что тангенциальная составляющая силы резания P_z незначительно зависит от изнашивания режущего клина, больше реагируют на притупление силы P_y и P_x (рис. 8.5). Этот момент времени T определяет стойкость инструмента.

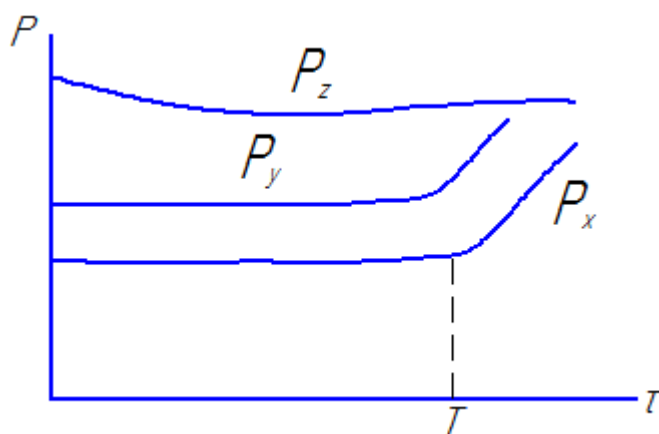


Рис. 8.5. График зависимости сил резания P_y , P_x и P_z от времени работы инструмента τ

Этот критерий исследовался в лабораторных испытаниях, его применяют на автоматических линиях. Для этой цели на какой-либо упругий исполнительный орган стола ставят датчик. Когда сила достигает

критической величины, происходит остановка станка и замена инструмента.

Точность изделия. При резании возникают две причины потери точности: отжим инструмента – f и изменение размера i за счет износа.

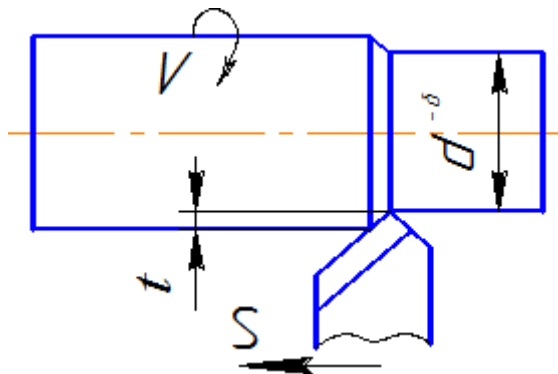


Рис. 8.6. Схема процесса точения в размер d с допуском δ

Реальная глубина резания (рис.8.6): $t_{\phi} = t - \delta$, где $\delta = f + i$. Отжим инструмента за счет сил резания $f = \frac{P_y}{I}$, где I – жесткость системы станок – приспособление – инструмент – деталь.

Из треугольника (рис. 8.7) $om = oa \cdot \tan \alpha$ при $\gamma = 0$. Тогда

$$om = \frac{W \tan \alpha}{\cos(90^\circ - \varphi - \varphi_1)} = \frac{W \tan \alpha}{\sin(\varphi + \varphi_1)}.$$

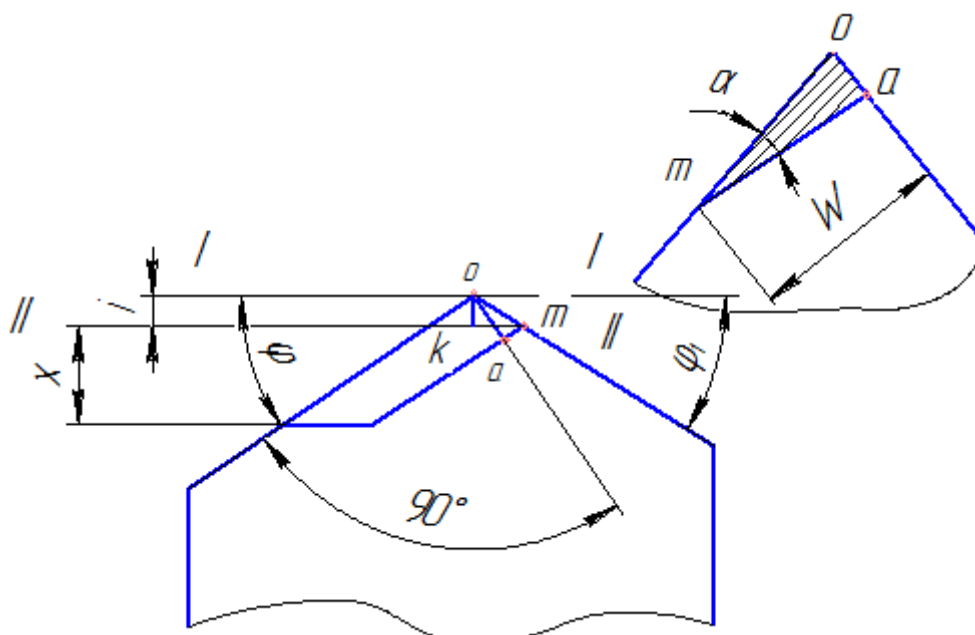


Рис. 8.7. Схема для расчета параметра i

Из треугольника omk $ok = i = om \sin \varphi_1$. В этом случае потеря размера от износа инструмента

$$i = \frac{W \operatorname{tg} \alpha \sin \varphi_1}{\sin(\varphi + \varphi_1)}.$$

Общая потеря размера

$$\Delta = \frac{P_y}{I} + \frac{W \operatorname{tg} \alpha \sin \varphi_1}{\sin(\varphi + \varphi_1)} \leq n\delta,$$

где δ – допуск на размер d .

Как правило, величина Δ не должна превышать 0.3–0.4 допуска: $\Delta \leq n\delta$; т. е. $n = 0.3–0.4$. Из последнего соотношения следует:

$$W_{\text{дон}} = \frac{\left(n\delta - \frac{P_y}{I}\right) \sin(\varphi + \varphi_1)}{\operatorname{tg} \alpha \sin \varphi_1},$$

что является критерием затупления по точности (рис. 8.8).

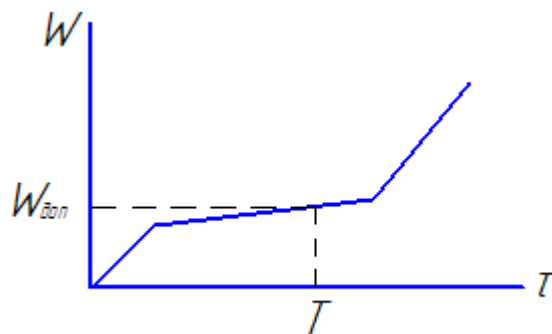


Рис. 8.8. Схема определения стойкости инструмента T по допустимому износу $W_{\text{дон}}$

Шероховатость поверхности. Шероховатость обработанной поверхности связана с состоянием инструмента. Для определения стойкости T нужно иметь зависимость $R_z = f(\tau)$ (рис.8.9).

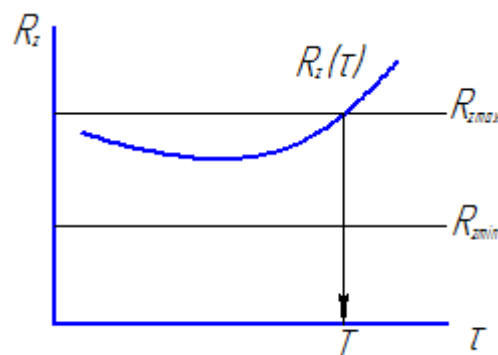


Рис. 8.9. Схема определения стойкости инструмента T по максимально допустимой шероховатости $R_{z \max}$.

Экономический критерий износа. Этот критерий предусматривает решение двух задач:

- а) получить наименьшие расходы на одно изделие по линии инструмента;
- б) получить наименьшую себестоимость операции.

Вариант а) используется, когда стоимость инструмента значительно дороже деталей (зуборезные инструменты, протяжки и т.п.). Если Q – стоимость инструмента, то стоимость одной минуты работы инструмента

определяется формулой $\frac{Q}{(m+1)T}$, где m – число переточек, которое допускает данный инструмент; $(m+1)T$ – срок службы инструмента. В стоимость инструмента входят также расходы на переточку (оплата заточнику, расход абразивов, электроэнергии) – q ; тогда затраты по линии инструмента определяются соотношением:

$$P = \frac{Q + qm}{(m+1)T} \tau_{\text{маш}},$$

где $\tau_{\text{маш}}$ – время работы при обработке данной детали. В этом случае стойкость инструмента T определяется из расчета минимума расходов P на дорогостоящий инструмент.

Вариант б) – стойкость инструмента по себестоимости данной операции. Себестоимость операции можно определить из соотношения:

$$C = c_p (\tau_{\text{маш}} + \tau_{\text{всп}}) + c_n \frac{\tau_{\text{см}}}{N} + c_u \frac{\tau_{\text{маш}}}{T},$$

где c_p – минутная з/п рабочего; c_n – минутная з/п наладчика; $\tau_{\text{см}}$ – время смены инструмента на все детали; $N = \frac{T}{\tau_{\text{маш}}}$ – число деталей в партии;

расходы на инструмент – $c_u = \frac{Q + qm}{m+1}$.

$$C = c_p (kT^m + \tau_{\text{всп}}) + c_n \tau_{\text{см}} kT^{m-1} + c_u kT^{m-1}.$$

В данном соотношении переменной является стойкость инструмента T , поэтому минимум затрат определится производной

$$\frac{dC}{dT} = c_p k m T^{m-1} + k(c_n \tau_{\text{см}} + c_u)(m-1)T^{m-2} = 0,$$

т.к. $T \neq 0$, то, сократив на T^{m-1} и k , получим

$$c_p m + (c_n \tau_{\text{см}} + c_u)(m-1) \frac{1}{T} = 0,$$

откуда

$$T = \left(\frac{1}{m} - 1 \right) M ,$$

где
$$M = \frac{c_n \tau_n + c_u}{c_p} .$$

Последние работы показывают, что в ряде случаев расчеты по себестоимости операции не всегда устраивают экономистов промышленного предприятия. Иногда расчеты ведут по наибольшей прибыли.

РАЗДЕЛ III. ТЕРМИЧЕСКАЯ И ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

Глава 1. Термическая обработка

1.1 Отжиг стали

Отжигом называется термическая обработка, в процессе которой производится нагрев деталей из стали до требуемой температуры с последующей выдержкой и медленным охлаждением в печи для получения однородной, равновесной, менее твердой структуры, свободной от остаточных напряжений.

На практике используют два принципиально различных вида отжига: отжиг I рода и отжиг II рода.

Отжиг I рода в зависимости от исходного состояния стали и температуры нагрева может быть: гомогенизационным, рекристаллизационным и отжигом для снятия внутренних напряжений (рис. 1.1).

Особенностью всех разновидностей отжига I рода является то, что все они не связаны с фазовыми превращениями в твердом состоянии стали и протекают независимо от того, идут при этом фазовые превращения или нет.

Гомогенизационный (диффузионный) отжиг применяют для устранения химической неоднородности, возникающей при кристаллизации металла. Этому отжигу подвергают слитки и отливки из легированной стали для устранения дендритной (или внутрикристаллитной ликвации), которая повышает склонность стали при обработке давлением к трещинообразованию, анизотропии свойств и возникновению таких дефектов, как шиферность (слоистый излом) и флокены (тонкие внутренние трещины, наблюдаемые в изломе в виде белых пятен).

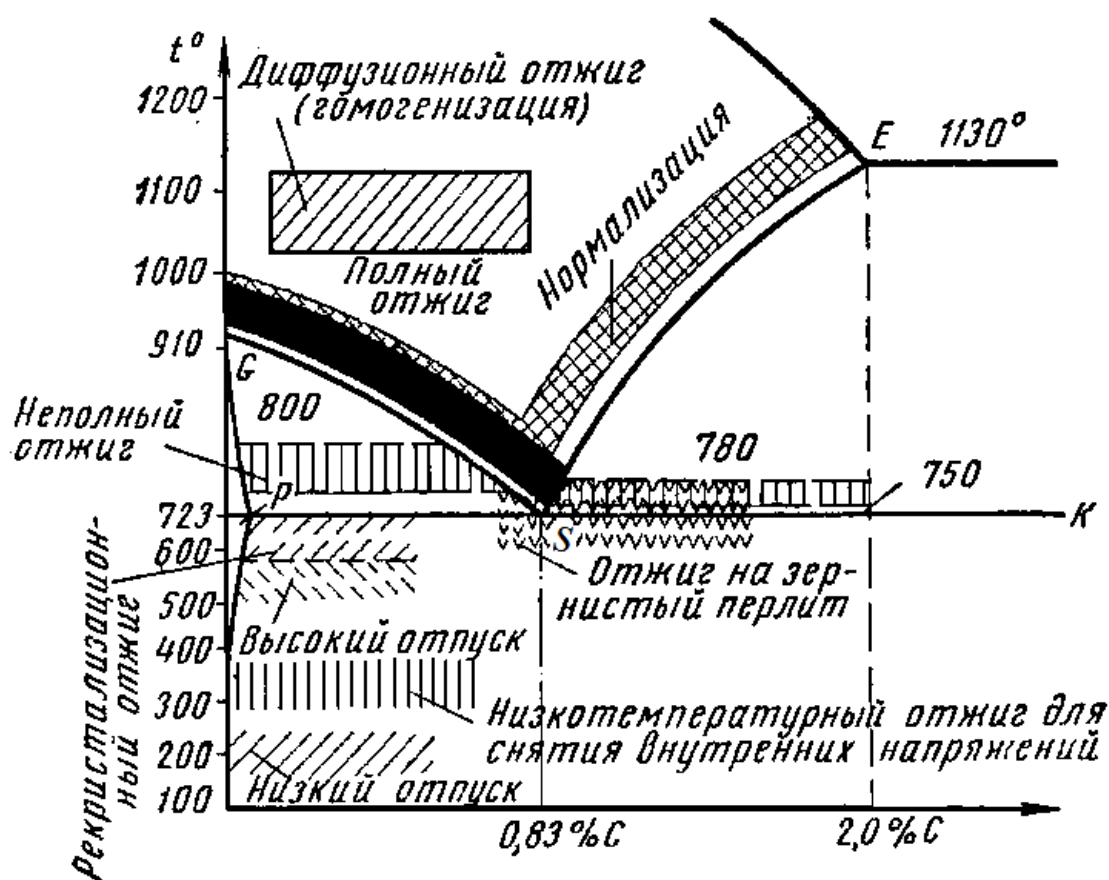


Рис. 1.1. Температура нагрева для различных видов отжига и нормализации углеродистой стали

Нагрев при диффузионном отжиге проводят до максимально высоких температур, так как при этом наиболее интенсивно происходят диффузионные процессы, необходимые для выравнивания состава стали в объеме. Обычно для легированных сталей температуру гомогенизационного отжига выбирают в интервале $1050 - 1250^{\circ}\text{C}$. Обычно на практике выдержка при гомогенизационном отжиге составляет не более 15 – 20 ч. После выдержки детали охлаждают вместе с печью до $800 - 820^{\circ}\text{C}$, а затем проводится охлаждение на воздухе. В результате диффузионного отжига получается крупное зерно, которое устраняется при обработке давлением или последующей термической обработке.

Рекристаллизационный отжиг заключается в нагреве холоднодеформированной стали выше температуры начала рекристаллизации, выдержке при этой температуре и последующем медленном охлаждении.

Рекристаллизационный отжиг применяют для устранения наклепа после холодной пластической деформации. При проведении этого отжига главным процессом является рекристаллизация металла, а также используют в промышленности как первоначальную операцию перед холодной обработкой давлением (для придания материалу наибольшей

пластичности), как промежуточный процесс между операциями холодного деформирования (для снятия наклепа) и как окончательную термическую обработку для придания полуфабрикату или изделию требуемых свойств.

Отжиг для снятия внутренних напряжений проводят с целью уменьшения остаточных напряжений, образовавшихся в металле при ковке, литье, сварке, способных вызвать коробление и разрушение детали. Главным процессом, проходящим при отжиге для снятия внутренних напряжений, является полная или частичная релаксация остаточных напряжений. На практике отжиг стальных изделий для снятия напряжений проводят в температурном интервале 160 – 700°C с последующим медленным охлаждением.

Отжиг II рода – термическая обработка, заключающаяся в нагреве стали до температур выше критических точек A_{c1} или A_{c3} , выдержке и, как правило, в последующем медленном охлаждении. Отжиг II рода основан на прохождении фазовых превращений в твердом состоянии – превращении $\gamma \rightarrow \alpha$ – и поэтому часто называется фазовой перекристаллизацией.

В большинстве случаев отжиг II рода является подготовительной термической обработкой – в процессе отжига снижается твердость и прочность, что облегчает обработку резанием средне- и высокоуглеродистых сталей. Неполный отжиг инструментальных сталей предшествует окончательной термической обработке.

В некоторых случаях (например, для многих крупных неотвечественных отливок) отжиг II рода является окончательной термической обработкой.

Существуют следующие разновидности отжига стали: полный, неполный и изотермический.

Полный отжиг применяется для доэвтектоидных сталей и состоит в нагреве стали на 30 – 50° С выше точки A_{c3} , выдержке при этой температуре до полной перекристаллизации стали и медленном охлаждении (см. рис. 98). При таком отжиге образуется мелкое аустенитное зерно, из которого при охлаждении формируется равномерная мелкозернистая феррито-перлитная структура, поэтому полный отжиг обычно применяют с целью измельчения зерна.

Неполный отжиг отличается от полного тем, что сталь нагревают до более низкой температуры (выше A_{c1} , но ниже A_{c3}). Этот вид отжига для доэвтектоидных сталей применяют ограниченно и в основном для улучшения их обрабатываемости резанием, так как в результате частичной перекристаллизации стали (избыточный феррит лишь частично превращается в аустенит. Неполный смягчающий отжиг позволяет сэкономить время и снизить стоимость обработки.

Изотермический отжиг применяют для улучшения обрабатываемости легированных сталей. Он состоит в нагреве на 30 – 50° С выше A_{c3} (как и

при полном отжиге) и сравнительно быстром охлаждении до температуры ниже A_{r1} (обычно $660 - 680^{\circ}\text{C}$), изотермической выдержке при этой температуре для получения равновесной перлитной структуры и последующем охлаждении на воздухе. Изотермическому отжигу чаще всего подвергают поковки (штамповки) и сортовой прокат небольших размеров из легированной цементуемой стали.

Если при проведении отжига охлаждение после нагрева и выдержки проводится на воздухе, то такой процесс называется нормализационным отжигом или нормализацией.

Нормализация - это процесс термообработки стали при котором ее нагревают до температуры на $30 - 50^{\circ}\text{C}$ выше линии GSE и охлаждают на воздухе. Ускоренное по сравнению с обычным отжигом охлаждение обуславливает несколько большее переохлаждение аустенита, поэтому при нормализации получается более тонкое строение эвтектоида (сорбит). Кроме того, при нормализации частично подавляется выделение избыточных фаз (феррита в доэвтектоидной стали и цементита в заэвтектоидной стали) и, следовательно, образуется квазиэвтектоид. В результате прочность стали после нормализации становится больше прочности после отжига.

Нормализацию применяют чаще всего в следующих случаях: как промежуточную операцию для смягчения стали перед обработкой резанием; для устранения пороков и общего улучшения структуры стали перед закалкой.

Таким образом, назначение нормализации как промежуточной операции аналогично назначению отжига. Но так как нормализация выгоднее отжига, то ее всегда следует предпочесть отжигу, если оба эти вида обработки дают одинаковые результаты.

1.2. Закалка стали

Закалка заключается в нагреве стали на $30 - 50^{\circ}\text{C}$ выше A_{c3} для доэвтектоидных сталей или на $30 - 50^{\circ}\text{C}$ выше A_{c1} для заэвтектоидных сталей, выдержке для завершения фазовых превращений и последующем охлаждении со скоростью выше критической (рис. 1.2). Для углеродистых сталей это охлаждение проводят чаще в воде, а для легированных — в масле или других средах. Закалка не является окончательной операцией термической обработки. Чтобы уменьшить хрупкость и напряжения, вызванные закалкой, и получить требуемые механические свойства, сталь после закалки подвергают отпуску.

Выбор температуры нагрева под закалку. Доэвтектоидные стали, как правило, подвергают полной закалке, при этом температурой нагрева является температура $A_{c3} + (30 - 50)^{\circ}\text{C}$. Такая структура обеспечивает получение при нагреве мелкозернистого аустенита и соответственно после

охлаждения со скоростью выше критической. При закалке доэвтектоидной стали с температуры выше A_{c1} , но ниже A_{c3} в структуре наряду с мартенситом сохраняется часть феррита, который снижает твердость в закаленном состоянии и ухудшает механические свойства при отпуске. Такая неполная закалка, как правило, для доэвтектоидных сталей не применяется.

Для заэвтектоидных сталей оптимальная температура закалки, наоборот, лежит в интервале между A_{c1} и A_{cm} и теоретически является неполной. Наличие в структуре закаленной стали избыточного цементита полезно во всех отношениях. Включения избыточного цементита повышают износоустойчивость стали. Нагрев же стали выше A_{cm} не только не повышает твердость, а даже несколько понижает, вследствие растворения избыточного цементита и увеличения количества остаточного аустенита.

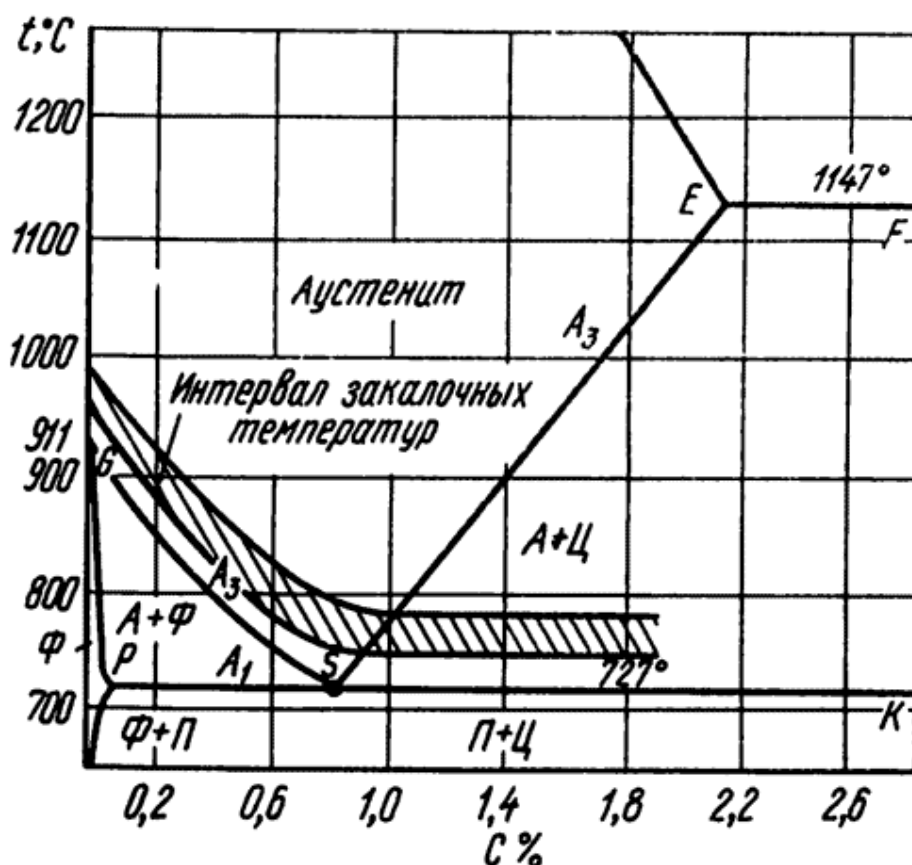


Рис. 1.2. Интервалы закалочных температур углеродистой стали

Таким образом, оптимальной является закалка доэвтектоидной стали от температур на $30 - 50^\circ \text{C}$ выше A_{c3} , а для заэвтектоидных сталей на $30 - 50^\circ \text{C}$ выше A_{c1} (Рис. 1.2).

Повышение температуры закалки выше этих температур и вызванный этим рост зерна аустенита обнаруживается в первую очередь в получении более грубой и крупноигольчатой структуры мартенсита.

Для многих высоколегированных сталей температура нагрева под закалку значительно превышает критические точки A_{c1} и A_{c3} (на 150 – 250° С), что необходимо для перевода в твердый раствор специальных карбидов и получения требуемой легированности аустенита.

Это повышение температуры не ведет к заметному росту зерна, так как нерастворенные частицы карбидов тормозят рост зерна аустенита.

Охлаждающие среды для закалки. Охлаждение при закалке должно обеспечить получение структуры мартенсита в пределах заданного сечения изделия (определенную прокаливаемость) и не должно вызывать закалочных дефектов: трещин, деформаций, коробления невысоких растягивающих остаточных напряжений в поверхностных слоях.

Чаще для закалки используют кипящие жидкости – воду, вод-ные растворы щелочей и солей, масла (табл. 1). При закалке в этих средах различают три периода:

1) пленочное кипение, когда на поверхности стали образуется паровая рубашка; в этот период скорость охлаждения сравнительно невелика;

2) пузырьковое кипение, наступающее при полном разрушении паровой пленки, наблюдаемое при охлаждении поверхности до температуры ниже критической; в этот период происходит быстрый отвод теплоты;

3) конвективный теплообмен, который отвечает температурам ниже температуры кипения охлаждающей жидкости; теплоотвод в этот период происходит с наименьшей скоростью.

В табл. 1 приведены примерный температурный интервал пузырькового кипения и относительная интенсивность охлаждения в середине этого интервала для различных охлаждающих сред.

Таблица 1

Характеристика различных закалочных сред

Охлаждающая среда	Температура, °С		Относительная интенсивность охлаждения в интервале температур пузырькового кипения
	охлаждающая среда	пузырьковое кипение	
Вода	20	400-100	1,0
	40	350-100	0,7
	80	250-100	0,2
1 % раствор NaCl в воде	20	500-100	1,5
10 % раствор NaCl в воде	20	650-100	3,0
Раствор NaOH в воде:			
10 %-ый	20	650-100	2,5
50 %-ый	20	650-100	2,0
Масло минеральное	20-200	500-250	0,3

При закалке углеродистой и некоторых низколегированных сталей, имеющих малую устойчивость переохлажденного аустенита, в качестве охлаждающей среды применяют воду и водные растворы NaCl или NaOH.

Для легированных сталей, обладающих более высокой устойчивостью переохлажденного аустенита при закалке, применяют минеральное масло. Масло как закалочная среда имеет следующие преимущества: небольшую скорость охлаждения в мартенситном интервале температур, что уменьшает возникновение закалочных дефектов, и постоянство закалывающей способности в широком интервале температур среды (20 – 150° С).

Закаливаемость и прокаливаемость стали. Под закаливаемостью понимают способность стали повышать твердость в результате закалки. Закаливаемость стали определяется в первую очередь содержанием в стали углерода. Чем больше в мартенсите углерода, тем выше его твердость. Легирующие элементы оказывают относительно небольшое влияние на закаливаемость.

Под прокаливаемостью понимают способность стали получать закаленный слой с мартенситной или тростито-мартенситной структурой и высокой твердостью на ту или иную глубину. Прокаливаемость определяется критической скоростью охлаждения, зависящей от состава стали. Если действительная скорость охлаждения в сердцевине изделия будет превышать критическую скорость закалки V_k , то сталь получит мартенситную структуру по всему сечению и тем самым будет иметь сквозную прокаливаемость. Если действительная скорость охлаждения в сердцевине будет меньше V_k , то изделие прокалится только на некоторую глубину и прокаливаемость будет неполной.

Способы закалки. Наиболее широко применяют закалку в одном охладителе. Такую закалку называют *непрерывной*. Во многих случаях, особенно для изделий сложной формы и при необходимости уменьшения деформации, применяют и другие способы закалки.

Прерывистая закалка (в двух средах). Изделие, закаливаемое по этому способу, сначала быстро охлаждают в воде до температуры несколько выше точки M_n , а затем быстро переносят в менее интенсивный охладитель (например, в масло или на воздух), в котором оно охлаждается до 200° С. В результате переноса во вторую закалочную среду уменьшаются внутренние напряжения, которые возникли бы при быстром охлаждении в одной среде (воде), в том числе и в области температур мартенситного превращения.

Закалка с самоотпуском. В этом случае охлаждение изделия в закалочной среде прерывают с тем, чтобы в сердцевине изделия сохранилось еще некоторое количество теплоты. Под действием теплообмена температура в более сильно охлаждающихся поверхностных слоях повышается и сравнивается с температурой сердцевины. Таким образом

происходит отпуск поверхности стали (самоотпуск). Закалку с самоотпуском применяют, например, для таких инструментов, как зубила, кувалды, слесарные молотки, керны, которые работают с ударными нагрузками и должны сочетать высокую твердость на поверхности с повышенной вязкостью в сердцевине.

Ступенчатая закалка. При выполнении закалки по этому способу сталь после нагрева до температуры закалки охлаждают в среде, имеющей температуру несколько выше точки M_n ($\approx 180 - 250^\circ \text{C}$), и выдерживают в ней сравнительно короткое время. Затем изделие охлаждают до комнатной температуры на воздухе. В результате выдержки в закалочной среде достигается выравнивание температуры по сечению изделия, но это не должно вызывать превращения аустенита с образованием бейнита. Ступенчатую закалку чаще применяют для инструмента из углеродистых сталей диаметром не более 8 – 10 мм. Скорость охлаждения более крупного инструмента в среде с температурой выше точки M_n оказывается ниже критической скорости закалки, и аустенит претерпевает распад при высоких температурах.

Изотермическая закалка. Закалку по этому способу выполняют в основном так же, как и ступенчатую, но в данном случае предусматривается более длительная выдержка выше точки M_n . При такой выдержке происходит распад аустенита с образованием нижнего бейнита. Для углеродистых сталей изотермическая закалка не дает существенного повышения механических свойств по сравнению со свойствами, получаемыми обычной закалкой и отпуском.

Обработка стали холодом. В закаленной стали, особенно содержащей более 0,4 – 0,5 % С, у которой точка M_k лежит ниже нуля, всегда присутствует остаточный аустенит. Аустенит понижает твердость, износостойкость и нередко приводит к изменению размеров деталей, работающих при низких температурах, в результате самопроизвольного превращения его в мартенсит.

Для уменьшения количества остаточного аустенита в закаленной стали применяют обработку холодом, заключающуюся в охлаждении закаленной стали до температуры ниже нуля. Понижение температуры до точки M_k ($-30 \dots -70^\circ \text{C}$) для большинства сталей вызывает превращение остаточного аустенита в мартенсит, что повышает твердость HRC сталей с 0,8 – 1,1 % С на 1 – 3 единицы. Однако одновременно возрастают напряжения, поэтому изделия охлаждают медленно и сразу после обработки холодом выполняют отпуск.

Обработку холодом используют главным образом для измерительных инструментов, для пружин и деталей из цементируемых высоколегированных сталей, сохраняющих много аустенита после закалки.

Поверхностная закалка -это закалке на некоторую (заданную) глубину закаливается только поверхностный слой, тогда как сердцевина изделия остается незакаленной.

Основное назначение поверхностной закалки: повышение твердости, износостойкости и предела выносливости обрабатываемого изделия. Сердцевина остается вязкой и воспринимает ударные нагрузки. В практике более часто применяют поверхностную закалку с индукционным нагревом током высокой частоты (ТВЧ).

Индукционный нагрев происходит вследствие теплового действия тока, индуктируемого в изделии, помещенном в переменное магнитное поле.

Глубина закалки примерно равна глубине нагрева до температуры выше критической точки A_{c3} , глубинные слои детали нагреваются ниже температур критических точек и при охлаждении не упрочняются. При необходимости повышения прочности сердцевины перед поверхностной закалкой деталь подвергают нормализации.

Выбор оптимальной толщины упрочняемого слоя определяется условиями работы детали. Когда изделие работает только на износ или в условиях усталости, толщину закаленного слоя чаще принимают 1,5 – 3 мм, в условиях высоких контактных нагрузок и возможной перешлифовки – 4 – 5 мм. В случае особо больших контактных на-грузок, например для валков холодной прокатки, толщина закаленного слоя достигает 10 – 15 мм и выше.

После закалки с индукционным нагревом изделия подвергают низкому отпуску при 160 – 200° С, нередко и самоотпуску.

Для поверхностной индукционной закалки применяют стали, содержащие 0,4 – 0,5 % С (40, 45, 40X, 45X, 40ХН и др.), которые после закалки имеют высокие твердость (HRC 50 – 60), сопротивляемость износу и не склонны к хрупкому разрушению.

1.3. Отпуск стали

Отпуск заключается в нагреве закаленной стали до температуры ниже A_{c1} , выдержке при заданной температуре и последующем охлаждении с определенной скоростью. Отпуск является окончательной операцией термической обработки, в результате которой сталь получает требуемые механические свойства. Кроме того, отпуск полностью или частично устраняет внутренние напряжения, возникающие при закалке. Эти напряжения снимаются тем полнее, чем выше температура отпуска.

Основное влияние на свойства стали оказывает температура отпуска. Различают три вида отпуска.

Низкотемпературный (низкий) отпуск проводят при нагреве до 250°С. При этом снижаются закалочные макронапряжения, мартенсит

закалки переходит в отпущенный мартенсит, повышается прочность и немного улучшается вязкость без заметного снижения твердости. Закаленная сталь (0,6 – 1,3 % С) после низкого отпуска сохраняет твердость 58 – 63 HRC, а следовательно, высокую износостойкость. Однако такое изделие (если оно не имеет вязкой сердцевины) не выдерживает значительных динамических нагрузок.

Низкотемпературному отпуску подвергают режущий и мерительный инструмент из углеродистых и низколегированных сталей, а также детали, претерпевшие поверхностную закалку, цементацию, цианирование. Реже низкий отпуск применяют для среднеуглеродистых сталей (0,3 – 0,45 % С). Продолжительность отпуска составляет обычно 1 – 2,5 ч, а для изделий больших сечений и измерительных инструментов назначают более длительный отпуск.

Среднетемпературный (средний) отпуск выполняют при 350 – 500° С и применяют главным образом для пружин и рессор, а также для штампов. Такой отпуск обеспечивает высокие пределы упругости и выносливости и релаксационную стойкость. Структура стали после среднего отпуска – тростит отпуска; твердость стали 40 – 50 HRC. Температуру отпуска надо выбирать таким образом, чтобы не вызвать необратимой отпускной хрупкости.

Охлаждение после отпуска при 400 – 450° С следует проводить в воде, что способствует образованию на поверхности сжимающих остаточных напряжений, которые увеличивают предел выносливости пружин.

Высокотемпературный (высокий) отпуск проводят при 500 – 680° С. Структура стали после высокого отпуска – сорбит отпуска. Высокий отпуск создает наилучшее соотношение прочности и вязкости стали.

Закалка с высоким отпуском (по сравнению с нормализацией или отжигом) повышает временное сопротивление, предел текучести, относительное сужение и особенно ударную вязкость. Термическую обработку, состоящую из закалки и высокого отпуска, называют улучшением.

Улучшению подвергают среднеуглеродистые (0,3–0,5% С) конструкционные стали, к которым предъявляются высокие требования по пределу выносливости и ударной вязкости. Улучшение значительно повышает конструктивную прочность стали, уменьшая чувствительность к концентраторам напряжений, увеличивая работу развития трещин и снижая температуру порога хладноломкости.

Глава 2. Химико-термическая обработка

2.1. Основы процессов химико-термической обработки

Химико-термической обработкой (ХТО) называется термическая обработка, заключающаяся в сочетании термического и химического воздействия с целью изменения состава, структуры и свойств по верхностного слоя стали.

При химико-термической обработке происходит поверхностное насыщение стали соответствующим элементом (C, N, Al, Cr, Si и др.) путем его диффузии в атомарном состоянии из внешней среды (твердой, газовой, паровой, жидкой) при высокой температуре.

Химико-термическая обработка включает три последовательные стадии:

1 Образование активных атомов в насыщающей среде вблизи поверхности или непосредственно на поверхности металла.

2 Адсорбцию образовавшихся активных атомов поверхностью насыщения. Различают физическую (обратимую) и химическую адсорбцию (хемосорбцию). При химико-термической обработке оба типа адсорбции накладываются один на другой. Физическая адсорбция приводит только к сцеплению адсорбированных атомов насыщающего элемента (адсорбата) с обрабатываемой поверхностью (адсорбентом) благодаря действию вандер-ваальсовых сил притяжения, и для нее характерна легкая обратимость процесса адсорбции (де-сорбция). При хемосорбции происходит взаимодействие между атомами адсорбата и адсорбента, которое по своему характеру и силе близко к химическому.

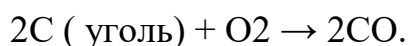
3. Диффузию — перемещение адсорбированных атомов в решетке обрабатываемого металла. По мере накопления атомов диффундирующего элемента на поверхности насыщения возникает диффузионный поток от поверхности в глубь обрабатываемого металла (изделия). Процесс диффузии возможен только при наличии растворимости диффундирующего элемента в обрабатываемом металле и достаточно высокой температуре, обеспечивающей необходимую энергию атомам.

При насыщении углеродом или азотом, составляющими с железом твердые растворы внедрения, диффузия протекает быстрее, чем при насыщении металлами, образующими твердые растворы замещения.

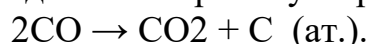
Развитие процесса диффузии приводит к образованию в поверхностных слоях обрабатываемого металла диффузионной зоной, состоящей из твердых растворов или химических соединений.

2.2. Цементация

Цементацией (науглероживанием) называется химико-термическая обработка, заключающаяся в диффузионном насыщении поверхностного слоя стали углеродом при нагреве в соответствующей среде – карбюризаторе. Цементации подвергают изделия из ста-лей, содержащих не более 0,25 % С. Среда, поставляющая углерод, называется карбюризатором. При цементации в твердом карбюризаторе изделия укладывают в ящики, куда засыпают древесный уголь с добавкой 20 % BaCO_3 .

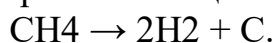


В контакте с железом он дает атомарный углерод:



Этот активный углерод поглощается аустенитом (как правило, цементацию проводят при температурах выше точки Ac_3 (930 – 950°C)) и диффундирует в глубь изделия.

Для газовой цементации карбюризатором служит природный газ (CH_4), получаемый в специальных генераторах с контролируемой атмосферой, а также керосин или бензин, каплями подаваемые в герметичное рабочее пространство печи, где они образуют газовую фазу. Основным поставщик углерода при газовой цементации – метан



Глубина диффузионной зоны при цементации составляет 0,5...2,0 мм. В зависимости от заданной глубины цементованного слоя время выдержки составляет при цементации от нескольких часов до нескольких десятков часов.

Цементация является промежуточной операцией, цель которой обогащение поверхностного слоя углеродом (до 0,8...1,0 % С). Закалка после цементации благодаря образованию в поверхностном слое высокоуглеродистого мартенсита и придает этому слою высокую прочность и твердость. Заключительной операцией термической обработки цементованных деталей во всех случаях является низкий отпуск при 160 – 180°C, переводящий мартенсит закали в поверхностном слое в отпущенный мартенсит, снимающий напряжения.

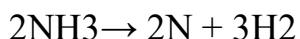
Цементацию очень широко применяют в машиностроении для повышения твердости и износостойкости изделий (шестерен, зубчатых колес, валов и др.) с сохранением вязкости их сердцевины.

2.2. Азотирование

Азотированием называют процесс диффузионного насыщения поверхностного слоя стали азотом. Азотирование очень сильно повышает твердость поверхностного слоя, его износостойкость, предел выносливости

и сопротивление коррозии в таких средах, как атмосфера, вода, пар и др. Твердость азотированного слоя заметно выше, чем твердость цементованного, и сохраняется при нагреве до высоких температур (450 – 500°C), тогда как твердость цементованного слоя, имеющего мартенситную структуру, сохраняется только до 200 – 225°C.

Для азотирования используют аммиак, который поставляется атомарный азот



Азотирование проводят при температурах 500...580°C в течение 1...60ч. Толщина азотированного слоя составляет 0,1...0,8 мм.

Азотированию подвергают среднеуглеродистые легированные стали, которые приобретают высокую твердость и износостойкость при азотировании (одновременное присутствие алюминия, хрома и молибдена позволяет повысить твердость азотированного слоя до 1200 HV – сталь 38Х2МЮА).

Технологический процесс азотирования предусматривает проведение нескольких операций.

1. Предварительная термическая обработка заготовки. Эта операция состоит из закалки и высокого отпуска стали для получения повышенной прочности и вязкости в сердцевине изделия. Структура стали после отпуска – сорбит отпуска.

2. Механическая обработка деталей, а также шлифование, которое придает окончательные размеры детали.

3. Защита участков, не подлежащих азотированию.

4. Азотирование.

5. Окончательное шлифование или доводка изделия.

Азотирование является длительным процессом и для его ускорения проводят двухступенчатый процесс: сначала азотирование проводят при 500 – 520°C, а затем при 540 – 560° С.

2.3. Нитроцементация

Нитроцементацией называют процесс диффузионного насыщения поверхностного слоя стали одновременно углеродом и азотом при 840-860 °С в газовой среде, состоящей из науглероживающего газа и аммиака. Продолжительность процесса 4-10 ч. Основное назначение нитроцементации — повышение твердости и износостойкости стальных деталей.

Установлено, что при одновременной диффузии углерода и азота ускоряется диффузия углерода. Скорость роста нитроцементованного и цементованного слоев на глубину 500 мкм практически одинакова, хотя температура нитроцементации почти на 100 °С ниже.

После нитроцементации следует закалка непосредственно из печи, реже после повторного нагрева, применяют и ступенчатую закалку. После закалки проводят отпуск при 160-180 °С.

При оптимальных условиях насыщения структура нитроцементованного слоя должна состоять из мелкокристаллического мартенсита, небольшого количества мелких равномерно распределенных карбонитридов и 25—30 % остаточного аустенита.

Твердость слоя после закалки и низкого отпуска HRC 58-60, HV 570—690 (5700—6900 МПа). Высокое содержание остаточного аустенита обеспечивает хорошую прирабатываемость, например не шлифуемых автомобильных шестерен, что обеспечивает их бесшумную работу. Максимальные показатели прочности достигаются только при оптимальном для данной стали содержании на поверхности нитроцементованного слоя углерода и азота.

Толщина нитроцементованного слоя составляет обычно 200-800 мкм. Она не должна превышать 1000 мкм. При большей толщине в нем образуется темная составляющая и другие дефекты, снижающие механические свойства стали.

Нитроцементации обычно подвергают детали сложной конфигурации, склонные к короблению. Нитроцементация имеет следующие преимущества по сравнению с газовой цементацией. Процесс происходит при более низкой температуре (840-860 °С вместо 910-930 °С): толщина слоя меньше; получаются меньшие деформации и коробление деталей; повышается сопротивление износу и коррозии.

Нитроцементацию широко применяют на автомобильных и тракторных заводах. Так, на ВАЗе 94,5 % деталей, проходящих химико-термическую обработку, подвергают нитроцементации.

2.4. Цианирование

Цианированием называют процесс диффузионного насыщения поверхностного слоя стали одновременно углеродом и азотом при температуре 820 – 870°С в расплавленных солях в течение 2...10 ч, содержащих группу NaCN.

По сравнению с газовой цементацией цианирование имеет следующие преимущества: ниже температура процесса и, следовательно, меньше рост аустенитного зерна, выше износостойкость и меньше коробление деталей.

Цианирование позволяет выполнять закалку непосредственно из цианистой ванны. После закалки следует низкотемпературный отпуск (180 – 200° С). Твердость цианированного слоя после термической обработки 58 – 62 HRC. Недостатком процесса является ядовитость цианистых солей и необходимость в связи с этим принятия мер по охране труда.

2.5. Борирование

Борирование – насыщение поверхности металлов и сплавов бором с целью повышения твердости, износостойкости и коррозионной стойкости. Борированные слои вследствие образования на поверхности боридов FeB и Fe₂B обладают исключительно высокой твердостью (до 2000 HV) и высоким сопротивлением абразивному износу; однако боридные слои очень хрупкие.

Для уменьшения хрупкости боридных слоев и с целью плакирования поверхности проводят одновременное (чаще поэтапное) насыщение поверхности стали бором и хромом (борохромирование), бором и никелем (бороникелирование) и т. п.

2.6. Алитирование

Алитирование – насыщение поверхности стали алюминием. Применяют алитирование для повышения жаростойкости сталей, чугунов, литых лопаток газотурбинных двигателей из никелевых сплавов. При нагреве алитированного изделия на его поверхности образуется тонкая и прочная пленка Al₂O₃, предохраняющая изделие от дальнейшего окисления. Алитирование чаще всего производят в порошкообразной смеси ферроалюминия, NH₄Cl и Al₂O₃, в которой образуется газообразный хлорид AlCl₃, являющийся поставщиком активных атомов алюминия. Алитирование проводят при 950 – 1050° С в течение 3...12 ч.

2.7. Хромирование

Хромирование - насыщение поверхности стальных изделий хромом. Этот процесс обеспечивает повышенную устойчивость стали против газовой коррозии (окалиностойкость) - до 800°С, высокую коррозионную стойкость в таких средах, как вода, морская вода и азотная кислота. Хромирование сталей, содержащих свыше 0,3-0,4 % С, повышает также твердость и износостойкость.

Твердость слоя, полученного хромированием железа, HV 250-300 (2500-3000 МПа), а хромированием стали - HV1200-1300 (12 000-13000 МПа).

Хромирование используют для деталей паросилового оборудования, пароводяной арматуры, клапанов, вентилей, патрубков, а также деталей, работающих на износ в агрессивных средах.

РАЗДЕЛ IV. ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

Основными способами изготовления металлических деталей и их полуфабрикатов в машиностроении являются литье, обработка давлением и обработка резанием. Особое место занимает обработка металлов давлением (ОМД), использующая присущее металлам и сплавам на их основе свойство воспринимать значительную пластическую деформацию в горячем и холодном состоянии в результате воздействия на него деформирующего инструмента. При этом обеспечивается не только придание подвергаемым пластической деформации заготовкам необходимых размеров и формы, но и существенно улучшаются физико-механические и другие свойства металлов, в том числе во взаимосвязи вместе с другими видами обработки.

ОМД – высокопроизводительный и экономичный способ получения изделий, а именно – деталей или их полуфабрикатов в виде заготовок, близких по форме к готовым деталям, заданной формы и размеров в твердом состоянии без снятия стружки с помощью деформирующего инструмента. В этом заключено главное отличие способа ОМД от способов получения изделий литьём (в жидком состоянии) и механической обработки (со снятием стружки). В процессе пластического формоизменения изменяется структура металла и повышаются его физико-механические свойства. Поэтому наиболее тяжело нагруженные детали машин и механизмов в обеспечение их надёжности, долговечности и безопасности изготавливают обработкой давлением. Отсюда следует, что знание основ ОМД, сортамента производимого металлопроката крайне необходимо не только металлургам, но и инженерно-техническим работникам смежных специальностей, педагогам, осуществляющим подготовку квалифицированных специалистов.

Глава 1. Физические основы обработки металлов давлением

Обработка металлов давлением (ОМД) возможна благодаря уникальной способности металлов к пластической деформации (ПД), т.е. к изменению формы металла без разрушения. Способность металла к ПД зависит от многих факторов: температуры нагрева, химического состава, исходной структуры, скорости деформирования, схем главных напряжений и деформаций.

Все применяемые в промышленности металлы и сплавы состоят из множества произвольно ориентированных в объеме кристаллов, образуя поликристаллическое строение из огромного числа зерен – кристаллитов – мелких (10^{-1} мм) кристаллов неправильной формы, разориентированных друг относительно друга (рис. 1.1, [1]), внутри которых наблюдается более или менее упорядоченная структура, характеризующаяся дальним

порядком в расположении атомов и анизотропией свойств. Расположение атомов в кристалле определяется условиями кристаллизации.



Рис. 1.1. Схема ориентации кристаллических решеток зерен в поликристаллическом теле.

Пластическое деформирование происходит за счет двух механизмов: скольжения и двойникования. Скольжение представляет собой параллельное смещение тонких слоев кристалла относительно смежных. Обычно плоскостями скольжения являются плоскости наибольшей упаковки атомов.

Особую роль в механизме пластической деформации металлов и сплавов, имеющих преимущественно поликристаллическое строение, играют границы зерен, по которым в процессе затвердевания образуются так называемые межкристаллитные прослойки, толщина которых не превышает 1–2 мкм. Границы зерен отличаются как по составу, так и по структуре и, как правило, обогащены примесями. На границах зерен накапливаются дефекты кристаллической решетки, в которых атомы обладают высшей потенциальной энергией. В результате подвижность атомов по границам зерен может быть больше, чем во внутренних слоях зерен, и их относительное перемещение может происходить при сравнительно меньшем касательном напряжении.

Деформации пограничных слоев зерен сложные из-за наличия в них нерастворимых примесей и неправильной формы поверхности самих зерен, обладающих, к тому же, различными физико-механическими свойствами. В связи с этим различают два вида деформации, имеющих преимущественно поликристаллическое строение металлов и сплавов: внутренне кристаллическую (по зерну) и межкристаллическую (по границам зерен). Первая протекает путем скольжения и двойникования, вторая – путем поворота и перемещением только зерен относительно друг

друга. Оба вида деформации протекают одновременно. Преобладание того или иного вида деформации определяется соотношением прочности отдельных зерен и их границ, а также ориентацией к направлению действия внешней нагрузки при данных условиях деформации. На прочность зерен и их границ влияет химический состав, размер зерен, температура и скорость деформации. При нормальной температуре прочность границ зерен, как правило, больше прочности зерен. Поэтому при холодной обработке давлением внутрикристаллитная деформация является основным процессом, обуславливающим изменение формы деформируемой заготовки. При высоких температурах прочность зерен больше прочности их границ из-за наличия на границах более легкоплавких примесей и меньшей термодинамической устойчивости пограничных зон самого металла, вследствие чего при горячей обработке давлением преобладает межкристаллитная деформация.

Поскольку у имеющих преимущественно поликристаллическое строение металлов и сплавов зерна имеют разное ориентирование плоскостей скольжения, ПД при действии внешних сил начинается не во всех зернах одновременно. Сначала деформируются наиболее благоприятно ориентированные зерна, то есть те зерна, плоскости скольжения в которых составляют с направлением усилия 45° (рис. 1.2, а; зерна 1, 2, 3, 4). Остальные зерна могут поворачиваться в результате возникновения пар сил, и, когда их плоскости скольжения составят по направлению усилия угол 45° , они также подвергнутся деформации (рис. 2, б). В результате ПД у имеющих преимущественно поликристаллическое строение металлов и сплавов происходит изменение формы зерен: они вытягиваются в направлении наиболее интенсивного течения металла (рис. 2, в).

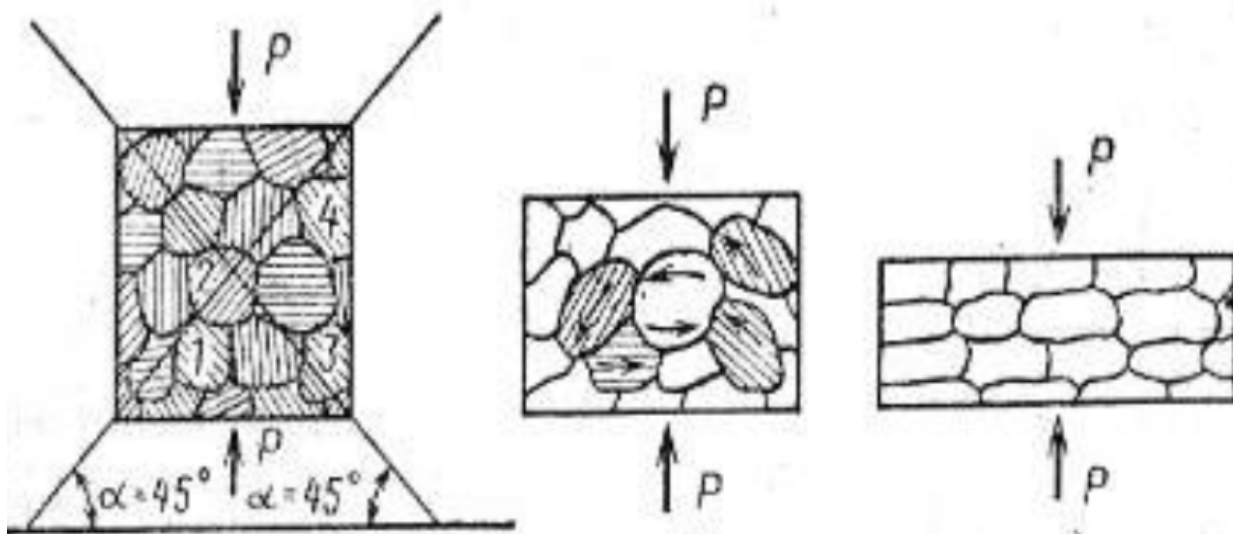


Рис.1.2. Схема последовательного развития пластической деформации поликристаллов:

а – деформация различно ориентированных зерен; б – скольжение металла в направлении деформации; в – формирование направленной структуры

Чем больше степень деформации, тем больше изменяется форма зерна. Вытянутые зерна в поликристаллах образуют волокнистую микроструктуру. Поскольку одновременно с изменением формы зерен в процессе деформации происходит и поворот плоскостей скольжения в отдельных зернах, то при значительных степенях деформации плоскости скольжения зерен металлов и сплавов, имеющих преимущественно поликристаллическое строение, стремятся соединиться с направлением течения металла. Такая ориентировка плоскостей скольжения зерен называется текстурой и вызывает у поликристаллов анизотропию свойств. В процессе обработки металлов давлением необходимо достичь напряжения, достаточного для начала пластической деформации, но ни в коем случае не превысить величину напряжения, при котором начинается разрушение. Для каждого металла и сплава напряжение пластического течения свое. Оно называется пределом текучести и обозначается σ_T или $\sigma_{0.2}$. Максимальное напряжение, которое металл выдерживает, не разрушаясь, называется пределом прочности и обозначается σ_B . Обе эти величины приводятся в справочниках. Рабочие напряжения в процессе ОМД должны быть выше предела текучести, но ниже предела прочности:

$$\sigma_T < \sigma < \sigma_B.$$

Глава 2. Основные виды обработки металлов давлением

Назначение ОМД заключается в том, чтобы изменить геометрическую форму и размеры исходной заготовки, а также придать ей определенные физико-механические свойства. В результате процесса ОМД достигается получение конечной детали или заготовки, близкой по форме к готовому продукту. В машиностроении, авиационной промышленности, автомобилестроении и других отраслях применяются различные виды ОМД (рис. 2.1).

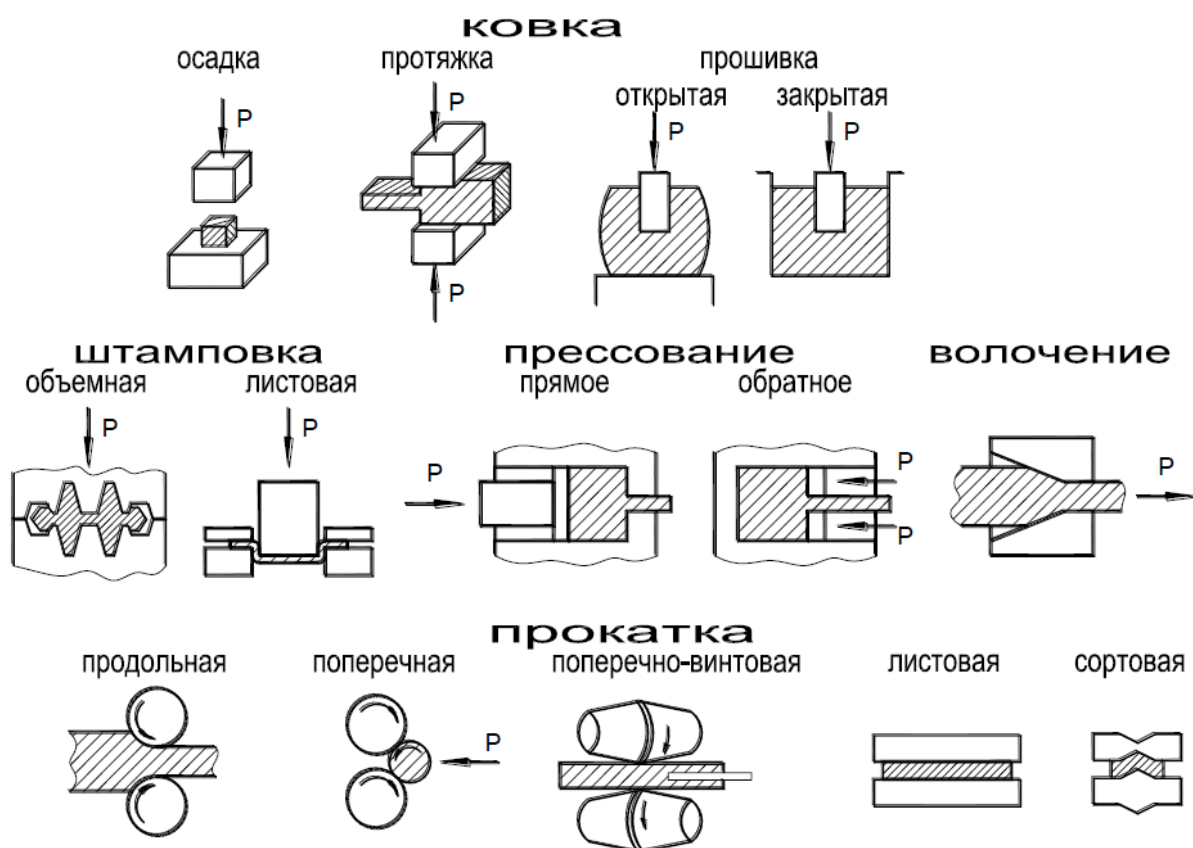


Рис. 2.1. Основные виды обработки металлов давлением.

Различают горячую и холодную ОМД: горячей называется обработка при температуре заготовки выше температуры рекристаллизации; холодная обработка материалов давлением реализуется при температуре заготовки ниже температуры рекристаллизации T_p материала деформируемой заготовки:

$T_p = 0,4 \cdot T_{пл}$ – для металлов и $T_p = (0,6 \div 0,7) \cdot T_{пл}$ – для сплавов,
где $T_{пл}$ – температуры плавления (в Кельвинах).

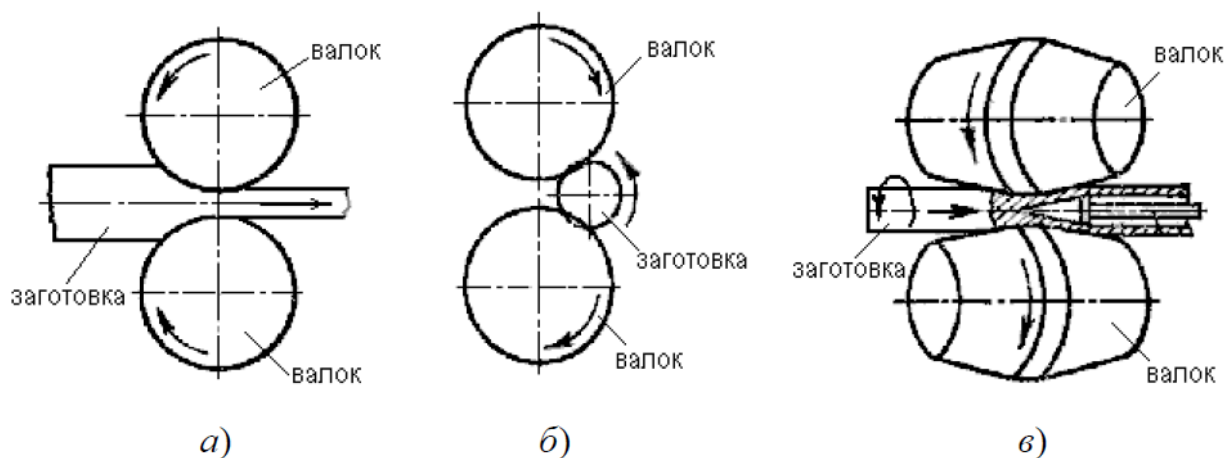


Рис. 2.2. Схемы прокатки: а – продольная; б – поперечная; в – поперечно-винтовая

2.1 Прокатка

Прокаткой называется вид пластической обработки, в процессе которого исходная заготовка обжимается вращающимися валками прокатного стана. Среди различных методов пластической обработки прокатка занимает особое положение, поскольку этим способом изготавливают продукцию, используемую в стадии изготовления в строительстве (арматура, балки, уголок), машиностроении (листовой прокат, шпунт, профили авто- и сельскохозяйственного машиностроения), судостроении (листовой прокат), транспорте (рельсы, рельсовые подкладки и др.), а также в электротехнической и пищевой промышленности. Прокаткой получают также различные виды продукции, которые являются исходным материалом для других видов обработки. Так, горячекатаная и холоднокатаная сталь, полосы и ленты используются при листовой штамповке; катаную заготовку используют при ковке в штампах; при волочении исходным материалом является катанка, полученная на проволочных прокатных станах и др. Огромное значение прокатного производства для хозяйственного комплекса страны подтверждается постоянным ростом объемов производства проката. Через валки прокатных станов проходит более 80% выплавляемой стали.

Из трех способов прокатки основным является способ продольной прокатки. Основные признаки продольной прокатки (рис. 2.2, *a*):

- прокатку осуществляют между двумя приводными валками, вращающимися навстречу друг другу. Иногда к двум горизонтальным добавляют два вертикальных, оси которых расположены в одной вертикальной плоскости;

- движение заготовки поступательное, ее ось перпендикулярна осям валков

- длина раската (обычно в метрах) многократно превышает размеры поперечного сечения (обычно в миллиметрах).

При вращении валков заготовка за счет сил трения втягивается в зазор между валками, где осуществляется обжатие (уменьшение толщины заготовки) и происходит увеличение ее длины и ширины.

Способом продольной прокатки получают листы, полосы, сортовые профили, бесшовные трубы и катанку, постоянного и переменного (периодического) сечения (рис. 2.3). Именно этим способом производят основную массу прокатной продукции из черных и цветных металлов.

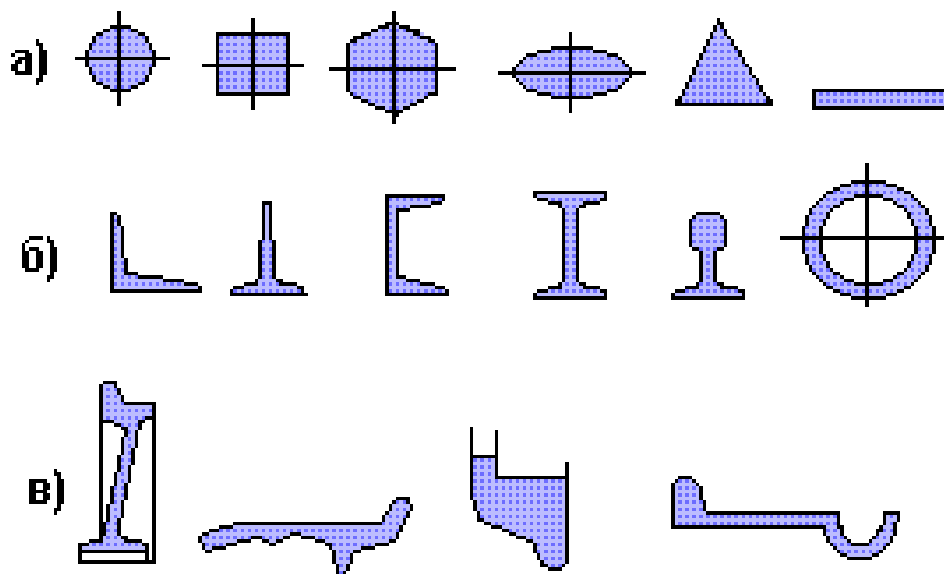


Рис. 2.3. Виды проката: *а* – прокат общего назначения; *б* – фасонный общего назначения; *в* – отраслевого назначения

Для прокатки листов и полос применяют валки с гладкой поверхностью (рис. 2.4), а для получения сортовых профилей (балок, швеллеров, рельсов и др.) в теле калиброванного валка (рис. 2.5) выполняют проточки (ручьи), которые создают необходимую форму поперечного сечения прокатываемой заготовки. Процесс прокатки осуществляют в горячем и холодном состояниях, применяют в основном в металлургии, реже в машиностроении и металлообработке.

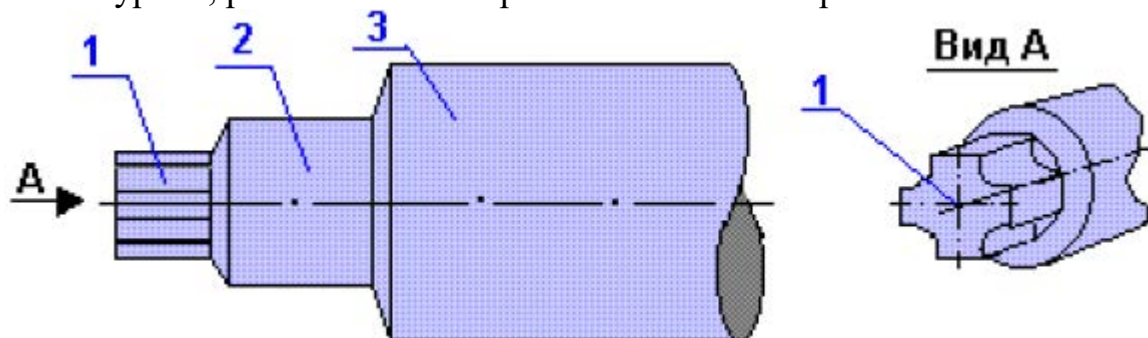


Рис. 2.4. Прокатные валки для листового и полосового материала
1 – хвостовик; 2 – шейка; 3 – бочка

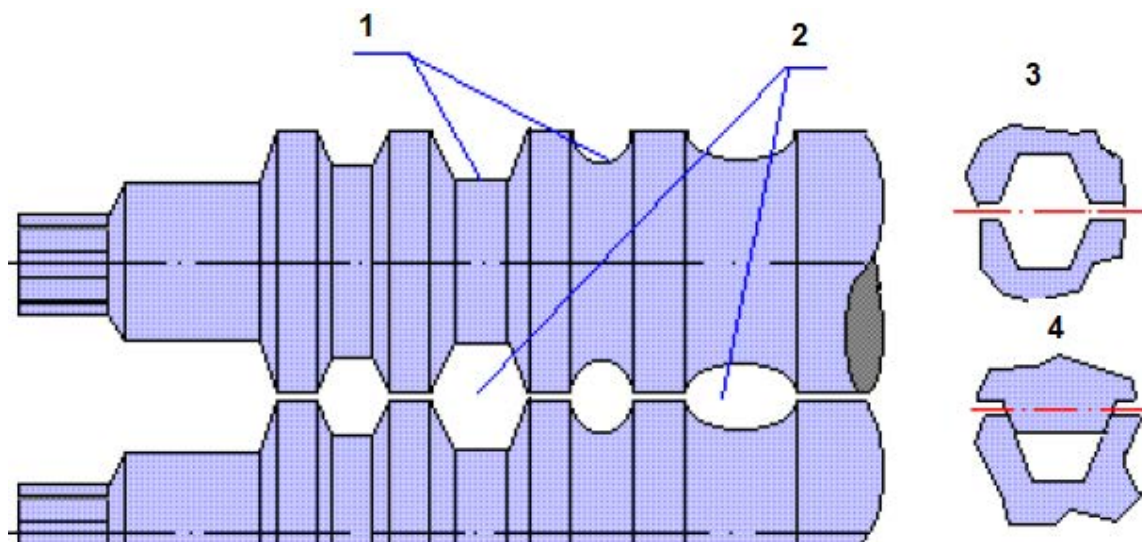


Рис. 2.5. Ручьевые (калиброванные) валки.

1 – ручьи; 2 – калибры; 3 – калибр открытого типа; 4 – калибр закрытого типа

Поперечная прокатка имеет следующие основные признаки (рис. 2.2,б):

- прокатку осуществляют между двумя приводными валками, вращающимися в одном и том же направлении;
- движение заготовки вращательно-поступательное, ее ось параллельна осям валков;
- размеры поперечного сечения изделий соизмеримы или меньше длины.

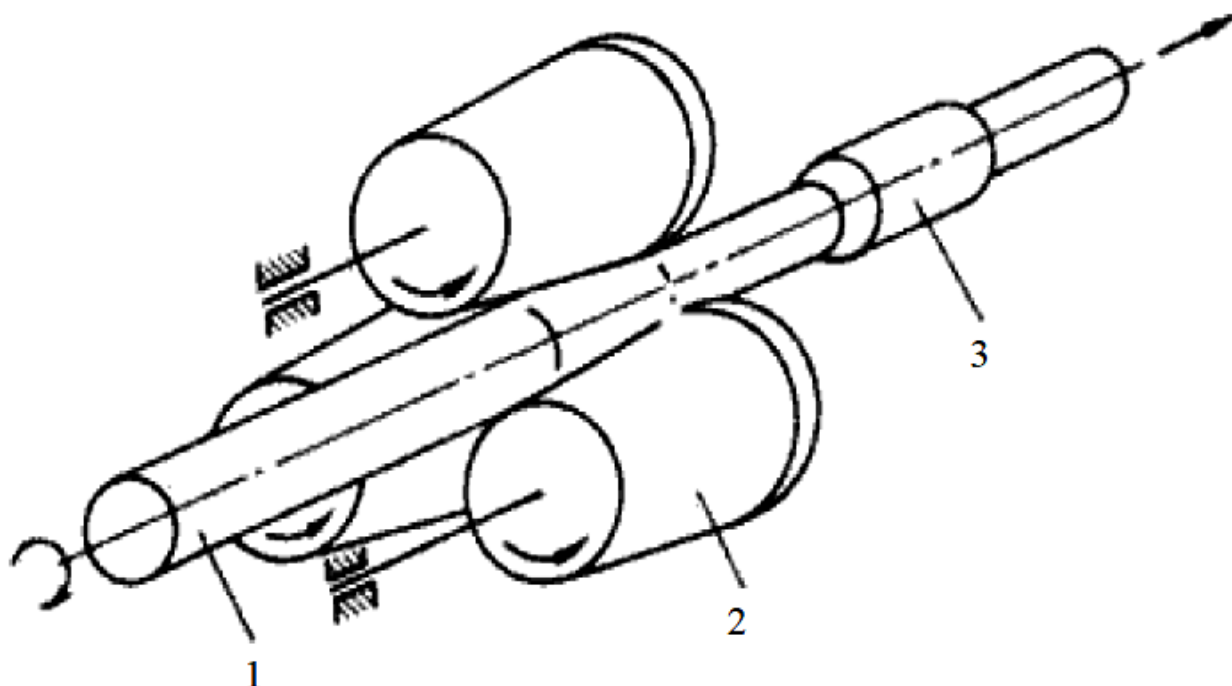


Рис. 2.6. Трехвалковый стан для поперечной прокатки периодических профилей [3; 4]:

1 – заготовка, 2 – валок, 3 – прокатанный периодический профиль;

В процессе прокатки заготовку задают в валки в осевом направлении. При контакте с валками заготовка приобретает вращательное движение и удерживается в валках с помощью специального устройства. Способом поперечной прокатки получают тела вращения, в основном специального назначения – шары, шестерни, оси, валы и т.п., которые, по сути, являются готовыми деталями. Поэтому такие станы именуются еще деталепрокатными.

Поперечная прокатка периодических профилей существенно отличается от продольной тем, что заготовка и готовый профиль представляют собой тела вращения. Наиболее перспективным станом поперечной прокатки является трехвалковый (рис. 2.6). Прокаткой на этих станах можно получать профили различной конфигурации, причем переход с одного профиля на другой осуществляется быстро. Станы поперечной прокатки периодических профилей классифицируют по диаметру выпускаемых изделий.

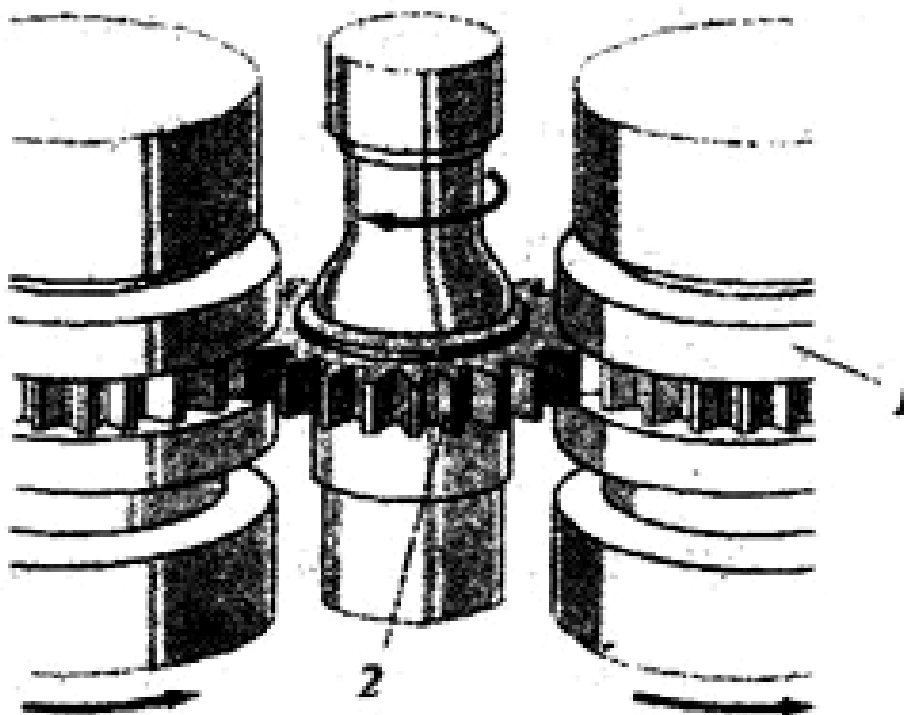


Рис. 2.7. Схема поперечной прокатки зубьев шестерен с радиальной подачей.

Поперечной прокаткой накатывают зубы шестеренок между двумя вращающимися валками. При этом возможны два способа обработки зубов: с осевой подачей заготовки и с радиальной подачей валков. Образование зубов в процессе обработки давлением с осевой подачей заготовок осуществляется перемещением нагретой в кольцевом индукторе заготовки между двумя вращающимися зубчатыми валками

При втором способе прокатки зубов – с радиальной подачей валков – нагретую до температуры обработки давлением штампованную цилиндрическую заготовку 2 помещают между двумя вращающимися зубчатыми валками 1 (рис. 2.7). Заготовке передается принудительное вращение с определенной скоростью, которая соответствует передаточному числу между валками и прокатываемой шестерней, а затем валки сближают. При этом их зубы углубляются в заготовку и образуют впадину в шестерни. Вытесненный зубом валка металл течет в головку зуба шестерни. Полученные на заготовке зубы, обкатываясь в зацеплении с зубьями валков, получают эвольвентный профиль.

Основным **отличием поперечно-винтовой (косой) прокатки** (см. рис. 2.2, в) от поперечной прокатки является то, что поперечно-винтовая (косая) прокатка с косо расположенными валками придаёт металлу деформируемой заготовки помимо вращательного дополнительное поступательное движение в направлении его оси (из-за перекоса валков).

Поперечно-винтовая (косая) прокатка широко применяется при производстве бесшовных труб из сплошной заготовки. Метод поперечно-винтовой прокатки применяют также для производства шаров, используемых преимущественно в качестве мелющих тел для шаровых мельниц в горно-рудной, угольной и других отраслях промышленности, а также в качестве заготовок шаров для подшипников качения и шаровых заготовок для различных машиностроительных деталей.

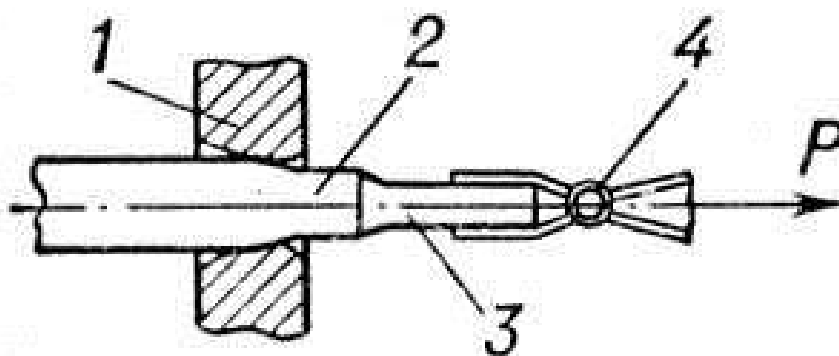


Рис. 2.8. Схема процесса волочения:
1 – волока; 2 – заготовка (получаемый профиль); 3 – заострённый конец заготовки; 4 – захват

2.2 Волочение

Волочение – способ ОМД, при котором заготовка, полученная прокаткой или прессованием, для уменьшения размеров сечения протягивается через отверстие – канал волоки (фильеры) с плавно уменьшающимся сечением (рис. 2.8).

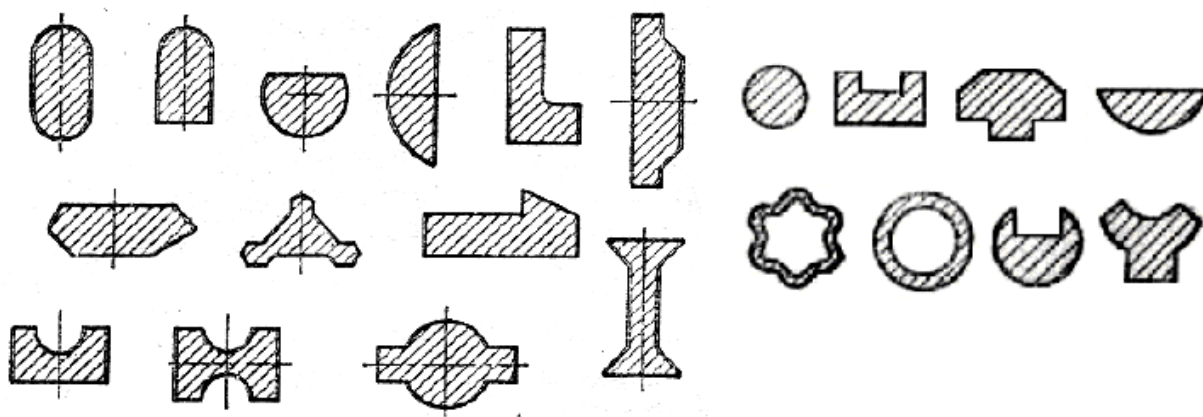


Рис. 2.9. Профили полученные волочением.

Волочением получают проволоку диаметром 0,002–4 мм, прутки и профили фасонного сечения, тонкостенные трубы, в том числе и капиллярные (рис. 2.9).

Основной инструмент при волочении – волокни, работающие в сложных условиях: большое напряжение сочетается с износом при протягивании, поэтому их изготавливают из твердых сплавов. Для получения особо точных профилей волокни изготавливают из алмаза.

Продольный разрез профиля наиболее часто применяемой конической волокни (рис. 2.9) состоит из смазочной зоны I, деформирующей или рабочей зоны II конической формы с углом при вершине α ($\alpha = 6\text{--}18^\circ$ – для прутков, $10\text{--}24^\circ$ – для труб), калибрующего пояска III, имеющего цилиндрическую форму и выходной зоны IV в форме конуса с углом γ или чаще сферической формы.

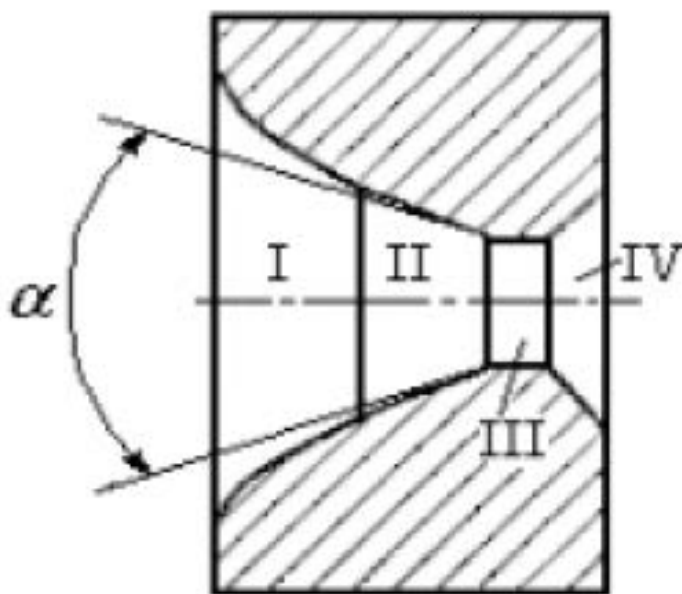


Рис. 2.10. Продольный разрез монолитной конической волокни (фильеры).

Волочение применяют также для калибровки сечения и повышения качества поверхности обрабатываемых изделий, что является одним из отличительных признаков среди различных видов ОМД. Изготовление изделий волочением позволяет получать очень высокую точность и чистоту поверхности изделий, которую нельзя получить при прокатке.

Волочение осуществляют главным образом в холодном состоянии при комнатной температуре и очень редко в горячем. Пластическая деформация при волочении сопровождается наклепом, что используется для повышения механических характеристик металла получаемых волочением изделий – предел прочности, например, возрастает в 1,5–2 раза. Волочением обрабатывают стали различного химического состава, цветные металлы и сплавы, в том числе и драгоценные. Исходным материалом может быть горячекатаный прут, сортовой прокат, проволока, трубы.

2.3 Прессование

Прессование – вид обработки давлением, при котором металл выдавливается из замкнутой полости через отверстие в матрице, соответствующее сечению прессуемого профиля. Это современный способ получения различных профильных заготовок: прутков диаметром 3–250 мм, труб диаметром 20–400 мм с толщиной стенки 1,5–15 мм, профилей сложного сечения сплошных и полых с площадью поперечного сечения до 500 см² (рис. 13). Прессование называют также экструдированием.

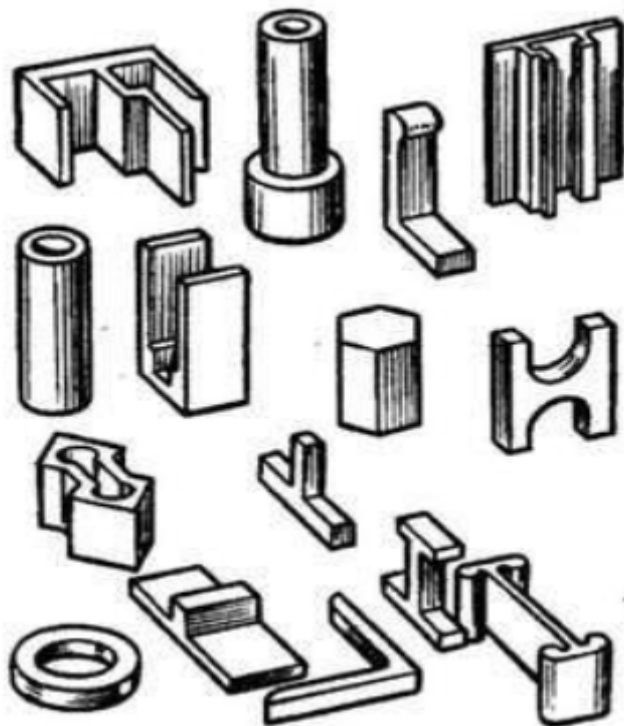


Рис. 2.11. Профили изделий полученные прессованием.

В настоящее время в качестве исходной заготовки используют слитки или горячекатаный прокат (пруток) из углеродистых и легированных сталей, а также из цветных металлов и сплавов на их основе.

Технологический процесс прессования включает операции: подготовка заготовки к прессованию (разрезка, предварительное обтачивание и даже шлифование, так как качество поверхности заготовки оказывает влияние на качество и точность профиля); нагрев заготовки с последующей очисткой от окалины; укладка заготовки в контейнер; непосредственно процесс прессования; отделка изделия (отделение пресс-остатка, разрезка). Нагрев заготовок ведется в индукционных установках или в печах-ваннах в расплавах солей. Цветные металлы прессуются без нагрева.

Прессование производится на гидравлических прессах с вертикальным или горизонтальным расположением плунжера, мощностью до 10 000 т.

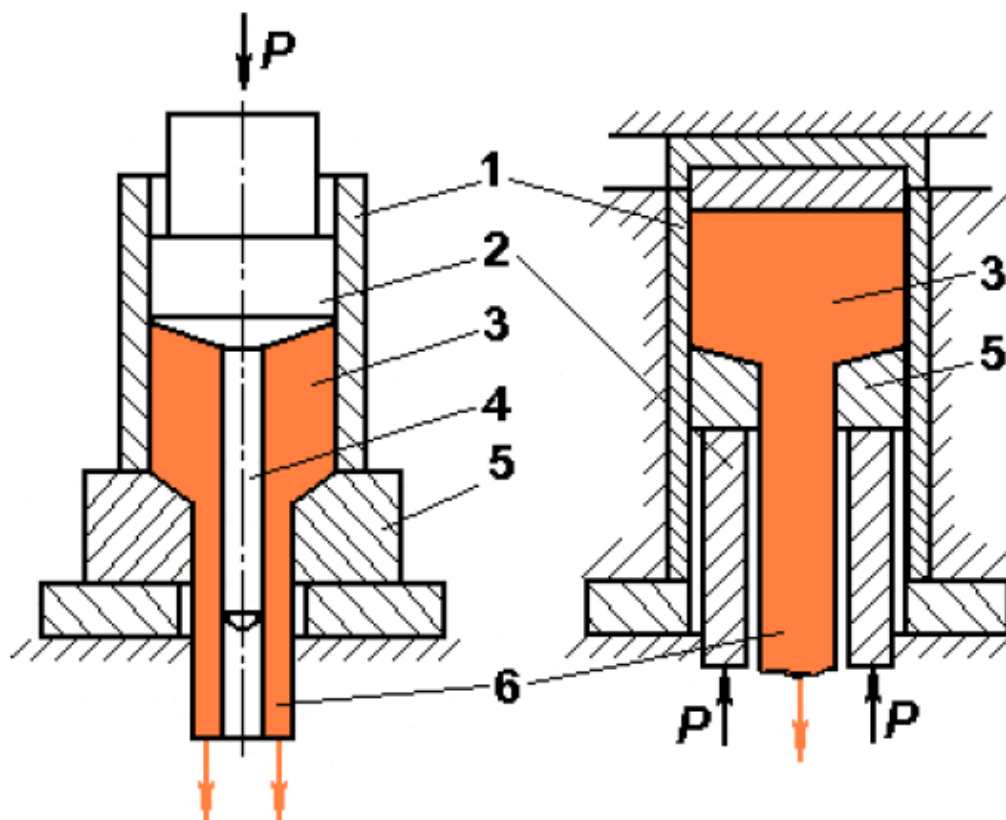


Рис. 2.11. Прессование прямое (а) и обратное (б) [2]:
1 – контейнер; 2 – пуансон; 3 – заготовка; 4 – игла; 5 – матрица; 6 – профиль

Применяются два метода прессования: прямой и обратный. При прямом прессовании (рис. 2.11, а) металл выдавливается в направлении движения пуансона. При обратном прессовании (рис. 2.11, б) металл движется из контейнера навстречу движению пуансона.

К основным преимуществам прессования относятся:

- возможность обработки металлов, которые из-за низкой пластичности другими методами обработать невозможно;
- возможность получения практически любого профиля поперечного сечения;
- получение широкого сортамента изделий на одном и том же прессовом оборудовании с заменой только матрицы;
- высокая производительность, до 2–3 м/мин.

Недостатки прессования:

- повышенный расход металла на единицу изделия из-за потерь в виде пресс-остатка: при прямом методе 12–15%, при обратном 5–6% от веса слитка, получающийся вследствие того, что полностью выдавить из контейнера заложенный в него металл невозможно, особенно при прессовании труб большого диаметра;
- появление в некоторых случаях заметной неравномерности механических
 - свойств по длине и поперечному сечению изделия;
 - высокая стоимость и низкая стойкость прессового инструмента;
 - высокая энергоемкость.

Прессованием можно получать сплошные и полые профили. Так при прессовании труб прямым методом (рис. 2.13) нагретый слиток посылается в полость контейнера 3 прессшайбой 2 шплинтонa 1, слегка обжимается в ней, а затем прошивается насквозь стальной иглой 4 (рис. 2.13, а). Игла связана штоком 8 с плунжером гидравлического прошивного цилиндра, расположенного по оси пресса позади главного цилиндра, управляющего рабочим ходом прессшайбы. Передний конец иглы проходит сквозь слиток, выдвигается на некоторое расстояние из отверстия матрицы 5 и останавливается. Затем включается главный цилиндр пресса, начинает свое движение прессшайба со шплинтоном, и происходит выдавливание металла 7 через кольцевой зазор, образованный стенками отверстия матрицы и наружной поверхностью иглы (рис. 2.13, б). Наружный диаметр получаемой трубы 6 соответствует таким образом диаметру отверстия матрицы, а внутренний – диаметру иглы. Величина отхода металла (выдры) при прошивке является значительной и достигает при таком способе прессования труб от 20% до 40% от массы слитка.

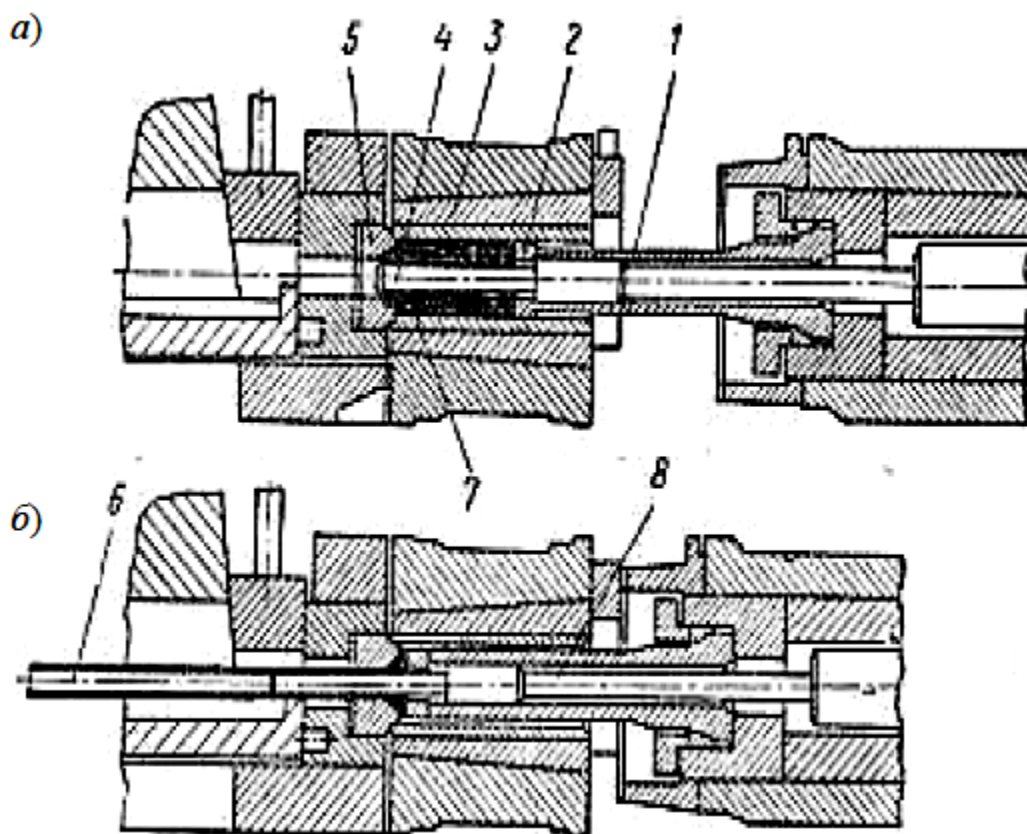


Рис. 2.13. Схемы прессования трубы: осадка и прошивка слитка (а) и выдавливание трубы (б).

2.4 Ковка

Процесс ковки – один из древнейших видов ОМД. Ковка возникла еще в бронзовом веке, когда вручную получали сначала изделия из меди, а затем из самородного метеоритного железа. С развитием металлургии бронзы и железа ковка получила очень широкое распространение. В настоящее время область применения ковки сокращается, но в ряде случаев ковка по-прежнему остается наиболее экономичным способом получения деформированных заготовок, т.е. поковок.

Применение ковки для получения заготовок объясняется рядом ее преимуществ по сравнению с другими видами обработки:

1) возможностью изготовления крупногабаритных поковок массой несколько сотен тонн, получение которых другими способами невозможно; использованием сравнительно маломощного оборудования при обработке таких поковок, так как обработка ведется деформированием отдельных участков заготовки;

2) возможностью получатьковки широкого ассортимента благодаря применению универсального оборудования и универсальной оснастки;

3) значительным улучшением качества металла, повышением его механических свойств, особенно пластичности и ударной вязкости.

Основные недостаткиковки следующие:

- 1) низкая производительность, значительная трудоемкость изготовления поковок, особенно на прессах;
- 2) большие напуски, припуски и допускаемые отклонения размеров поковки, что приводит к увеличению объема механической обработки и расхода металла.

При ковке формоизменение заготовки происходит вследствие течения металла в стороны, перпендикулярные к движению деформирующего инструмента – бойков, различной конфигурации – плоских, вырезных (рис. 2.14), а также их комбинаций – верхний боёк плоский, нижний вырезной, и верхний и нижний бойки вырезные.

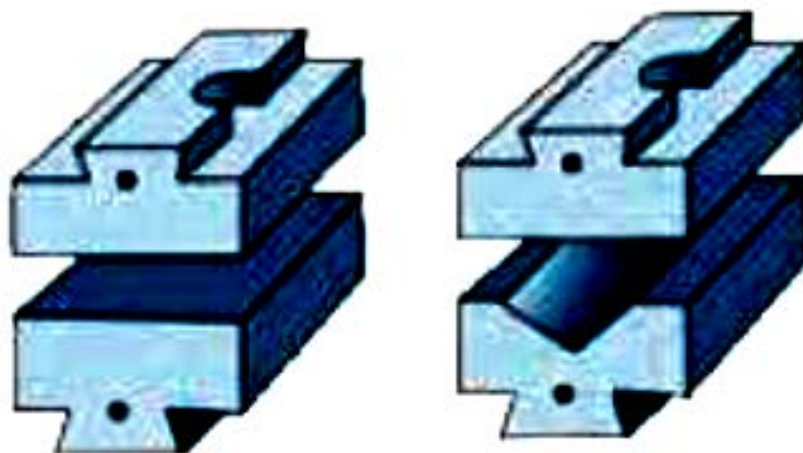


Рис. 2.14. Применяемые при ковке бойки

Свободную ковку осуществляют между двумя бойками, один из которых (нижний) неподвижный, второй (верхний) совершает возвратно-поступательные движения вверх-вниз. При ходе вниз осуществляется пластическая деформация заготовки (рабочий ход), при ходе вверх (холостой ход) заготовку продвигают на ширину бойка. При этом, если необходимо обжимать заготовку по высоте и ширине, ее поочередно кантуют на 90° , в остальных случаях на угол кантовки, отличающийся от 90° .

К основным операциямковки относятся осадка, протяжка и прошивка.

Осадка (рис. 2.15) – одна из наиболее распространенных операцийковки, при которой высота заготовки уменьшается, а площадь поперечного сечения увеличивается. Поковки дисков, зубчатых колес и подобных им деталей изготавливают только осадкой.

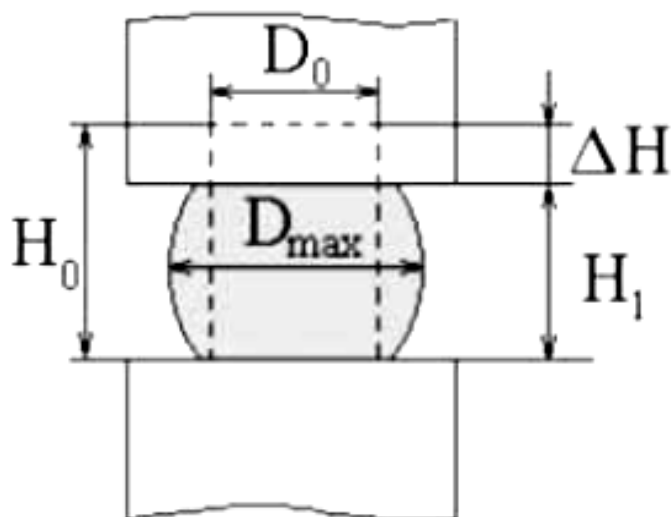


Рис. 2.15 Схема операции осадки.

Протяжка – операция удлинения заготовки или ее части за счет уменьшения площади поперечного сечения (рис. 2.16). Протяжкой получают поковки с удлиненной осью – валы, рычаги, тяги и т.п. Протяжка плоскими бойками может видоизменяться за счет варьирования формы инструмента и назначения поковки. Так, разновидностями протяжки являются протяжка вырезными (рис. 2.17, а), комбинированными (рис. 2.17, б) бойками, раскатка на оправке (рис. 2.17, в), при которой увеличивают внутренний и внешний диаметр заготовки за счет уменьшения толщины ее стенки, и протяжка на оправке (рис. 2.17, г), применяемая для увеличения длины толстостенных заготовок за счет уменьшения толщины ее стенок.

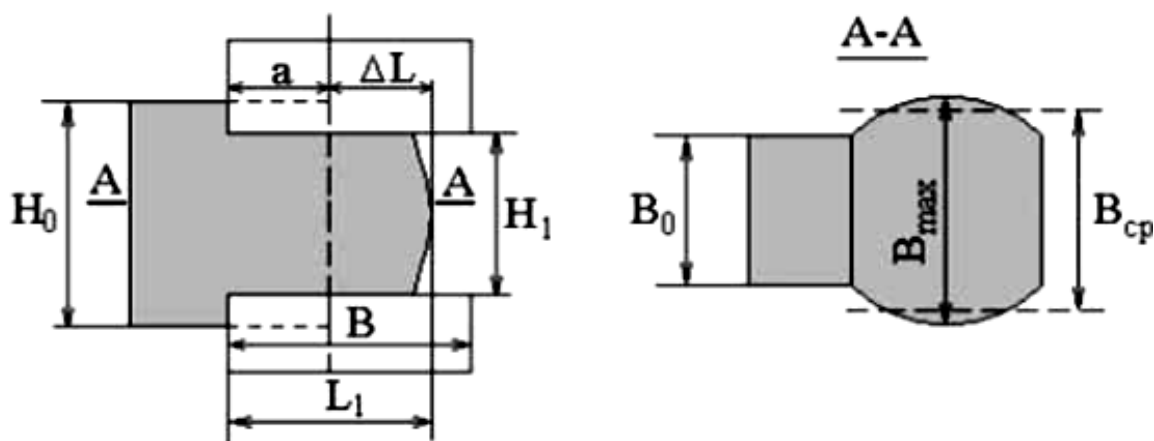


Рис. 2.16. Схема операции протяжки

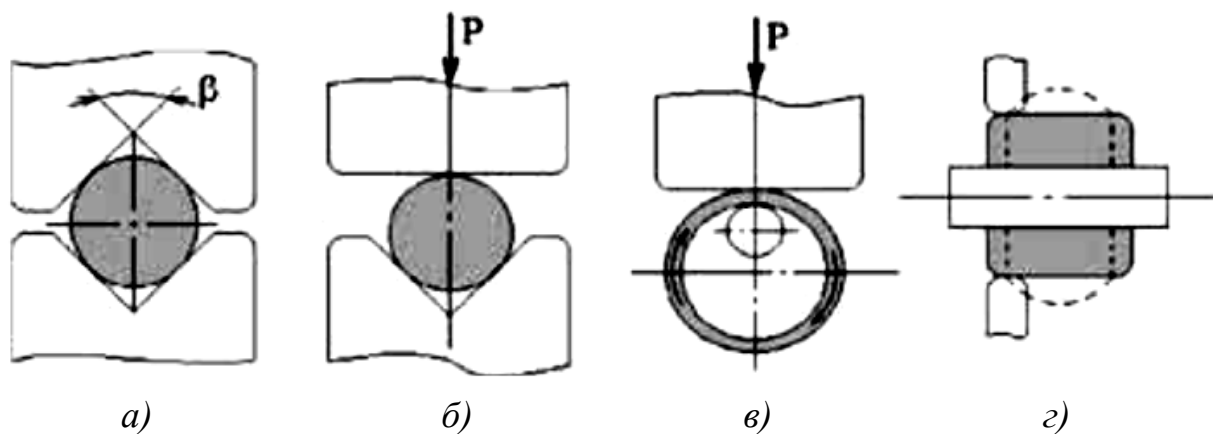


Рис. 2.17. Разновидности операции протяжки

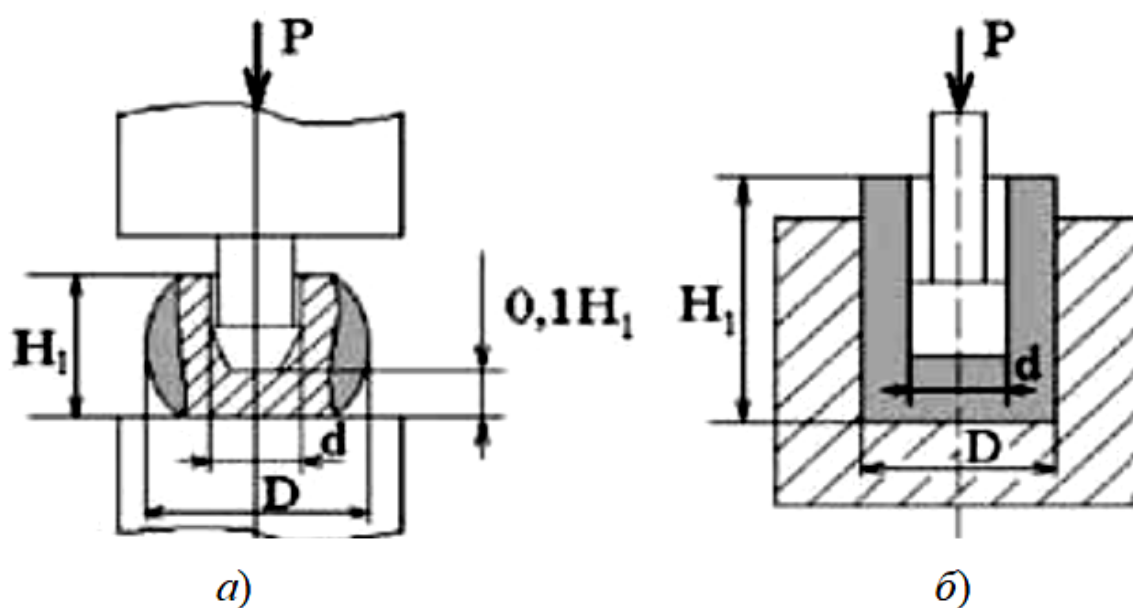


Рис. 2.18. Разновидности операций прошивки

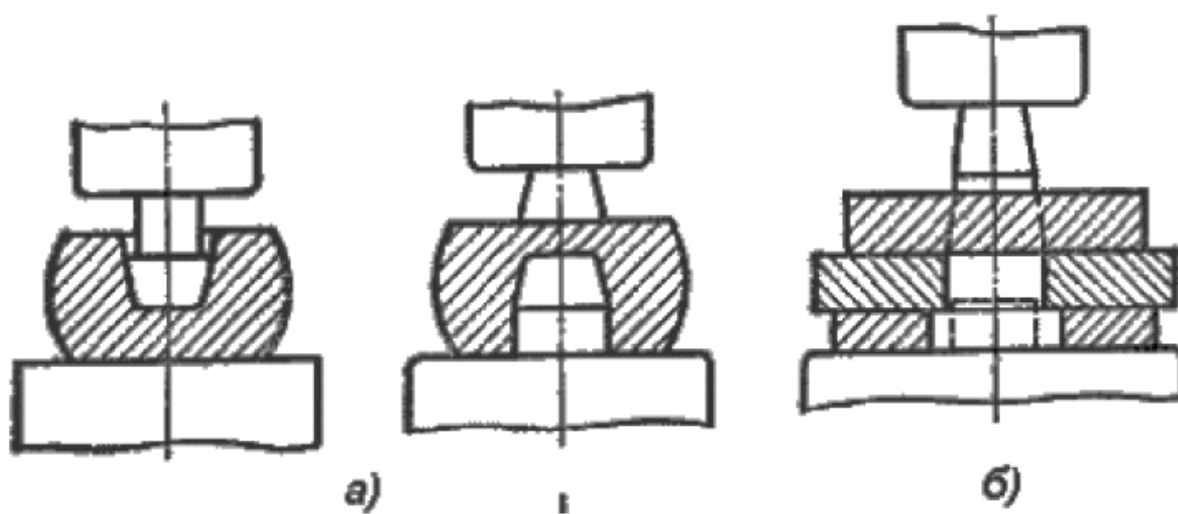


Рис. 2.19 Схемы прошивки

а – двухсторонняя, б – односторонняя с подкладным кольцом

Прошивка – операция получения полостей в заготовке за счет вытеснения металла. При использовании операции прошивки получают поковки с отверстием, форма заготовки искажается и образуется отход – выдра. Как разновидности рассматривают открытую (рис. 2.18, а) и закрытую (рис. 2.18, б) прошивку. Инструментом для прошивки являются *прошивни* – сплошные и пустотелые круглого или фасонного поперечного сечения. Пустотелые прошивни используются при прошивке отверстий большого диаметра (400–900 мм). Высокие массивные поковки прошивают в два перехода: образуют сначала глухую полость и, перевернув поковку, прошивают дно (рис. 2.19, а). При сквозной прошивке тонких поковок применяют *подкладные кольца* (рис. 2.19, б).

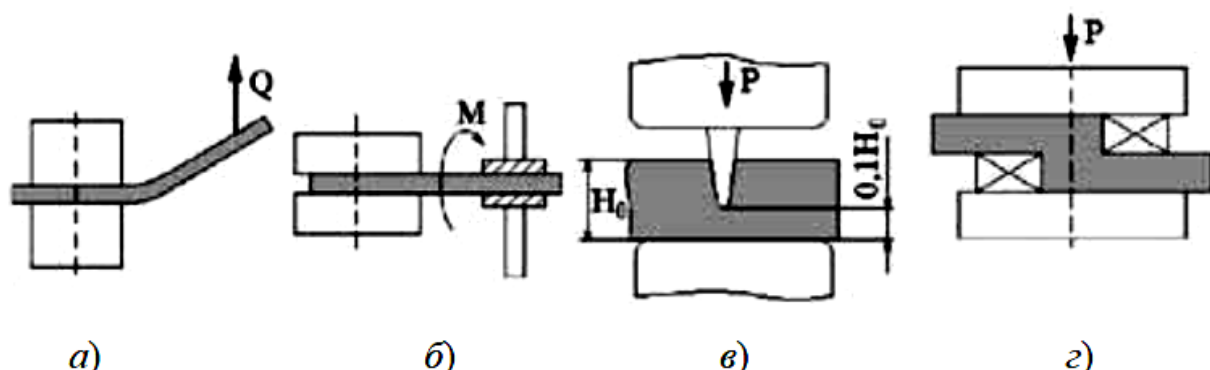


Рис. 2.20. Кузнечные операции
а – гибка; б – скручивание; в – рубка; г – передача

Получение поковок разнообразной формы и размеров требует применения и других операцийковки (рис. 2.20). Такими являются кузнечная гибка (рис. 2.20, а), скручивание (рис. 2.20, б), рубка (рис. 2.20, в), передача (рис. 2.20, г). К отделочным операциямковки относят обрезку, правку, проглаживание и др.

2.4 Штамповка

Штамповкой называется вид ОМД с использованием специального инструмента штампа.

Процессы штамповки подразделяются на:

- горячую и холодную объёмную штамповку в открытых и закрытых штампах, выдавливанием;
- листовую штамповку (толстолистовую и тонколистовую).

Под **объёмной штамповкой** понимают процесс, при котором металл заготовки деформируется с изменением всех размеров заготовки, принимая форму рабочей поверхности специального инструмента – штампа. При этом форма и размеры рабочей полости (ручья) штампа полностью определяют конфигурацию изготавливаемой поковки. Штампы

по конструкции могут быть одноручьевыми – для деталей простой формы, и многоручьевыми – для сложных.

Горячая штамповка по сравнению с ковкой обладает рядом преимуществ. Прежде всего, значительно более высокая производительность, в десятки раз превышающая производительность свободнойковки; высокая точность и качество поверхности штампуемых поковок. При этом резко сокращается дальнейшая чистовая обработка резанием. Применение горячей штамповки взаменковки обеспечивает массовый выпуск дешевой продукции благодаря значительному снижению расхода металла на поковки и трудоемкости их дальнейшей обработки.

Штамповкой получают детали исключительно сложной формы. Однако необходимо учитывать, что штамп годен только для изготовления той поковки, для которой он спроектирован, в отличие от универсального инструмента свободнойковки. Поэтому применение штамповки экономически выгодно лишь при серийном или массовом производстве. Горячую объемную штамповку применяют в машиностроении и других отраслях промышленности для изготовления сложных по форме заготовок ответственных деталей машин из стали, цветных металлов и их сплавов.

Горячей штамповкой изготавливают очень много разнообразных деталей. Наиболее распространенные из них: коленчатые валы, шатуны, рычаги, шестерни, вилки, цапфы, валики, ключи и другие детали и инструменты сложной формы.

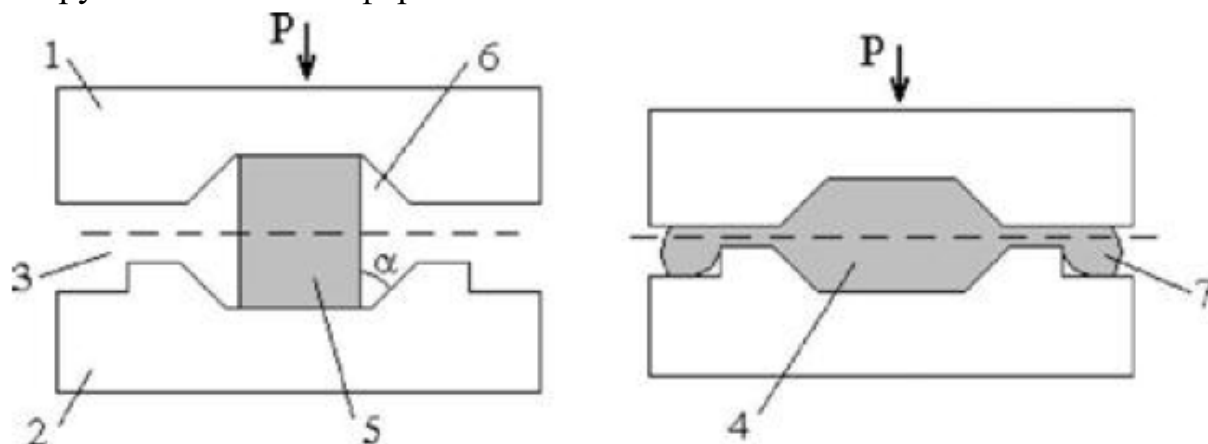


Рис. 2.21. Схема штамповки в открытых штампах.

Применяют два основных метода штамповки: в открытых штампах, с образованием облоя, и в закрытых штампах – безоблойную. Штампы – это массивные толстостенные детали (рис. 2.21), в которых выполнены рабочие полости – гравюры, формообразующие поковку. Штамп состоит минимум из двух частей – половин. Поверхность совпадения частей штампа называют поверхностью разъема. Штамп, состоящий из нескольких частей, каждая из которых имеет часть общей гравюры, называют многоразъемным.

Верхняя половина штампа 1 перемещается под действием силы P и давит на торцевые поверхности заготовки 5, которая деформируется в ручьях 6 штампа, образованного верхней 1 и нижней 2 половинами, и, заполняя его, вытекает в заусенечную канавку 3. Сформированная таким образом поковка 4 имеет по периметру заусенец-облой 7. Для извлечения поковки из штампа служат штамповочные угловые уклоны α , величина которых составляет 5–10°.

Штамповка в закрытых штампах. Закрытые штампы от открытых отличаются тем, что гравюра выполняется в одной из половин штампа, а вторая половина входит в первую, запирая ее. В таком штампе весь объем металла заготовки остается в поковке. Выход для облоя не предусмотрен. Так как при закрытой штамповке не предусматривается заусенец, штамп и штамповку называют безоблойной (рис. 2.22).

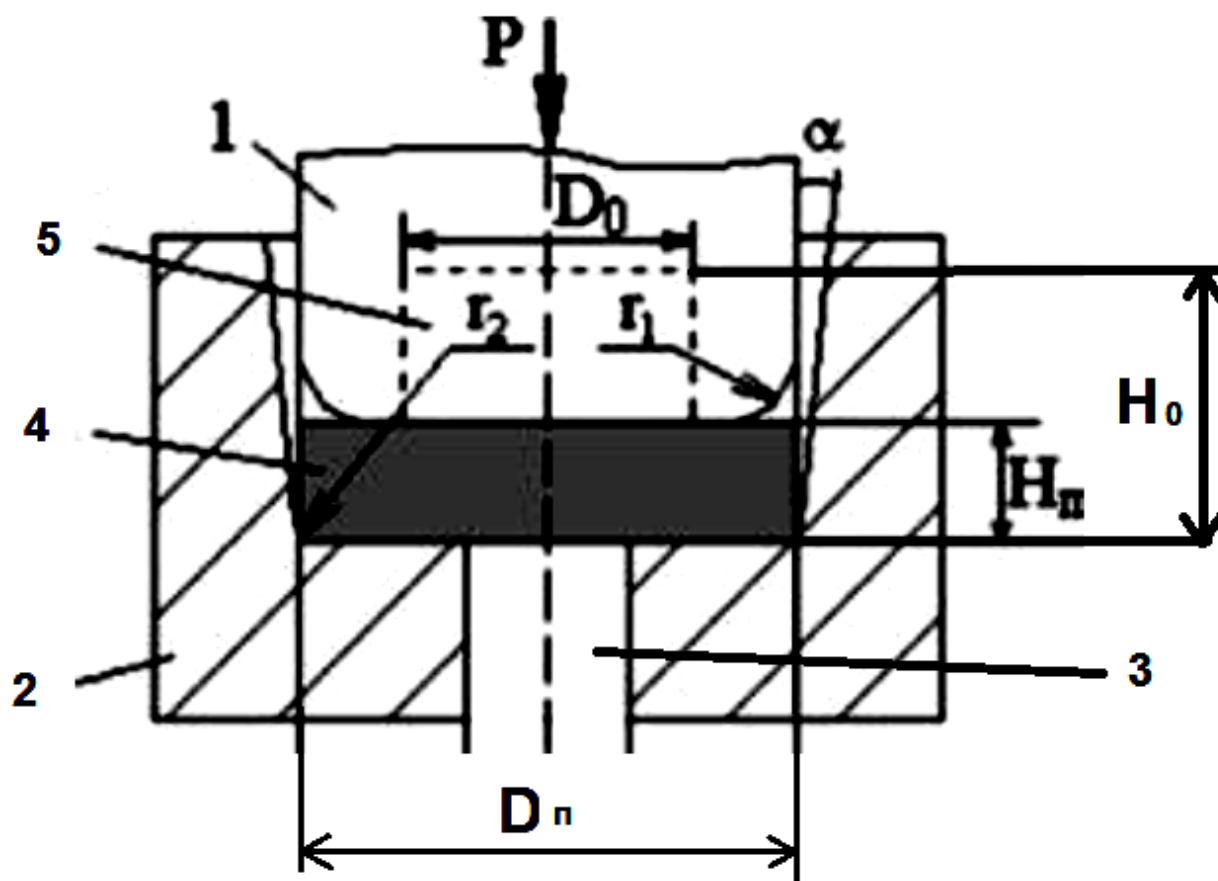


Рис. 2.22. Схема штамповки в закрытых штампах.

Штамповку в закрытых штампах (безоблойную штамповку) применяют для получения поволок несложной формы с небольшой разницей в размерах сечений. Заготовка 5 диаметром D_0 и высотой H_0 (рис.2.22) помещается в штамп, основными частями которого являются пуансон 1, матрица 2 и выталкиватель 3. При перемещении пуансона происходит последовательное осаживание заготовки и заполнение полости

штампа с образованием поковки заданных размеров и формы. При этом инструмент не обеспечивает свободного удаления цилиндрической поковки 4 из ручья штампа. Для удаления поковки из полости штампа применяют штамповочные уклоны α и выталкиватель 3.

Листовая штамповка. Листовая штамповка – это один из видов холодной обработки металлов давлением, при котором листовой материал деформируется в холодном или подогретом состоянии. Основным признаком листовой штамповки – неизменность толщины заготовки в ходе обработки. В качестве заготовки используют лист, ленту, полосу, фасонный профиль и т.д.

Листовой штамповкой изготавливают: мелкие детали приборов, детали средних размеров, различные заглушки, крышки, кронштейны, диски; крупные облицовочные детали автомобилей, автобусов, тракторов – кузова, двери, крылья, крыши и т.д. Сваривая листовые штампованные детали, создают сложные и ответственные части машин, например, сложные штамповсварные кузова автомобилей.

Основные преимущества листовой штамповки:

- возможность изготовления прочных, легких и жестких тонкостенных деталей или изделий простой и сложной формы, получить которые другими способами невозможно или затруднительно;
- высокая производительность и экономное расходование металла;
- широкие возможности автоматизации и роботизации производственных процессов;
- взаимозаменяемость деталей и высокая чистота поверхности.

В сравнении с горячей штамповкой холодная листовая штамповка имеет следующие преимущества: нет операции нагрева металла, поверхностный слой металла не окисляется, изделия получаются более точными по размерам и с меньшей шероховатостью поверхности.

По сравнению с обработкой резанием холодная штамповка позволяет сократить расход материала, так как материал не отделяется в стружку, снизить трудоемкость изготовления деталей и повысить производительность труда. Одновременно холодная обработка давлением обеспечивает упрочнение обрабатываемого материала, что позволяет делать детали более легкими. Эти же преимущества позволяют заменять литые детали штампованными. Кроме того, преимущество холодной штамповки по сравнению с литьем заключается в том, что холодноштампованные изделия почти не требуют механической обработки.

Различают толсто- и тонколистовую штамповку, причем к тонколистовой относят штамповку заготовок толщиной менее 4 мм. Тонколистовую штамповку, как правило, ведут в холодном состоянии, а при толщине листа более 10 мм применяют только горячую штамповку. Необходимо отметить, что штамповкой получают также изделия из

листовых неметаллических материалов. Процесс листовой штамповки отличается высокой производительностью (до 40 000 деталей в смену с одного штампа), легко поддается механизации и автоматизации, обеспечивает высокую точность размеров и хорошее качество поверхностей отштампованных деталей.

Операции листовой штамповки подразделяют на: разделительные, когда одна часть металла отделяется от другой; формоизменяющие, при изменяется форма заготовок; комбинированные (сочетаются разделительные и формоизменяющие переходы обработки); штамповсборочные, при которых механически соединяют отдельные листовые штампованные детали.

Технологические процессы листовой штамповки могут быть рациональными лишь при условии создания технологичной конструкции или формы детали, допускающей наиболее простое и экономичное изготовление. Поэтому технологичность листоштампованных деталей является наиболее важной предпосылкой прогрессивности технологических процессов и экономичности производства.

В мелкосерийном производстве на себестоимость продукции большое влияние оказывает стоимость штампа, отчего экономически целесообразно применять штамповку в универсальных штампах со сменными пуансонами и матрицами. В этом случае технологический процесс расчленяют на ряд отдельных простых операций. Для оснащения штампов изготавливают только относительно простые пуансоны и матрицы, что позволяет осуществлять штамповку с малыми затратами на оснастку.

К разделительным операциям листовой штамповки относятся: отрезка, разрезка, обрезка, надрезка, вырубка, пробивка, проколка, зачистка.

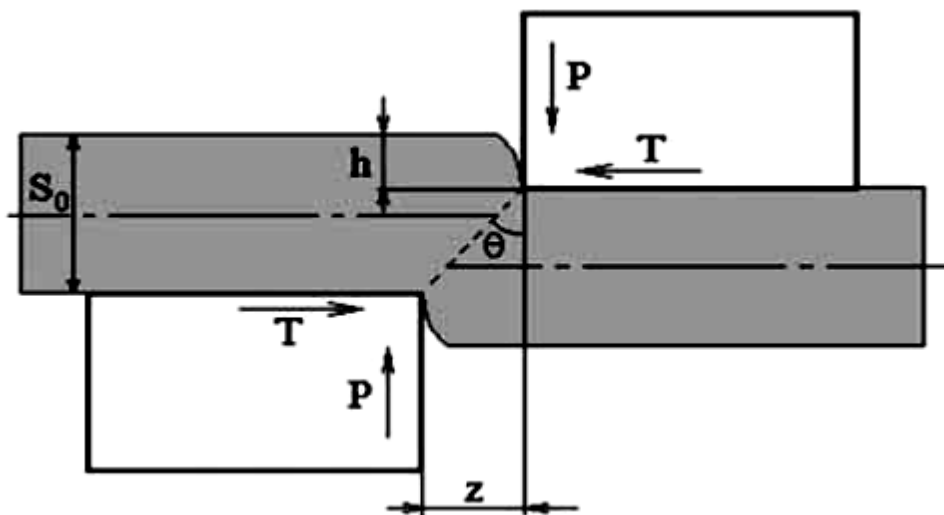


Рис. 2.23. Схема резки листового металла на ножницах

В процессе резки (рис. 2.23) заготовка (лист, полоса), толщиной S_0 , подвергается воздействию верхнего и нижнего ножей, при этом на заготовку действует сила P .

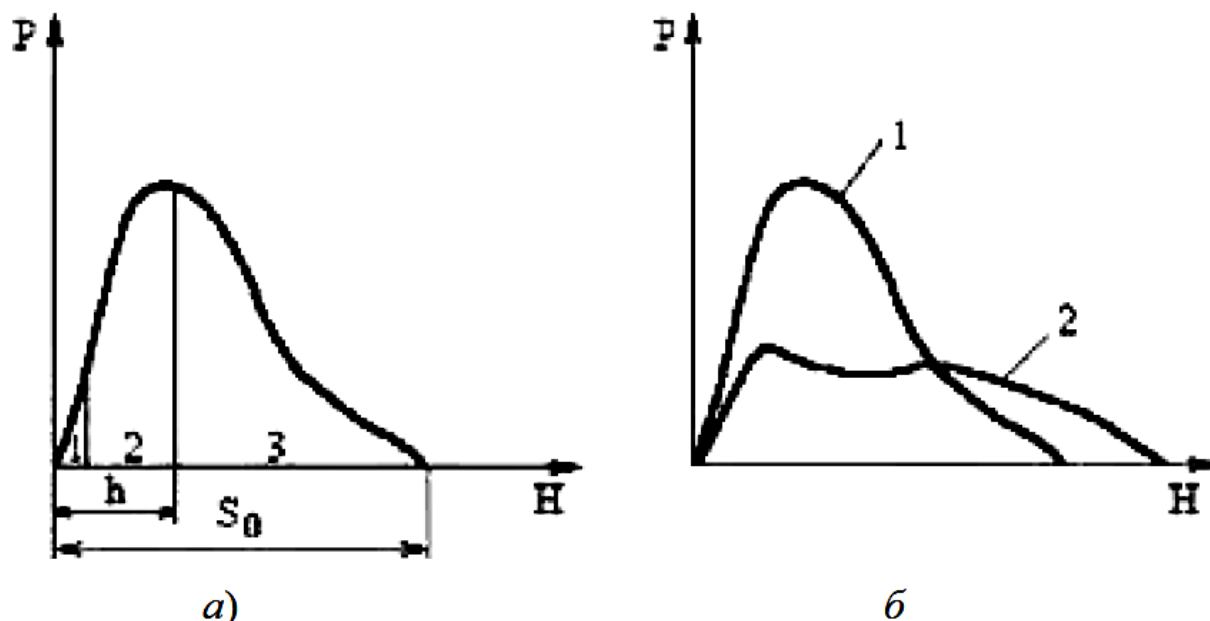


Рис. 2.24. Изменение силы деформации P по длине пути H :
 а – стадии процесса резки,
 б – сравнение зависимостей усилий для ножниц с параллельными (1) и наклонными (2) ножами

При резке выделяют три основных стадии процесса: упругих деформаций, пластических деформаций и скалывания. Продолжительность стадий зависит от пластичности штампуемого металла, состояния поверхности инструмента и скорости деформации. В соответствии с этими стадиями происходит изменение силы деформации P (рис. 2.24, а) по длине пути H .

На первой стадии наблюдается медленное нарастание силы (смятие и образование очага деформации), на второй – значительный рост (сдвиговая деформация) до максимального значения; на третьей – быстрое падение силы вследствие скола.

Анализируя соответствующие графики для различных типов ножниц (рис. 2.24, б), можно отметить, что сила резки на ножницах с параллельными ножами (кривая 1) значительно выше, чем сила резки на гильотинных ножницах (кривая 2).

Гибка – это технологическая операция листовой штамповки, в результате которой из плоской заготовки при помощи штампов получают изогнутую пространственную деталь. Различают одноугловую, двухугловую, многоугловую гибку, закатку и завивку (рис. 2.25).

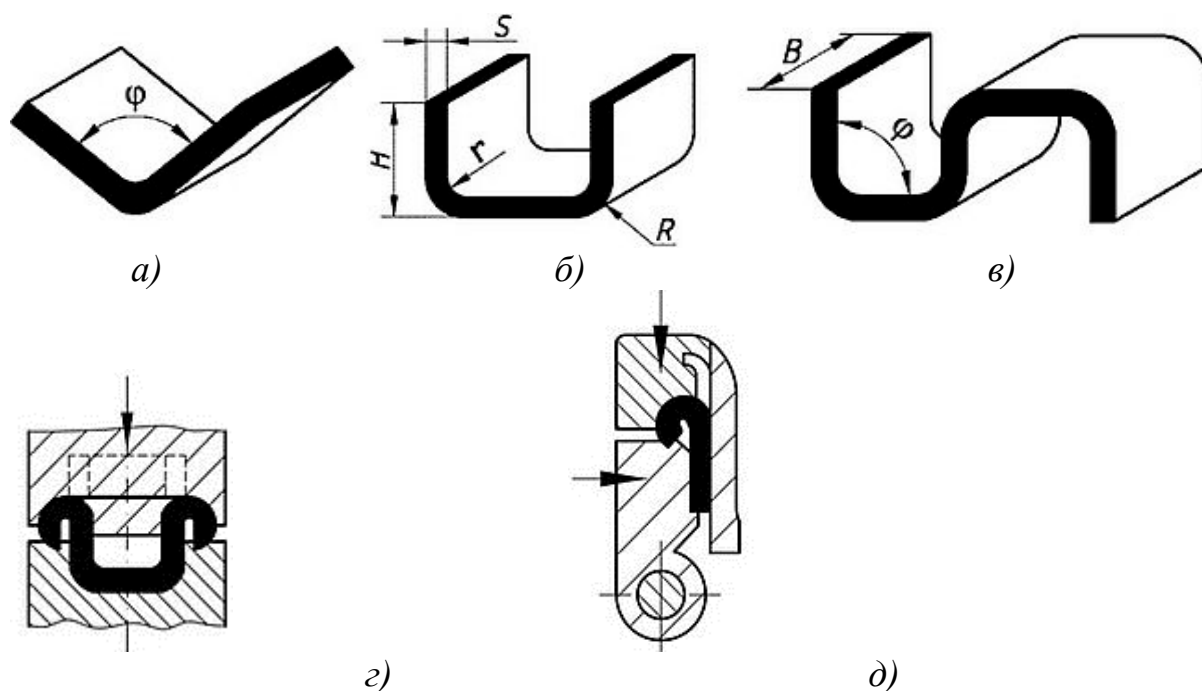


Рис. 2.25. Разновидности операций гибки

а – одноугловая, б – двухугловая, в – многоугловая, г – закатка, д – завивка

При одноугловой гибке слои металла внутри угла изгиба (со стороны пуансона) сжимаются и укорачиваются в продольном и растягиваются в поперечном направлениях. Наружные слои (со стороны матрицы) растягиваются и удлиняются в продольном и сжимаются в поперечном направлениях. Между удлиненными и укороченными слоями находится нейтральный слой (н.с.), представляющий условную криволинейную поверхность, разделяющую слои сжатых и растянутых волокон (рис. 2.26).

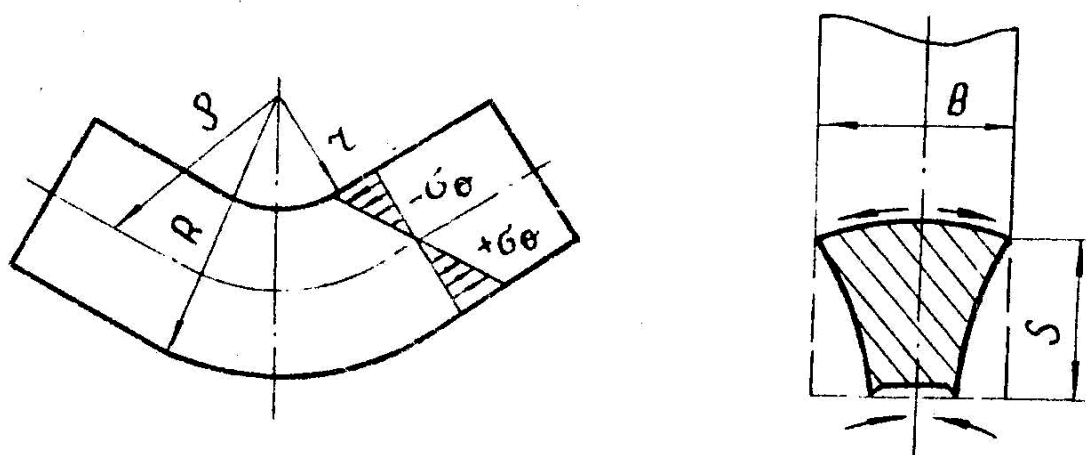


Рис.2.26 Распределение напряжений и деформаций при одноугловой гибке

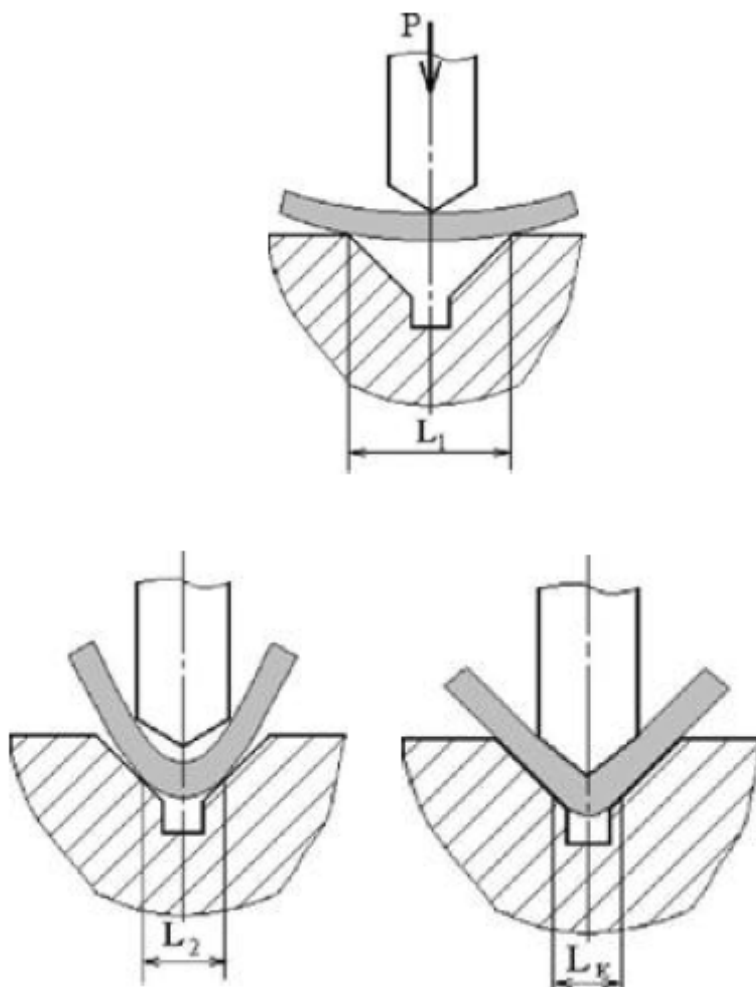


Рис. 2.27. Последовательность процесса одноугловой гибки листового металла

Последовательность процесса одноугловой гибки включает три стадии (рис. 2.27): упругого изгиба, упруго-пластического изгиба, калибровки. При этом происходит постепенное уменьшение радиуса кривизны и плеча изгиба (L_1 , L_2 , L_k). Немаловажными величинами, определяющими возможность осуществления листовой гибки, являются минимально допустимые радиусы гибки. Они должны соответствовать пластическим свойствам металла и не допускать образования трещин.

Вытяжка — это технологическая операция листовой штамповки, заключающаяся в превращении плоской или полой заготовки в открытое сверху полое изделие замкнутого контура. По геометрической форме получаемых деталей выделяют вытяжку изделий осесимметричной, коробчатой и сложной несимметричной формы. Кроме того, различают вытяжку с прижимом и без прижима, а также с утонением и без утонения стенок.

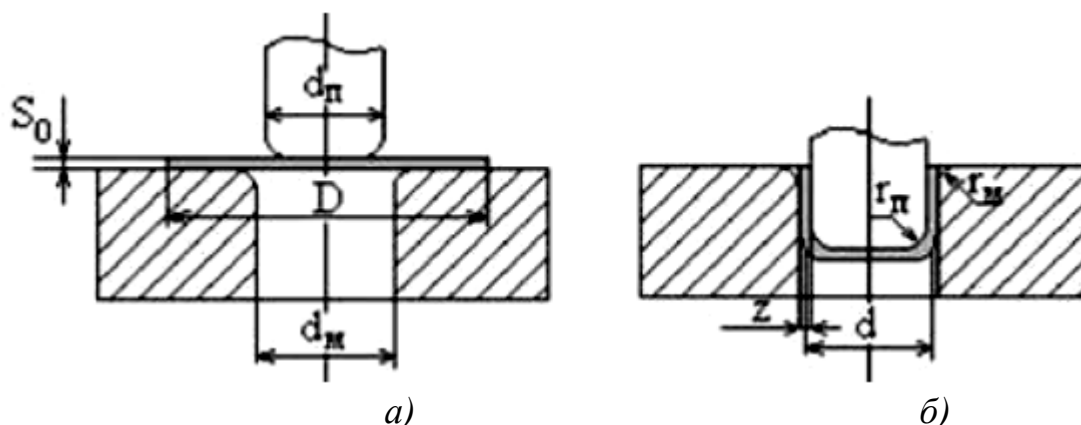


Рис. 2.28 Схема процесса вытяжки листового металла без прижима

Пуансон, воздействуя на центральную часть заготовки (рис. 2.28, а), вызывает ее прогиб за счет создания изгибающего момента со стороны матрицы и пуансона. Дальнейшее опускание пуансона приводит к появлению радиальных растягивающих напряжений, достаточных для перевода фланцевой части заготовки в пластическое состояние. С этого момента начинается втягивание заготовки в матрицу с образованием боковых поверхностей вытягиваемого изделия при одновременном уменьшении диаметра заготовки. Действие радиальных растягивающих напряжений σ_r приводит к тому, что во фланце в тангенциальном (широтном) направлении возникают сжимающие напряжения σ_θ . Совместное действие этих напряжений обеспечивает втягивание фланца в отверстие матрицы и получение изделия (рис. 2.28, б).

За одну операцию вытяжки можно получить одну неглубокую деталь, так как при больших степенях вытяжки в опасных зонах (переход от фланца к стенке и от стенки к дну) величина радиальных растягивающих напряжений может превышать максимальную $\sigma_{r\max}$, что приведет к отрыву фланца или дна от стенки детали.

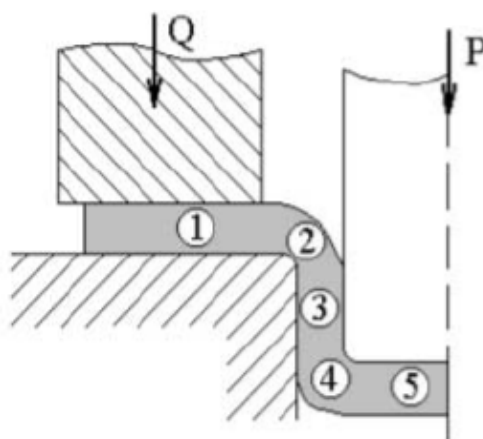


Рис. 2.29 Расположение характерных сечений в процессе вытяжки детали с прижимом

Напряженно-деформированное состояние в исследуемых сечениях (рис. 31) в случае вытяжки листового металла с прижимом может быть описано следующим образом:

Сечение 1. Фланцевая часть находится под воздействием тангенциальных и осевых сжимающих напряжений и радиального растягивающего, то есть реализуется объемная схема напряженного и деформированного состояния. Без прижима осевые напряжения σ_z равны нулю. Под воздействием такой схемы напряженно-деформированного состояния с наличием максимальной величины тангенциальных напряжений сжатия ($\sigma_{\theta\max}$) возможна потеря устойчивости фланцевой части заготовки и образование гофр (складок). Для предотвращения этого явления используется прижим или складкодержатель, при применении которого осевая деформация ε_z значительно уменьшается и стремится к нулю, что обеспечивает снижение складкообразования вследствие уменьшения толщины фланцевой части.

Сечение 2. В данном сечении перехода от фланца к цилиндрической части изделия реализуется сложная деформация, вызванная пространственным изгибом, наибольшим радиальным растяжением и незначительным тангенциальным сжатием. Действующие в этом сечении радиальные растягивающие напряжения являются максимальными и могут привести к отрыву фланцевой части заготовки, особенно при большой величине силы прижима Q .

Сечение 3. В стенке (цилиндрической части) полого изделия реализуется линейно-напряженное и плоско-деформированное состояние.

Сечение 4. Часть данного закругления изделия является наиболее опасным с точки зрения возникновения трещин сечением. Это вызвано действием объёмной схемы напряжений двухосного растяжения и одноосного сжатия, под действием которых происходит значительное утонение стенок в этой части заготовки. Для предотвращения отрыва дна от стенок, что является следствием действия такой схемы напряженно-деформированного состояния, необходимо, чтобы величина радиальных растягивающих напряжений не превышала $\sigma_{\theta\max}$.

Сечение 5. Дно изделия находится в плоско-напряженном и объемно-деформированном состоянии. Сначала толщина металла практически не изменяется, а на последующих операциях дно значительно утоняется.

К основным операциям листовой формовки, изменяющим форму заготовки за счет местных деформаций, относятся рельефная формовка (формовка ребер жесткости и местных выступов), отбортовка, обжим и раздача.

Рельефная формовка является частным случаем неглубокой местной вытяжки, при которой материал подвергается главным образом растяжению.

Отбортовка – это операция получения горловины в плоской или пространственной заготовке за счет растяжения в тангенциальном направлении путем вдавливания в отверстие матрицы части заготовки с предварительно полученным отверстием. Различают два вида операции отбортовки: отбортовку отверстий (внутреннюю) и отбортовку наружного контура (внешнюю). Они различаются характером деформации, схемой напряженного состояния и производственным назначением. Отбортовка наружного контура представляет собой образование невысоких бортов по наружному криволинейному краю заготовок, производимое за счет растяжения или сжатия материала.

Обжим (обжимка) – это операция листовой формовки, предназначенная для уменьшения поперечных размеров краевой части полых цилиндрических деталей (рис. 2.30). Применяется для изготовления деталей типа горловин и патронных гильз.

Раздача (растяжка) – это операция листовой формовки, предназначенная для увеличения краевой части полый цилиндрической заготовки.

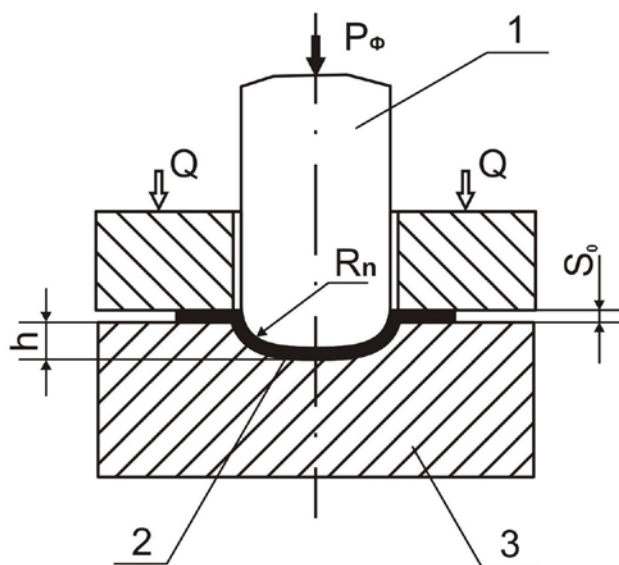


Рис. 2.30 Схема формовки:
1 – пуансон; 2 – деталь; 3 – матрица

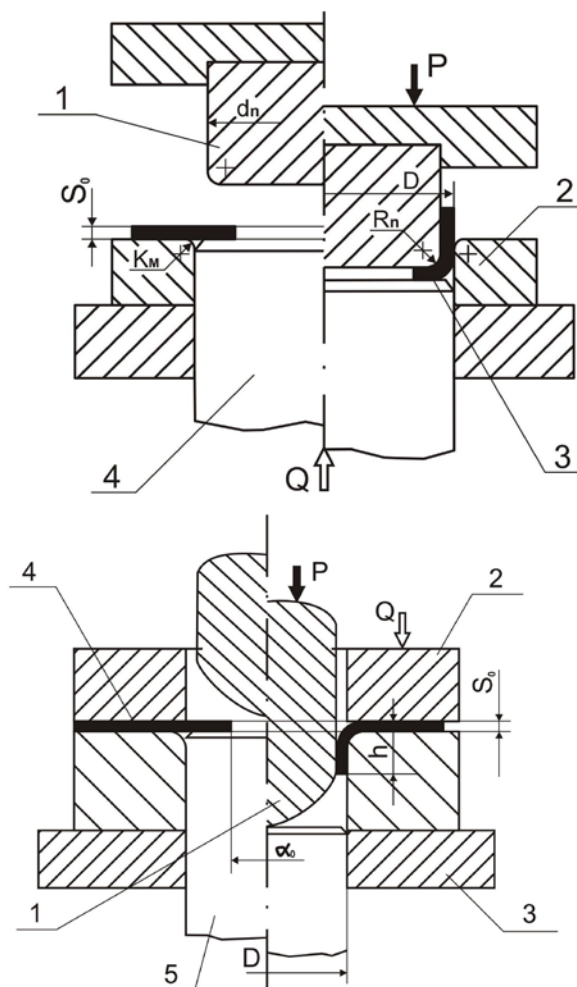


Рис.2.31 Схема отбортовки контура (а) и отверстия (б)
1 – пуансон; 2 – матрица; 3 – деталь

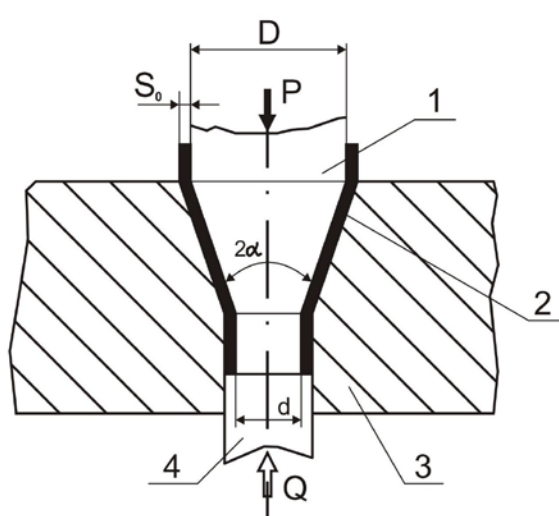


Рис. 2.32 Схема раздачи
1 – пуансон; 2 – деталь; 3 – трафарет; 4 –
выталкиватель

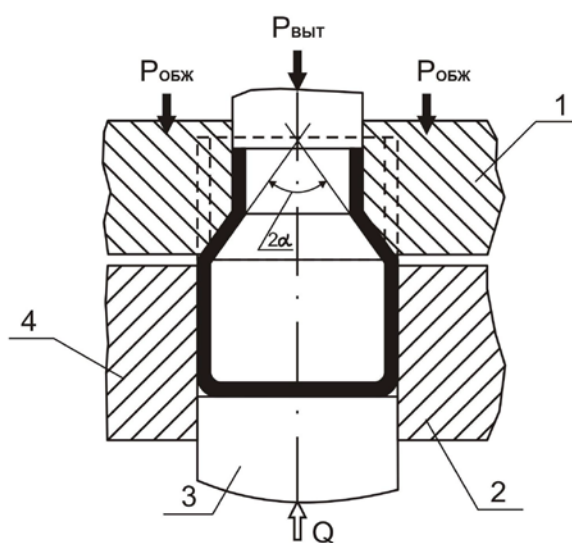


Рис. 2.33. Схема обжима в штампе
1 – матрица; 2 – деталь; 3 –
основание; 4 – трафарет

Следует отметить, что разнообразие форм изделий из листового металла еще больше расширяется при использовании комбинированного процесса штамповки-сварки. Штампованно-сварные изделия успешно конкурируют с литыми изделиями и изделиями, полученными обработкой резанием, по экономичности и качеству.

РАЗДЕЛ V. ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ

Развитие машиностроения связано с успешной разработкой и применением принципиально новых, более экономичных, производительных и технически совершенных методов технологии, в том числе основанных на использовании электрофизических и электрохимических явлений.

Под электрофизическими и электрохимическими методами размерной обработки понимают совокупность электрических, электромагнитных и электрохимических процессов и методов непосредственного одновременного или в различных сочетаниях теплового, механического или химического воздействия на твердое тело с целью придания ему заданных формы и размеров.

При обработке давлением и точном литье используют штампы, литейные формы, пресс формы и другие подобные изделия сложной конфигурации, весьма трудоемкие в изготовлении. Отверстия, щели и фасонные прорезы сверхмалых размеров, а также соединительные каналы, расположенные в труднодоступных местах, что не могут быть обработаны на металлорежущих станках из-за несоответствия между малой жесткостью и прочностью инструмента и возникающими большими силами резания, либо из-за невозможности изготовления инструмента нужных размеров и форм.

Во всех указанных случаях эффективно используют электрофизические и электрохимические методы размерной обработки материалов.

В соответствии с принятой классификацией применяемые в промышленности электрофизические и электрохимические методы обработки можно разделить на четыре группы.

Первая группа охватывает электроэрозионные методы обработки токопроводящих материалов, основанные на использовании энергии разрядов, возникающих между инструментом и заготовкой.

Вторая группа методов, также используемых для обработки токопроводящих материалов, включает лучевые способы обработки, основанные на воздействии на заготовку концентрированных лучей с

высокой плотностью энергии. Сюда относится обработка световыми (лазерными), электронными или ионными лучами.

К *третьей группе* относятся методы, импульсного ударного воздействия на заготовку частиц абразива с частотой ударов, соответствующей ультразвуковому диапазону. Эти методы используют для обработки твердых, хрупких, а также нетокопроводящих материалов.

Четвертая группа объединяет электрохимические методы, основанные на явлении анодного растворения, заключающегося в том, что электрод, подключенный к положительному полюсу (аноду) растворяется при помещении его в раствор электролита.

К основным преимуществам электрофизических и электрохимических методов размерной обработки материалов можно отнести:

- 1) практическую независимость производительности процесса обработки от твердости и вязкости обрабатываемого материала;
- 2) возможность отображения (копирования) инструмента сложной формы сразу по всей поверхности заготовки при простом поступательном движении инструмента;
- 3) возможность осуществления обработки практически без силового воздействия на заготовку;
- 4) легкость автоматизации процесса обработки и возможность осуществления многостаночного обслуживания.

Глава 1. Электроэрозионная обработка материалов

Разрушение металлов электрическими разрядами, возникающими в результате пробоя диэлектрического промежутка, называют электрической эрозией. Управляемая электрическая эрозия положена в основу нескольких методов обработки, отличающихся названиями, технологическими характеристиками, схемами и другими признаками.

Рассмотрим упрощенную схему процесса удаления материала посредством электрической эрозии (рис. 1.1). К электродам 1 и 2 подведено напряжение, которое создает электрическое поле в межэлектродном промежутке 3. При сближении электродов до расстояния, достаточного для пробоя межэлектродного промежутка, возникает электрический разряд в виде узкого токопроводящего канала. Для повышения интенсивности разряда электроды погружают в диэлектрическую жидкость 4 (керосин, минеральное масло, дистиллированная вода).

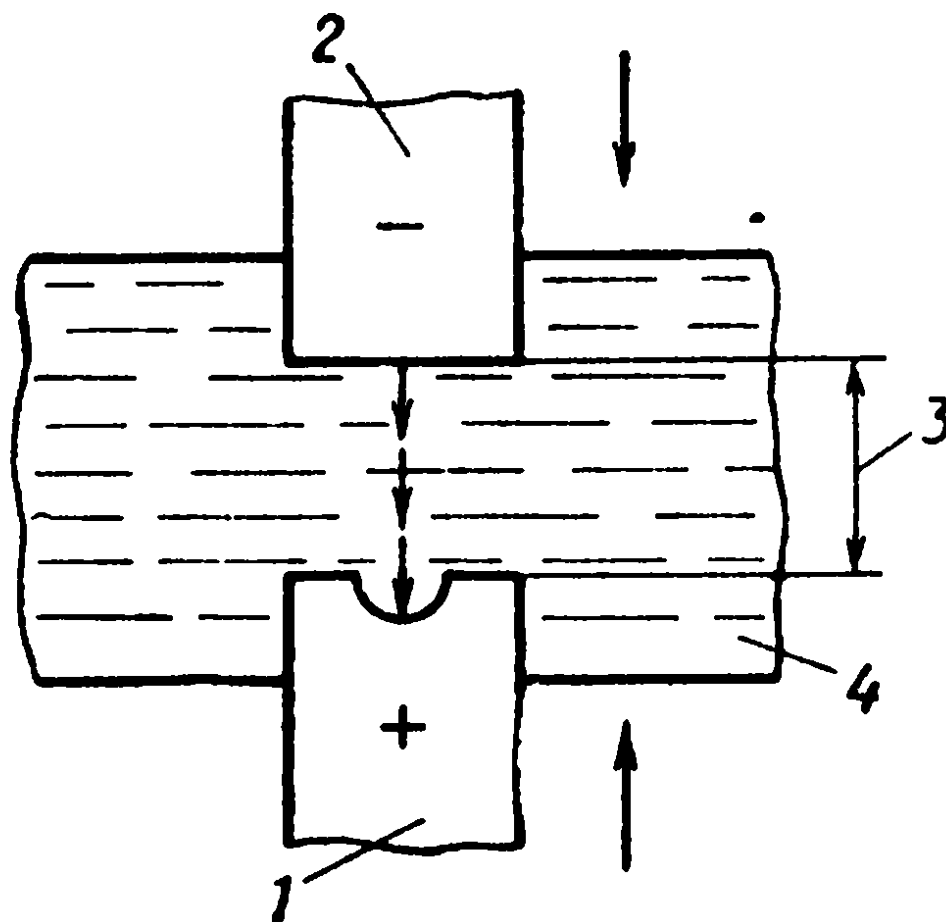


Рис. 1.1 Схема разрушения металла импульсными разрядами электрического тока.
 1 – электрод-анод; 2 – электрод-катод; 3 – межэлектродный промежуток (зазор);
 4 – диэлектрическая жидкость

На поверхности электродов имеются микронеровности различной величины. Напряженность электрического поля будет наибольшей между двумя наиболее близкими друг к другу выступами на поверхностях электродов (рис. 1.2), поэтому именно здесь происходит нарушение электрической прочности жидкости и возникает электрический пробой промежутка. Образуется плазменный канал разряда. Благодаря высокой концентрации энергии в зоне разряда развивается температура в тысячи и десятки тысяч градусов. Металл на поверхности электродов плавится и испаряется. Капли расплавленного металла в результате движения потока жидкости в рабочей зоне в виде ударной волны выбрасываются за пределы электродов и застывают в виде мелких частиц сферической формы. При электрическом разряде в жидкости возникает газовый пузырь, который расширяется и своими стенками также захватывает и выносит частицы металла из межэлектродного промежутка.

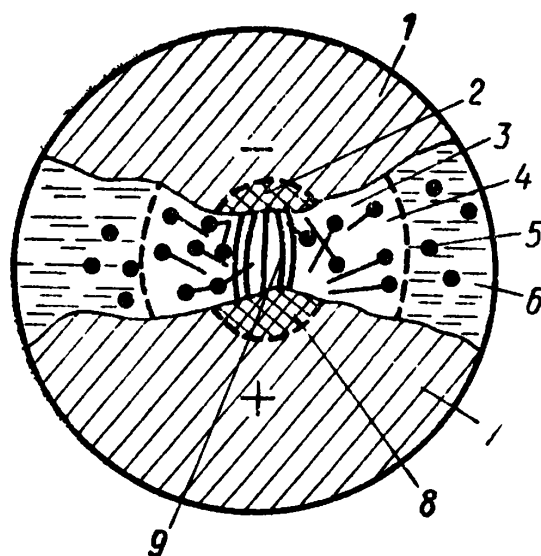


Рис. 1.2 Микрорельеф поверхности и схема разряда между электродами
1 – катод; 2 – микропорция металла, выплавленная на поверхности катода; 3 – газовый пузырь; 4 – расплавленные частицы металла; 5 – частицы металла, застывшие в рабочей жидкости; 6 – рабочая жидкость; - 7 – анод; 8 – микропорция металла, выплавленная на аноде; 9 – канал разряда

От взаимодействия жидкости с участками электродов, нагретых до температуры 100 – 400 °С, образуются гнезда пузырьков пара, а на границах плазменного канала происходит пиролиз диэлектрической жидкости. В результате в жидкости образуются газы, а также асфальтосмолистые вещества, отлагающиеся на частицах металла и способные при нагреве образовывать прочную спекающуюся массу. Из газовой среды выделяется углерод, отлагающийся в виде тонкой пленки кристаллического графита.

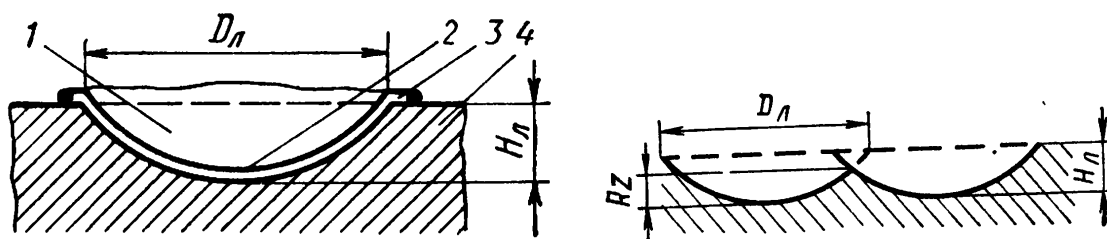


Рис. 1.3 Лунка, полученная в результате воздействия единичного импульса (а) и профиль поверхности, обработанной импульсами тока (б).

1 – пространство, оставшееся после выплавления металла; 2 – закаленный «белый» слой;
3 – валик вокруг лунки; 4 – заготовка

В месте действия импульса на поверхностях электродов остаются небольшие углубления – лунки (рис. 1.3), образовавшиеся вследствие удаления разрядом некоторого количества металла. Величина лунки зависит в первую очередь от количества энергии, выделяемой в разряде, а

также длительности импульса. Профиль обработанной поверхности представляет собой результат наложения друг на друга лунок, образованных под действием единичных электрических разрядов.

Возможность практического использования электроэрозионных процессов в качестве метода формообразования возможна благодаря так называемому полярному эффекту: повышению эрозии одного электрода по сравнению с другим. Данный эффект определяется материалом электродов, энергией и длительностью импульсов, а также полярностью подводимых к электродам потенциалов.

Например, при коротких импульсах (электроискровая обработка) энергия преимущественно поступает на анод, в качестве которого используется в данном случае деталь (прямая полярность). При увеличении длительности импульсов наступает перераспределение теплового потока на электродах. Это приводит к тому, что эрозия анода становится меньше, чем эрозия катода. В том случае необходимо использовать обратную полярность (т.е. заготовка должна быть катодом), а сам метод обработки принято называть электроимпульсным.

Схемы формообразования. Формообразование деталей электроэрозионным методом можно осуществить по следующим схемам:

1 схема. Копирование формы профилированного электрода-инструмента или его сечения. При этом обрабатываемый элемент заготовки по форме является обратным отображением рабочей поверхности инструмента. Данную операцию называют также прошиванием. Существуют методы прямого и обратного копирования. При прямом копировании инструмент находится над заготовкой, а при обратном – под ней. Данный метод достаточно прост в реализации и его широко применяют в промышленности. На рис. 1.4 показаны некоторые технологические схемы электроэрозионной обработки заготовок 1 методами прямого (а – з) и обратного (д) копирования формы профилированного электрода 2.

2 схема. Реализуется за счет взаимного перемещения обрабатываемой заготовки и непрофилированного электрода-инструмента. При этой схеме возможны операции вырезания проволокой сложнопрофильных деталей (рис. 1.5, а); разрезания (рис. 1.5, б) или прорезания пазов (рис. 1.5, в) дисковым непрофилированным электродом, электроэрозионного шлифования (рис. 1.5, г) или растачивания (рис. 1.5, д).

3 схема. Реализуется за счет сочетания перемещений заготовки 1 и профилированного электрода 2 по способам огибания или обката. Данная схема применяется относительно редко, однако она позволяет получить деталь сложной формы при относительно простой форме электрода инструмента (рис. 1.6).

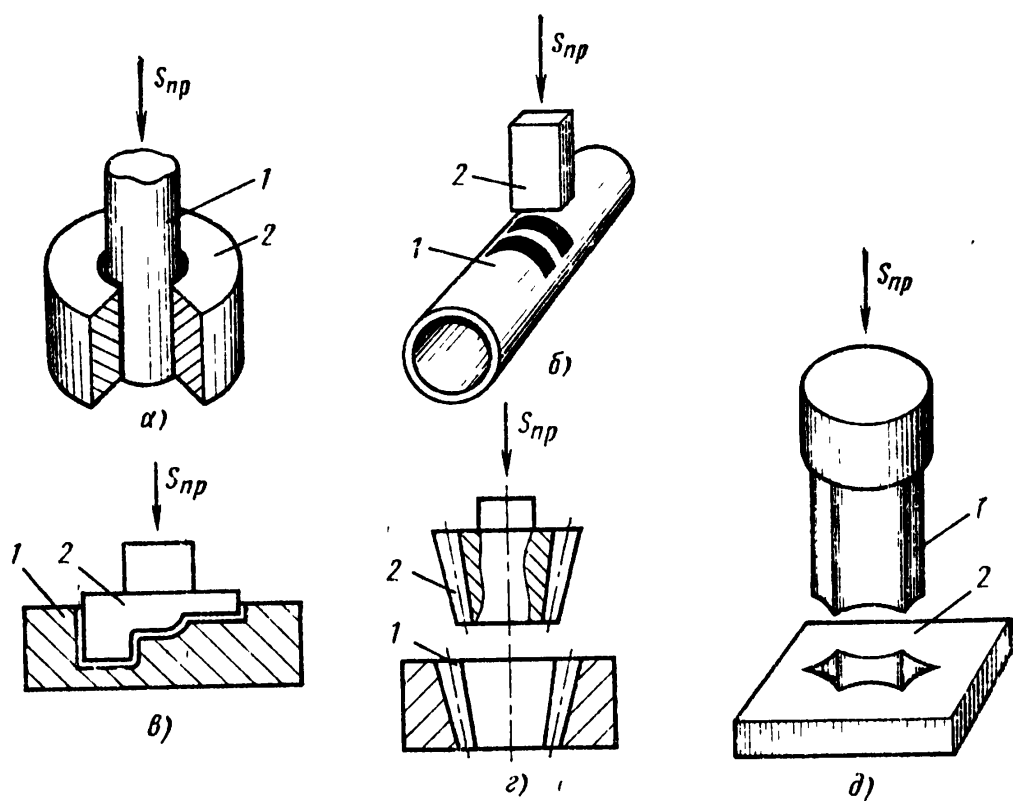


Рис. 1.4 Схемы формообразования копированием геометрической формы электрода-инструмента

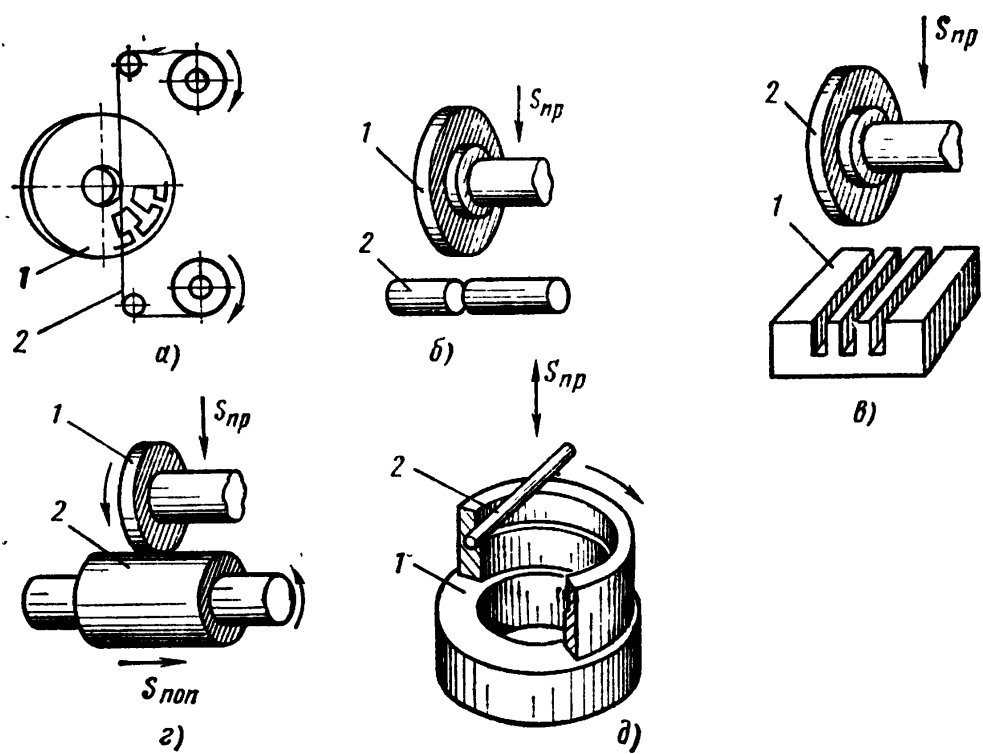


Рис. 1.5 Схемы электроэрозионной обработки непрофилированным электродом

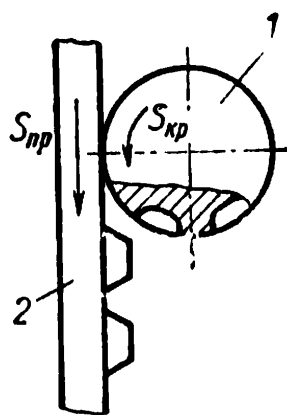


Рис. 1.6 Схема формообразования обкатыванием

Глава 2. Электронно-лучевая обработка материалов

Электронно-лучевой называют обработку, при которой для технологических целей используют остросфокусированный пучок электронов, движущихся с большой скоростью.

Метод электронно-лучевой обработки (ЭЛО) основан на использовании теплоты, выделяющейся при резком торможении потока электронов на поверхности обрабатываемой заготовки. При электронно-лучевой обработке деталь помещают в герметичную камеру, в которой обеспечивается высокая степень разрежения (до 10^{-7} Па).

В качестве источника свободных электронов для процессов ЭЛО используют эффект термоэлектронной эмиссии (излучение электроном с поверхности нагретого металлического электрода). Кинетическая энергия этих электронов относительно невелика. Ее можно существенно повысить путем ускорения движения электронов в определенном направлении воздействием электрического поля, создаваемого высокой разностью потенциалов между катодом (эмиттером) и анодом. В промышленных целях используют электронные пучки ускоренные электрическим полем с разностью потенциалов до 150 кВ. Скорость электронов при этом может достигать 10^8 м/с.

Съем металла с поверхности за счет испарения и взрывного вскипания – физическая основа размерной ЭЛО. Пары материала, покидая зону обработки, создают давление – отдачу, углубляя зону расплава. В связи с этим при ЭЛО можно получить глубокое («кинжальное») проплавление или сварку соединений, а при размерной ЭЛО – глубокие отверстия.

Электронный луч, необходимый для реализации технологического процесса, создается в специальном приборе – электронно-лучевой пушке (рис. 2.1).

Пушка имеет катод 1, который нагревается до высоких температур проходящим током или бомбардировкой электронами вспомогательного катода. Раскаленный катод испускает (эмитирует) свободные электроны. Катод изготавливается из тугоплавких материалов или специальной керамики.

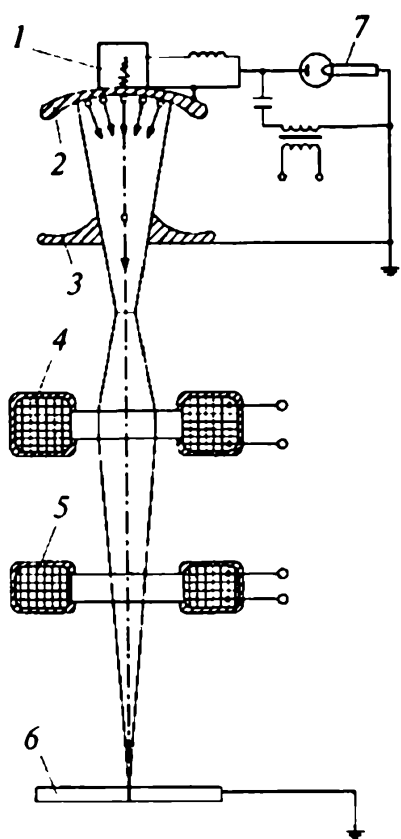


Рис. 2.1 Схема электронно-лучевой пушки
1 – катод; 2 – прикатодный электрод; 3 –
ускоряющий электрод (анод); 4 – магнитная
линза; 5 – отклоняющая система; 6 – изделие; 7 –
высоковольтный источник

Катод размещают внутри прикатодного электрода 2, изготовленного из нержавеющей стали. На некотором удалении от него находится ускоряющий электрод (анод) 3 с отверстием. Между катодом и анодом создается электрическое поле высокой напряженности, в результате чего электроны, вылетевшие с катода, ускоряются. Прикатодный и ускоряющий электроды имеют форму, обеспечивающую такое строение электрического поля между ними, которое фокусирует электроны в пучок диаметром, равным диаметру отверстия в аноде. Положительный потенциал ускоряющего анода может достигать нескольких десятков киловольт, поэтому электроны, эмитированные катодом на пути к аноду приобретают значительную

скорость и энергию. После ускоряющего электрода электроны движутся равномерно.

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 из анода электроны фокусируются магнитным полем в специальной магнитной линзе 4 (катушке питаемой электрическим током). Фокусировка в пучок минимального размера происходит на некотором удалении от магнитной линзы. Сфокусированные электроны ударяются с большой скоростью о площадку на поверхности изделия 6, их

кинетическая энергия превращается в теплоту, нагревая металл до высокой температуры.

Для перемещения луча по поверхности обрабатываемого объекта на пути электронов помещают магнитную отклоняющую систему 5, с помощью которой можно изменять направление луча в широких пределах и с высокой частотой. Эти системы используются для точной установки луча по стыку (при сварке) интенсивного перемешивания металла (в сварочной ванне или при переплавке), отклонения луча в пределах широкой площадки (при напылении).

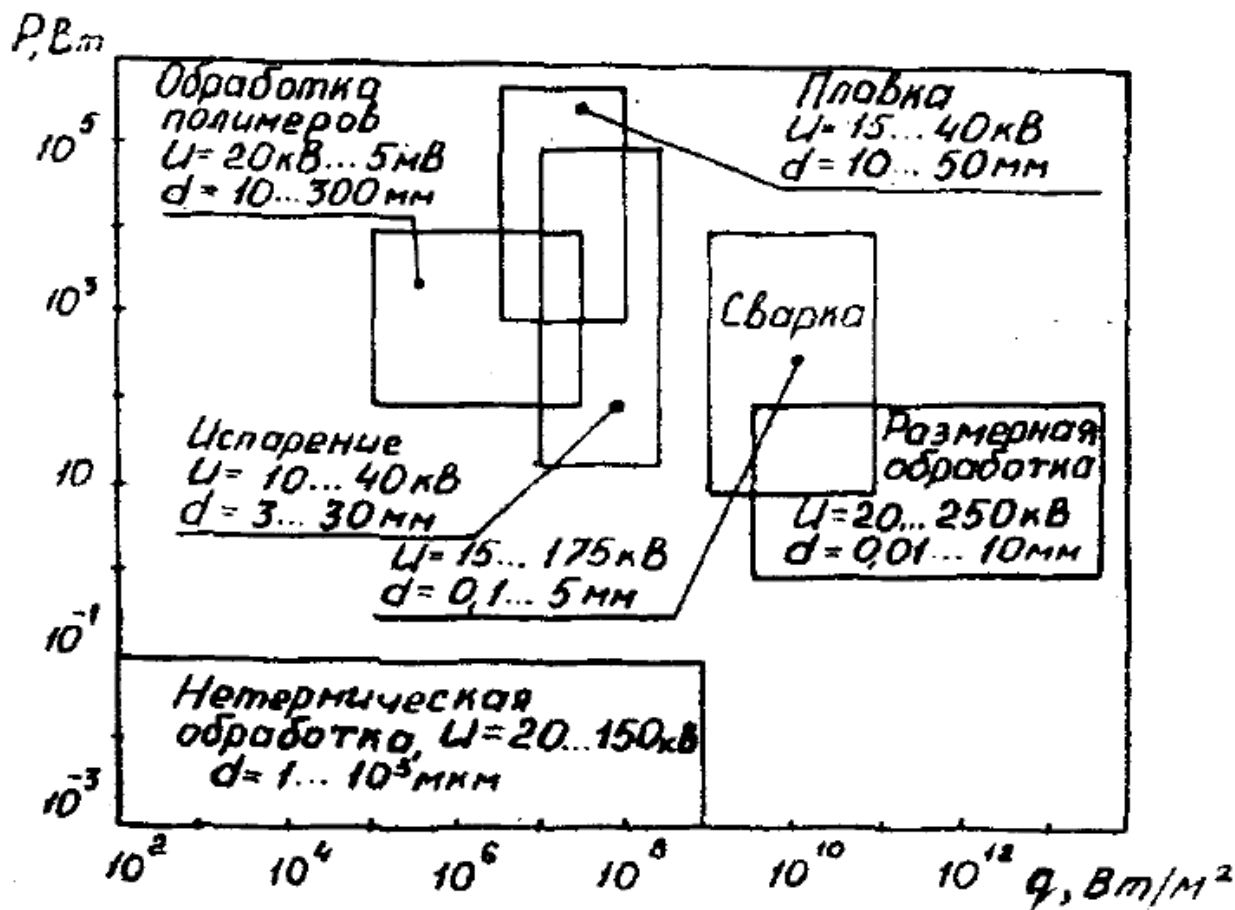


Рис. 2.2 Диапазоны параметров электронно-лучевых технологий.

С использованием электронно-лучевых пушек различной мощности реализуется достаточно широкий спектр технологических методов обработки материалов. Диапазоны мощности установок ЭЛО и плотности потоков энергии для различных технологических задач приведены на рис. 8.

Размерная обработка. 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

тонкопленочных схем, обработки изделий из таких материалов, как кремний, германий, ферриты, керметы и т.д.

Переплав. В промышленности эксплуатируются плавильные установки с различными узлами для создания мощного электронного пучка кольцевыми катодами, радиальными электронными излучателями и аксиальными пушками. Наибольшее распространение для проведения термических процессов получили установки с аксиальными пушками. Возможность раздельной 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.

Электронно-лучевая 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 получать 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 несколько микрометров. Проведение высококачественной сварки требует точной подгонки кромок деталей свариваемого изделия.

Для сварочных процессов используют пушки небольшой мощности, обычно 1...3 кВт, хотя имеются установки для сварки легированных сталей толщиной 150 ... 200 мм, обеспечивающие высокие скорости процесса и соотношение глубины шва к его ширине 25:1. Зона термического влияния при этом в 40 раз меньше, чем при многопроходной сварке под слоем флюса.

Нанесение покрытий. Процесс идет за счет испарения материалов. Простота управления электронным пучком во времени и пространстве позволяет точно дозировать количество энергии, подводимой к расплаву. Прямой нагрев поверхности испаряемого материала таким пучком открывает широкие возможности регулирования скорости испарения и распределения плотности парового потока в пространстве перед мишенью.

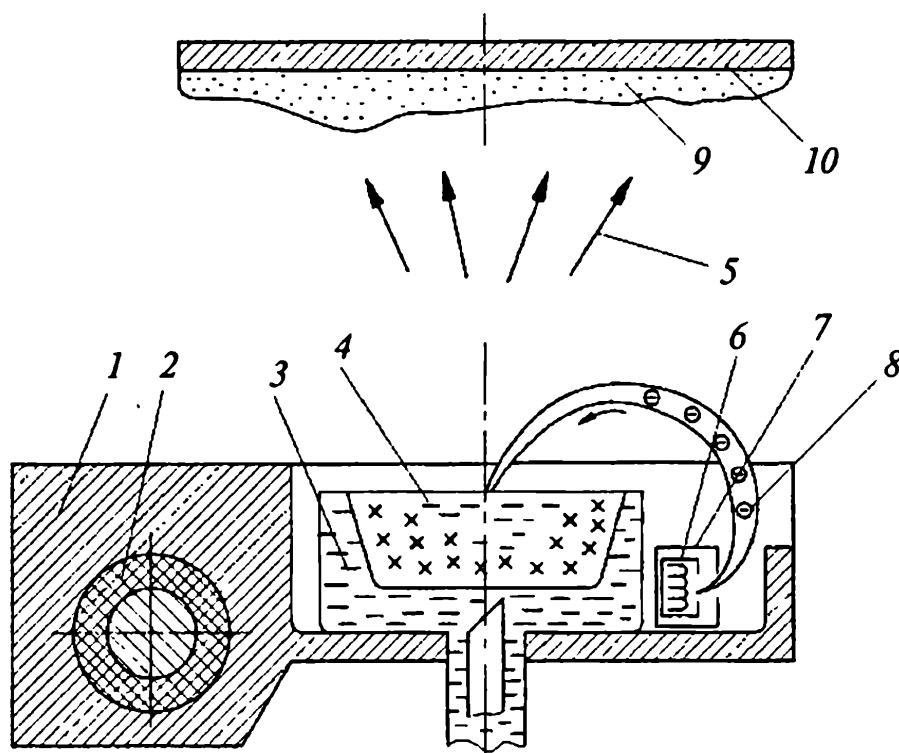


Рис. 2.3 Электронно-лучевой испаритель.

1 – полюсный наконечник; 2 – электромагнит; 3 – водоохлаждаемый тигель; 4 – испаряемый катод; 5 – поток наносимого материала; 6 – термокатод; 7 – фокусирующая система; 8 – электронный луч; 9 – покрытие; 10 – подложка

Электронно-лучевой (рис 2.3) испаритель состоит из трех основных частей: электронной пушки, отклоняющей системы и водоохлаждаемого тигля. Электронная пушка формирует поток электронов. Она состоит из вольфрамового термокатада 6 и фокусирующей системы 7. Электроны, эмитируемые катодом, проходят фокусирующую систему, ускоряются за счет разности потенциалов между катодом и анодом и формируются в электронный луч 8.

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, чтобы обеспечить равномерность испарения материала с поверхности.

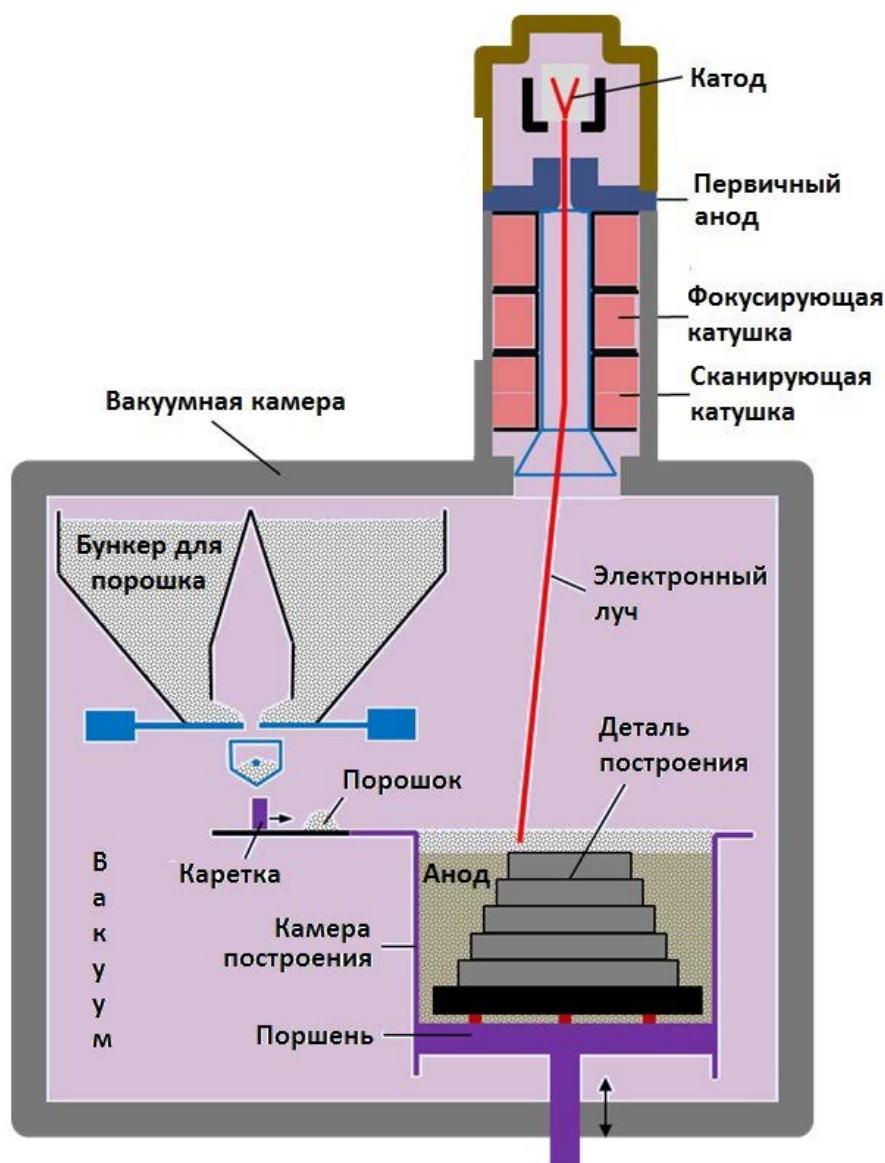


Рис. 2.4 Принципиальная схема установки по селективному электронно-лучевому плавлению

Селективное электронно-лучевое плавление. (Electron Beam Melting, EBM) – относится к технологии аддитивного производства и является наиболее совершенным среди других технологий 3D-печати.

Метод заключается в селективном послойном сплавлении слоя порошкового материала (полном переплавлении его частиц) электронным лучом согласно предварительно разделенной на слои трехмерной модели изделия. В процессе сплавления электронный луч перемещается относительно слоя порошкового материала. Данные движения схожи с движениями разворачивания в растр электронного луча в сканирующей электронной микроскопии.

Установка для селективного электронно-лучевого плавления состоит из панели управления и рабочей вакуумной камеры, оснащенной

откачивающими насосами. Принципиальная схема рабочей вакуумной камеры показана на рис. 2.4.

Процесс получения изделия состоит из четырех этапов:

- предварительный прогрев слоя порошкового материала расфокусированным электронным лучом, перемещающимся относительно него на большой скорости;
- плавление слоя изделия сфокусированным электронным лучом согласно трехмерной модели;
- опускание рабочего бункера на толщину слоя порошкового материала (50 – 70 мкм);
- нанесение специальным устройством нового слоя порошкового материала

Таким образом повторяя основные этапы процесса необходимое число раз получают готовое функциональное изделие, которое отделяют от подложки и очищают в специальной системе от несплавленных частиц порошка.

Изделия, изготовленные методом селективного электронно-лучевого плавления находят применение в медицинских изделиях (до 70%), а также в аэрокосмической, машино- и приборостроительной отраслях.

Глава 3. Лазерная обработка материалов

Технология обработки материалов с использованием лазеров дает возможность осуществления процессов, недоступных большинству других технологий при полной автоматизации и высокой производительности.

При действии лазерного луча на поверхность металла происходит преобразование энергии его электромагнитной волны в тепловую энергию электронов решетки в тонком слое ($\approx 10^{-6}$ см) за очень короткое время ($\approx 10^{-11}$ с). Лазерная обработка материалов производится без изоляции заготовок в вакууме, отсутствует последующее рентгеновское излучение.

В основе работы лазера лежат три фундаментальных явления, происходящих при взаимодействии электромагнитных волн с веществом-процессы спонтанного и вынужденного излучения и процесс поглощения.

Вероятность того, что случайный фотон вызовет индуцированное излучение возбуждённого атома, в точности равняется вероятности поглощения этого фотона атомом, находящимся в невозбуждённом состоянии. Поэтому для усиления света необходимо, чтобы возбуждённых атомов в среде было больше, чем невозбуждённых (так называемая инверсия населённостей). В состоянии термодинамического равновесия это условие не выполняется, поэтому используются различные системы накачки активной среды лазера (оптические, электрические, химические и др.).

Первоисточником генерации является процесс спонтанного излучения, поэтому для обеспечения преемственности поколений фотонов необходимо существование положительной обратной связи, за счёт которой излучённые фотоны вызывают последующие акты индуцированного излучения. Для этого активная среда лазера помещается в оптический резонатор. В простейшем случае он представляет собой два зеркала, установленных друг напротив друга, одно из которых полупрозрачное — через него луч лазера частично выходит из резонатора. Отражаясь от зеркал, пучок излучения многократно проходит по резонатору, вызывая в нём индуцированные переходы. Излучение может быть как непрерывным, так и импульсным.

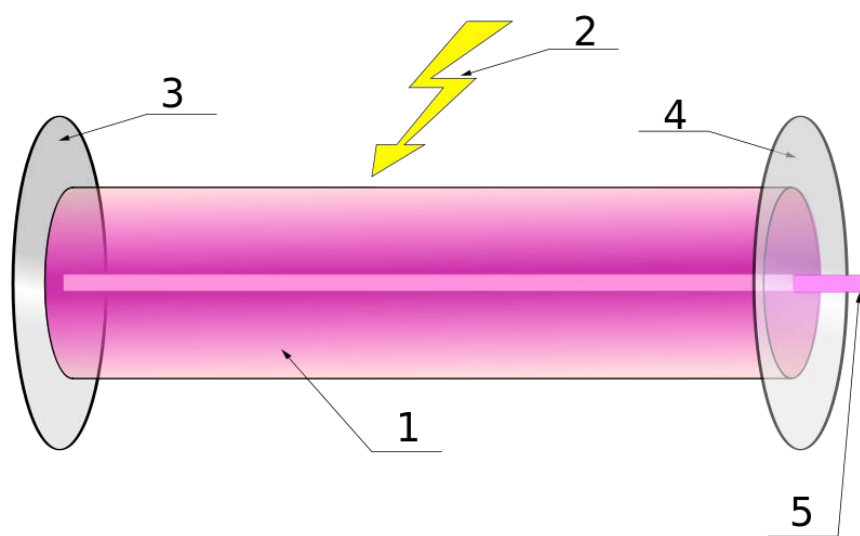


Рис. 3.1 Схема устройства лазера

1 — активная среда; 2 — энергия накачки лазера; 3 — непрозрачное зеркало; 4 — полупрозрачное зеркало; 5 — лазерный луч

Генерируемое лазером излучение является монохроматическим (одной или дискретного набора длин волн), поскольку вероятность излучения фотона определённой длины волны больше, чем близко расположенной, связанной с уширением спектральной линии, а, соответственно, и вероятность индуцированных переходов на этой частоте тоже имеет максимум. Поэтому постепенно в процессе генерации фотоны данной длины волны будут доминировать над всеми остальными фотонами. Кроме этого, из-за особого расположения зеркал, в лазерном луче сохраняются лишь те фотоны, которые распространяются в направлении, параллельном оптической оси резонатора на небольшом расстоянии от неё, остальные фотоны быстро покидают объём резонатора. Таким образом, луч лазера имеет очень малый угол расходимости. Наконец, луч лазера имеет строго определённую поляризацию.

Все лазеры состоят из следующих основных частей (рис. 3.1):

- активной (рабочей) среды;
- системы накачки (источник энергии);
- оптического резонатора (может отсутствовать, если лазер работает в режиме усилителя).

Оборудование для лазерной обработки в зависимости от выполняемых технологических операций может быть различно как по составу, так и по назначению. По составу оно подразделяется на технологические лазеры (ТЛ), лазерные технологические установки (ЛТУ) и лазерные технологические комплексы (ЛТК).

Технологический лазер – это источник лазерного излучения, соответствующий заданным техническим требованиям с необходимым комплектом запасных частей. Он является основным компонентом лазерного технологического оборудования.

Лазерная технологическая установка – это технологический лазер с внешним оптическим трактом (комплект внешней оптики). В некоторых ЛТУ имеются механические манипуляторы (для перемещения изделия или самого лазера относительно изделия). ЛТУ, как правило, входят в состав специализированных комплексов, решающих на производственных предприятиях технологические задачи.

Лазерный технологический комплекс – это ЛТУ, снабженная манипуляторами (изделия или оптики), имеющая вспомогательное технологическое оборудование и систему управления для проведения технологических операций. Все части ЛТК функционально связаны между собой для выполнения технологического процесса. Успешное выполнение технологических операций в производственных условиях возможно только при наличии ЛТК. В случае применения автоматизированного манипулятора изделия или оптики и наличия соответствующих систем связи между системами управления лазером и манипулятором комплекс считается автоматизированным (АЛТК).

По назначению и способности выполнять те или иные операции всю гамму лазерного технологического оборудования подразделяют на универсальное, специализированное и специальное. Соответственно, оно используется в единичном, серийном и массовом производстве.

Лазерная резка. Позволяет относительно просто, в автоматическом режиме изготавливать сложные детали из листовых заготовок без образования стружки при минимальных тепловых деформациях. Процесс экономически выгоден и технически целесообразен из-за возможности сокращения подготовительных работ (конструкторских и подготовки производства), присущих традиционной технологии получения подобных деталей – холодной штамповке. Преимущества лазерной резки перед традиционными способами заключаются в следующем:

- отсутствие механического контакта с обрабатываемым изделием;

- возможность концентрирования энергии луча в пятно размером до десятых долей миллиметра;
- транспортировка излучения на большие расстояния;
- возможность автоматизации процесса резки;
- возможность быстрой перенастройки производства на другие типоразмеры.

ЛТК с манипуляторами изделия со сложным перемещением обычно создают на базе двух координатных столов, на которые могут устанавливаться различные ротационные системы. В качестве манипулятора могут быть использованы промышленные роботы. По характеру манипулятора оптики выделяют системы с перемещением оптических элементов по линейным и вращательным траекториям. ЛТК с манипуляторами оптики по сложной траектории называют «лазер-робот».

Многоцелевые ЛТК сконструированы таким образом, что после некоторой переналадки (или настройки по программе режима работы) могут выполнять несколько операций, например резку, сварку и закалку. В случае, если такая переналадка выполняется автоматически комплекс называется «лазерный обрабатывающий центр». Схема АЛТК для резки листового металла приведена на рис. 3.2.

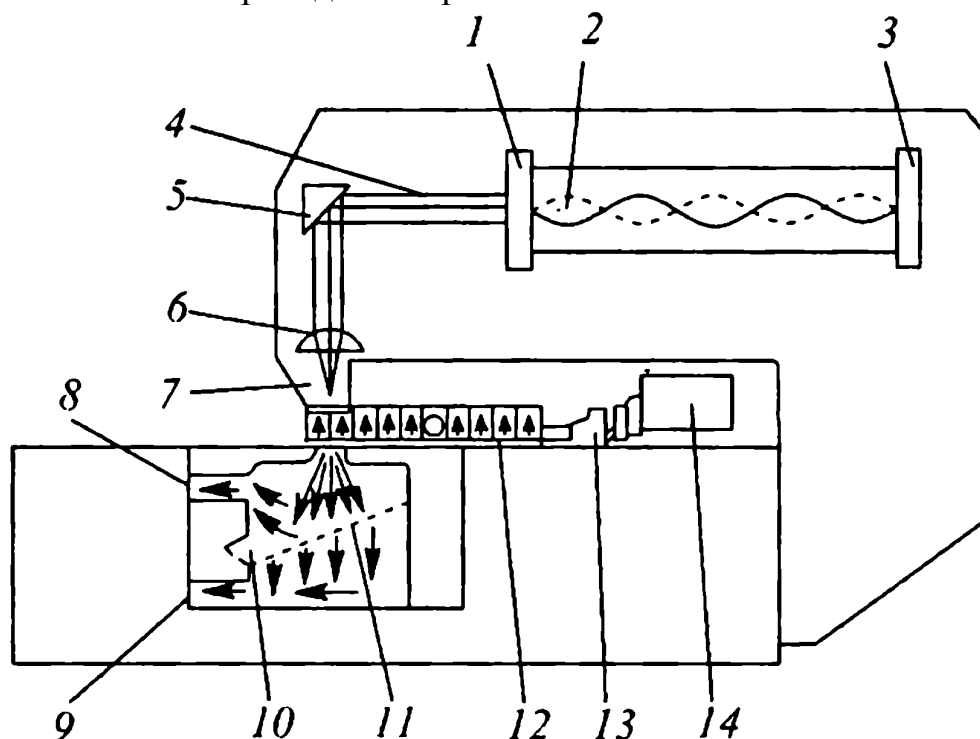


Рис. 3.2 Схема АЛТК для лазерной резки листовых материалов.

- 1- частично отражающее зеркало; 2 – резонатор; 3 – полностью отражающее зеркало;
 4 – выходящий луч; 5 – отклоняющее зеркало; 6 – фокусирующая линза; 7 – узел лазерной резки; 8 – отсос газа; 9 – отвод жидкости; 10 – выход деталей; 11 – сепаратор;
 12 – кассета; 13 – зажим заготовки; 14 – система перемещения

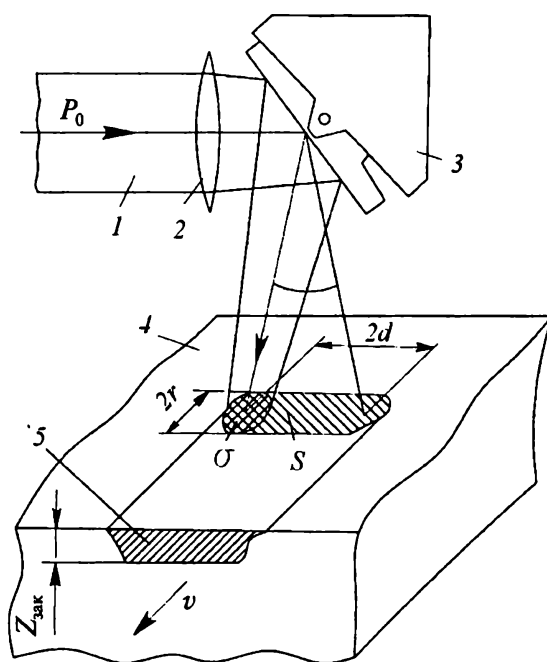


Рис. 3.3. Схема лазерной заковки со сканированием

1 – лазерный луч; 2 – фокусирующая система; 3- сканатор с колеблющимся зеркалом; 4 – обрабатываемый материал; 5 – сечение закаленной дорожки;

Лазерная заковка. Сущность процесса состоит в бездиффузионном превращении при быстром охлаждении гранецентрированной кубической решетки аустенита в искаженную объемно-центрированную кубическую решетку мартенсита. Заковка предполагает не только быстрый нагрев зоны обработки излучением лазера выше температуры фазового перехода, но и ее охлаждение со скоростью больше критической. Самоохлаждение происходит за счет передачи теплоты от нагретого поверхностного слоя вглубь детали. Также используются охлаждающие среды. Если максимальная температура в области, нагреваемой лазерным лучом, не превышает температуры плавления металла, то все фазовые превращения происходят в твердом состоянии и качество механической обработки остается прежним.

Схема лазерной заковки со сканированием представлена на рис. 3.3. Лазерный луч 1, мощностью P_0 проходит через фокусирующую систему 2 формируя сходящийся пучок излучения. Этот пучок посредством колеблющегося зеркала 3 направляется на поверхность изделия 4 где на площади σ формируется пятно диаметром $2r$. Сканирующая система позволяет распределить мощность оптического излучения в пределах площади S (на дорожке шириной $2d$). Согласованные сканирующие колебания зеркала 3 и перемещение заготовки относительно оптической системы со скоростью v позволяют произвести нагрев зоны заковки шириной $2d$ на глубину $Z_{зак}$ до необходимой температуры. Режим заковки со сканированием обеспечивает необходимую глубину упрочненного слоя

при отсутствии на поверхности локальных оплавленных участков. Лазерную закалку применяют для деталей работающих в парах трения, что позволяет значительно повысить износостойкость таких сопряжений.

Лазерное легирование и наплавка. Принципиальным отличием процессов от закалки является изменение химического состава упрочненного слоя. Таким образом на деталях, выполненных из простых конструктивных материалов создаются локальные области с высокими служебными характеристиками, вместо того, чтобы целиком изготавливать их из дефицитных сплавов.

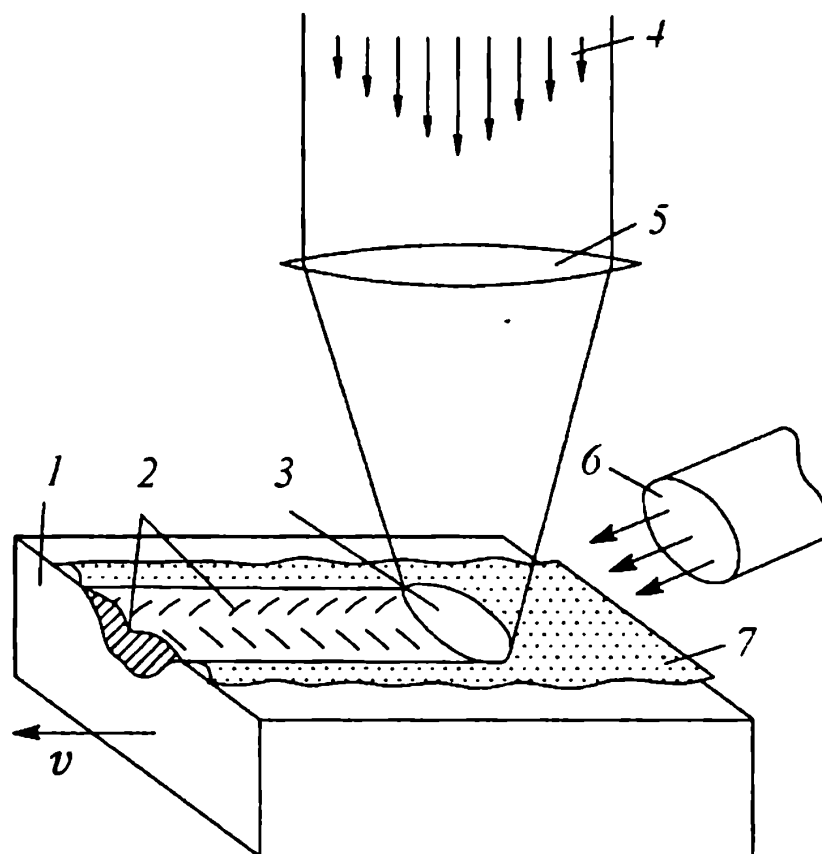


Рис. 3.4. Схема процесса лазерного легирования.

1 – образец, движущийся со скоростью v ; 2 – легированная дорожка; 3 – ванна расплава; 4 – лазерный пучок; 5 – фокусирующая система; 6 – защитный газ; 7 – легирующая обмазка

Оба процесса выполняются по аналогичным схемам и отличаются в основном количеством добавляемого к основному металлу материала. При поверхностном легировании объем легирующей обмазки минимален и слой с модифицированными служебными свойствами формируется за счет основного материала детали и вносимых добавок. При наплавке на поверхности детали может быть создан слой, значительно отличающийся по химическому составу и имеющий толщину, которая влияет в т.ч. на размер изделия.

Схема процесса лазерного легирования показана на рис. 3.4. Образец с тонким слоем легирующей обмазки при движении под лазерным лучом локально оплавляется, легирующие компоненты переходят в объем жидкой ванны металла, которая затем кристаллизуется. При этом происходят взаимосвязанные процессы тепломассопереноса и микрометаллургические процессы.

Селективное лазерное спекание/плавление (СЛП, Selective Laser Sintering - SLS). Технология использует лазер высокой мощности для спекания небольших частиц пластика, керамики, стекольной муки или металла в трехмерную структуру.

Лазерный луч выборочно сплавляет частицы порошка в рабочей зоне, получая данные о форме детали путем сверки с виртуальной моделью, сгенерированной компьютером. После завершения обработки слоя, деталь погружается в порошок и процесс повторяется. Примерно такой же способ используется в лазерной стереолитографии, где рабочим материалом выступает жидкий фотополимер, затвердевающий под лучом лазера.

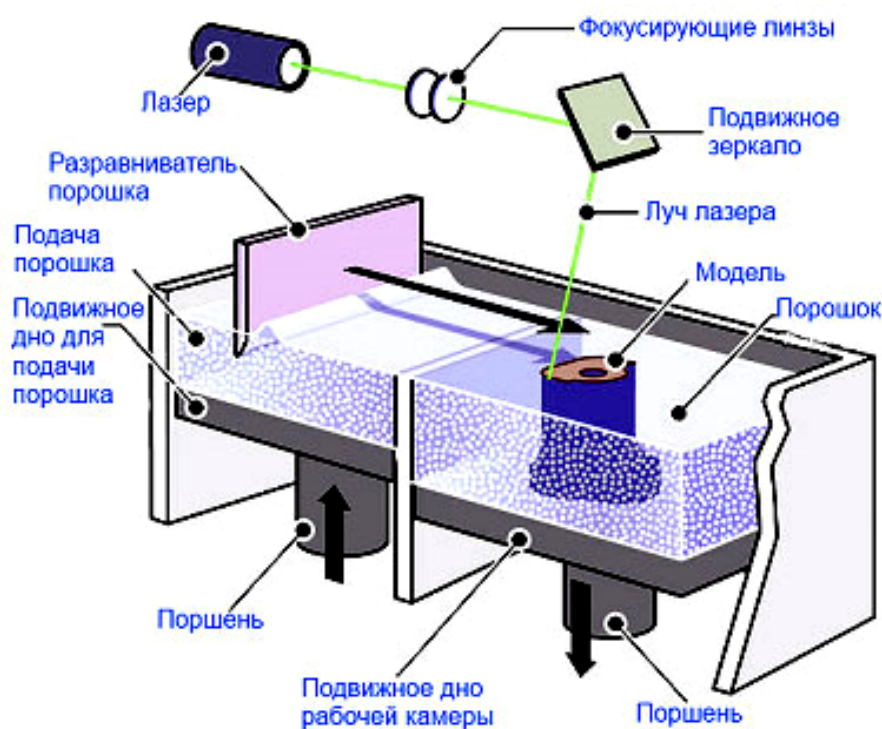


Рис. 3.5 Схема процесса изготовления детали методом селективного лазерного спекания.

Технология СЛП применяется как для быстрого прототипирования, так и для мелко- и среднесерийного производства функциональных изделий (аддитивное производство). Способ позволяет получить объекты сложной геометрической формы и структуры, точно соответствующие модели созданной в САПР, с хорошим качеством поверхности и

механическими свойствами. Для деталей, изготовленных по методу СЛП (SLS) не требуется дополнительная механическая обработка на станках.

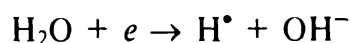
Процесс СЛП определяется большим числом операционных параметров, таких как мощность лазера, скорость, интервал сканирования (шаг перемещения лазерного луча) и стратегия (направление и последовательность перемещения лазерного луча) сканирования, толщина слоя порошка, а также физико-химическими характеристиками материала и грануло-морфометрическими свойствами порошка. Взаимодействие этого множества параметров очень сложное, поэтому важно научное понимание того, как изменение каждого из них влияет на процесс СЛП в целом.

Глава 4. Электрохимическая обработка материалов

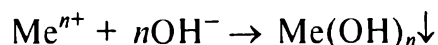
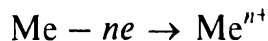
Удаление металла при размерной электрохимической обработке (ЭХО) происходит под действием электрического тока в среде электролита без непосредственного контакта между инструментом и заготовкой. В основе процесса ЭХО лежит явление анодного растворения металлов, которое может протекать в электролитах различного состава, в т.ч. неагрессивных (водных растворах хлорида и нитрата натрия и т.д.). Эти соли дешевы и безвредны для обслуживающего персонала.

Под действием тока в электролите материал анода растворяется и выносится из промежутка потоком электролита. В результате реакций образуются газообразные продукты, которые удаляются в атмосферу. Катод, который служит инструментом, практически не изнашивается, что является одной из положительных особенностей процесса ЭХО.

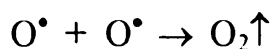
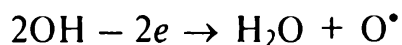
На катоде происходит ускоренное разложение молекул воды с выделением молекулярного водорода:



На аноде справедлива следующая схема перехода металла в нерастворимый гидроксид:



Одновременно образуется молекулярный кислород:



Таким образом, в результате реакции на катоде выделяется газ (водород), на аноде – осадок (гидроксид металла и газ (кислород). Продукты обработки выносятся потоком электролита из промежутка. При

большой силе тока возможны также и другие реакции, в ходе которых на поверхности анода могут образовываться оксиды. Они снижают скорость растворения металла с заготовки и ухудшают ее обрабатываемость.

Способы ЭХО можно классифицировать по различным признакам:

1. По технологическому признаку:

- объемное копирование – обработка, при которой форма рабочей части ЭИ, совершающего прямолинейное движение отображается в заготовке;
- прошивание – обработка при которой ЭИ, углубляясь в заготовку образует отверстие постоянного сечения;
- точение – обработка при вращении заготовки и поступательном движении ЭИ;
- отрезка – разделение заготовки на части;
- контурная обработка непрофилированным ЭИ – обработка сложно-контурной поверхности при последовательно строчном обходе контура ЭИ с простой геометрической формой рабочей части;
- удаление заусенцев и скругление кромок;
- маркирование – нанесение текстовой или графической информации на поверхность;
- струйное прошивание – получение отверстий сформированной струей электролита;
- калибрование – обработка поверхности для повышения ее точности;
- полирование – обработка поверхности в целях снижения высотных параметров шероховатости без изменения размеров заготовки;
- обработка с использованием резистивных масок;
- комбинированные методы обработки с использованием ЭХО и способы на их основе.

2. По виду используемого технологического тока различают обработку на постоянном, переменном, импульсном, асимметричном, биполярном токе.

3. По характеру кодирования информации о форме обрабатываемой детали различают электрохимическое формообразование методом прямого копирования, обката, последовательного строчного обхода по контуру и диэлектрической маски.

4. По характеру функциональной зависимости скорости перемещения электродов от времени принято выделять обработку с неподвижными электродами, постоянной подачей, сложной кинематикой относительного перемещения электродов (наложения вибраций, метод обката).

5. По числу различных механизмов разрушения материала заготовки различают собственно электрохимическую и комбинированную обработку.

Обработка с неподвижными электродами. По этой схеме выполняют безразмерную обработку (электрохимическое полирование); размерное формообразование при высоких плотностях тока, достигаемых

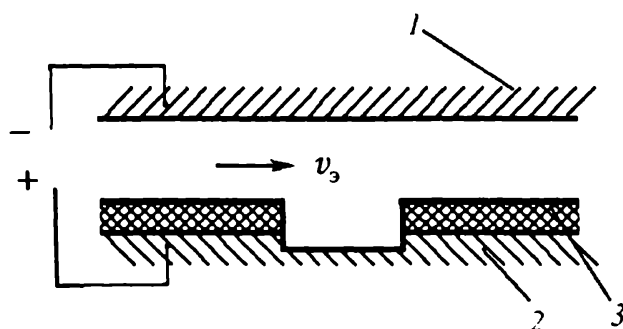


Рис. 4.1 Схема формообразования при неподвижных электродах
1 – электрод-инструмент; 2 – заготовка;
3 – слой диэлектрика

размещением инструмента (катода) и заготовки (анода) на расстоянии десятых и сотых долей миллиметра, за счет локализации процесса (трафаретами, диэлектрическими масками.

Электрод-инструмент 1 (рис. 4.1) не перемещается к обрабатываемой поверхности – межэлектродный зазор по мере съема металла с заготовки 2 возрастает, а скорость прокатки

электролита снижается.

По схеме с неподвижными электродами можно удалять заусенцы в труднодоступных местах, например в сообщающихся каналах топливораспределительной аппаратуры. Процесс растворения заусенцев занимает несколько секунд, при этом происходит снижение шероховатости, что способствует дополнительному уменьшению гидравлического сопротивления.

Обработка с подвижными электродами. При этой схеме межэлектродный зазор поддерживается постоянным путем сближения электродов на глубину, равную толщине удаленного металла. При этом требуются сложные системы регулирования зазора, но удастся поддержать стабильность режима обработки и анодного растворения металла на любой глубине. Это снимает ограничения по величине удаляемого припуска.

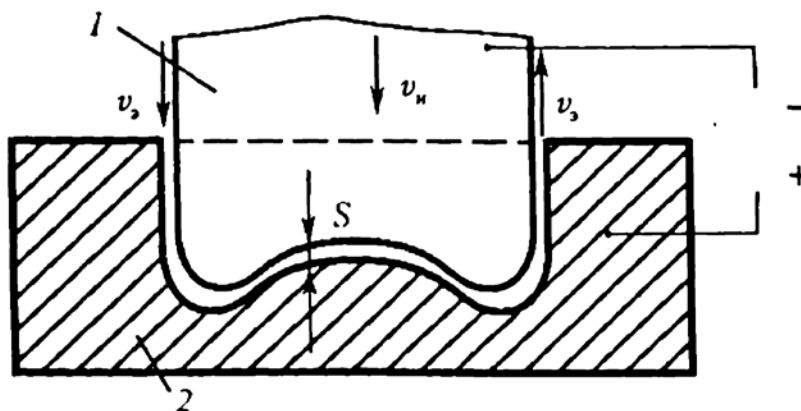


Рис. 4.2 Электрохимическое прошивание
1 – электрод инструмент; 2 - заготовка

При прошивании углублений, полостей, отверстий (Рис. 4.2) электрод инструмент имеет одно рабочее движение. – поступательное перемещение со скоростью v_u к детали 2. Система регулирования зазора поддерживает постоянным межэлектродный зазор S (т.е. удаление припуска происходит в стационарном режиме).

По этой схеме изготавливают рабочие полости ковочных штампов, пресс форм, прошивают отверстия, пазы, перья лопаток турбин, вырезают заготовки различного профиля.

К такой же схеме относят и *получение отверстий струйным методом*. Электрод инструмент состоит из токоподвода 1 (рис. 4.3), омываемого потоком электролита. Токоподвод находится внутри корпуса 3 из изоляционного материала. Электролит создает токопроводящий канал между токопроводом и заготовкой 2. В месте контакта жидкости с обрабатываемой поверхностью материал заготовки растворяется и образуется углубление. По мере увеличения глубины отверстия корпус 3 сближают с заготовкой 2. Процесс идет достаточно быстро только при высоких напряжениях. Так получают отверстия диаметром 1,5 ... 2 мм и вырезают контуры деталей сложной формы.

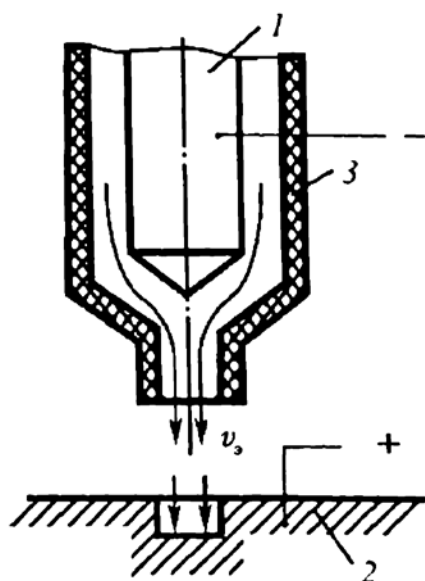


Рис. 4.3. Получение отверстий струйным методом

1 – токоподвод; 2 – заготовка; 3 – диэлектрический корпус инструмента

По схеме прошивания можно одновременно получать несколько плавно сопряженных между собой поверхностей сложной формы. Точное взаимное расположение при этом достигается без использования копировальных устройств.

При большом отношении (больше единицы) площади обрабатываемой поверхности к глубине обработки метод носит название электрохимического копирования (рис. 4.4). К его особенностям относится необходимость в сложных системах электродов инструментов и проектировании системы каналов (щелей и отверстий) для подвода электролита. Этим методом

изготавливают рабочие поверхности лопаток энергетических машин, межлопаточные каналы цельных роторов, гравюры ковочных штампов.

При точении наружных и внутренних поверхностей (рис. 4.5) электрод-инструмент 1 выполняет роль резца, однако в отличие от обработки на токарных станках он не имеет механического контакта с заготовкой 2 а находится от нее на расстоянии S (межэлектродный зазор). Электрод-инструмент может работать по схеме врезания с подачей поперек заготовки со скоростью v_u , продольного точения с подачей вдоль заготовки со скоростью v_u или с одновременным перемещением в обоих направлениях. Межэлектродный зазор может поддерживаться за счет системы регулирования или путем установки диэлектрических прокладок 3 толщиной S , равной величине межэлектродного зазора.

Схему точения (растачивания) можно применять при обработке крайне нежестких заготовок.

Протягивание наружных и внутренних поверхностей (рис. 4.5) выполняется перемещением электрода-инструмента 1 со скоростью v_u вдоль заготовки 2, как правило с предварительно обработанной поверхностью. Инструмент устанавливают относительно заготовки с помощью диэлектриков 3. Протягиванием выполняют чистовую обработку отверстий, нарезание канавок, резьбы, шлицев. Заготовка может иметь прямую или изогнутую ось и различную форму сечения. Причем форма и размеры сечения могут изменяться по длине отверстия.

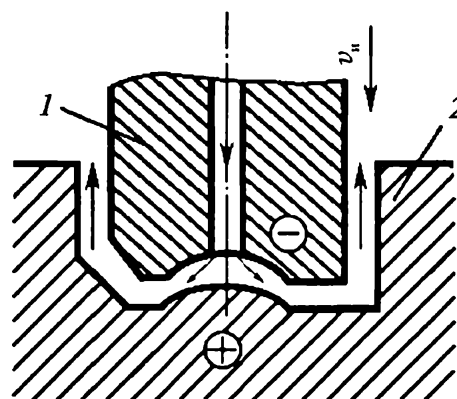


Рис. 4.4. Схема электрохимического копирования

1 – электрод-инструмент; 2 – заготовка

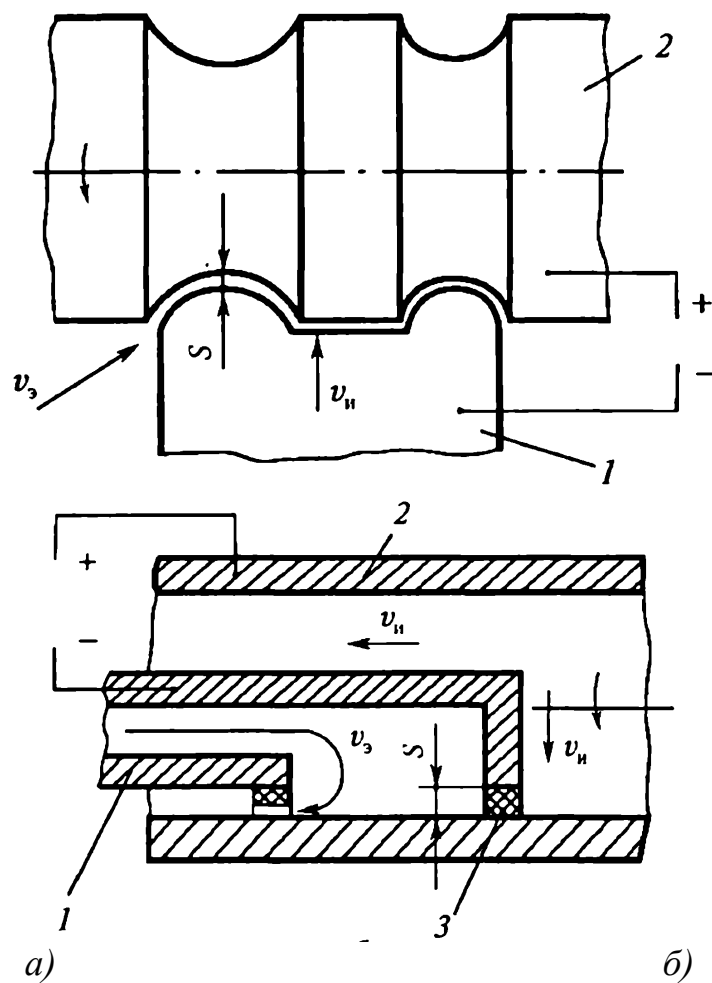


Рис. 4.5 Схема точения наружных (а) и внутренних (б) поверхностей
1 – электрод-инструмент; 2 – заготовка; 3 – диэлектрическая прокладка

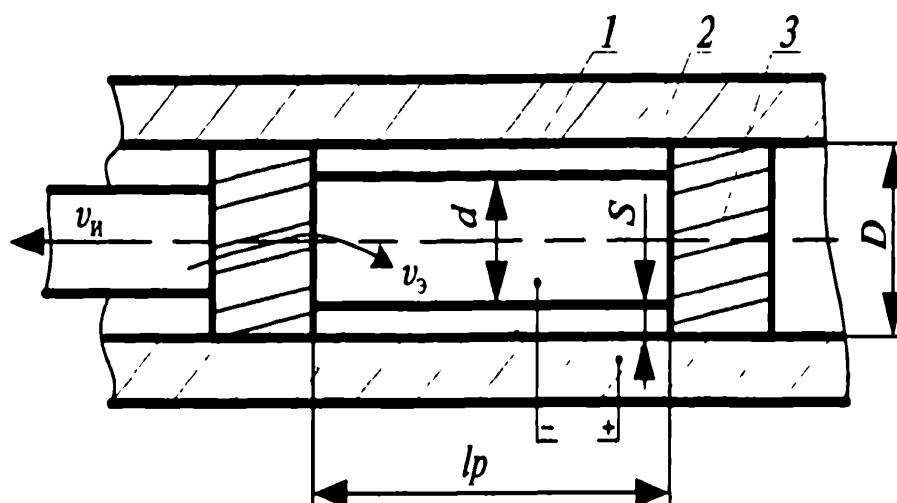


Рис. 4.6 Схема обработки протягиванием
1 – электрод-инструмент; 2 – заготовка; 3 – диэлектрическая прокладка

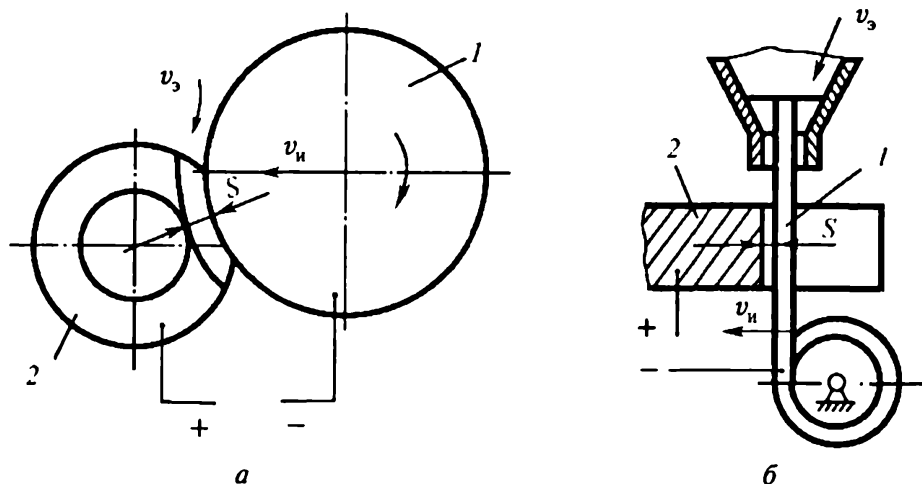


Рис. 4.7 Разрезание заготовок диском (а) и электродом проволокой (б)
1 – электрод-инструмент; 2 – заготовка

Разрезание заготовок можно выполнять прошиванием пластиной, вращающимся диском (рис. 4.7,а) или проволокой (рис 4.7,б).

Электрод-инструмент 1 подают к заготовке 2 со скоростью v_n , поддерживая постоянным межэлектродный зазор S . Заготовка может оставаться неподвижной или вращаться (при обработке диском). Электролит может поступать через сопло поливом или через ЭИ со скоростью v_z . Диск можно разрезать заготовки с плоским торцом, проволокой – получать фасонные профили. Оба инструмента позволяют получать пазы, щели, подрезать пружины и другие нежесткие детали.

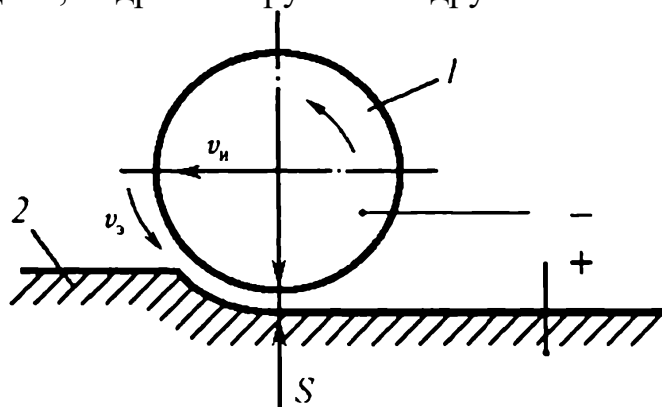


Рис. 4.8 Электрохимическое шлифование
1 – электрод-инструмент; 2 – заготовка

При шлифовании (рис. 4.8) в качестве инструмента используют металлический диск 1, который перемещается вдоль заготовки 2 со скоростью v_n , поддерживаемой регулятором. Электрохимическое шлифование происходит также без контакта инструмента с заготовкой и применяется для чистовой обработки нежестких, хрупких, вязких материалов, пакетов пластин роторов и статоров электродвигателей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абразивная и алмазная обработка материалов: справочник / А.Н. Резников, Е.И. Алексенцев, Я.И. Барац и др. – М.: Машиностроение, 1977. – 392 с.
2. Алаи С.И. и др. Технология конструкционных материалов. М.: Просвещение. 1986. 302 с.
3. Барац Я. И. Математические модели технологической теплофизики и физических взаимодействий / Я.И. Барац, И.А. Маслякова, Ф.Я Барац. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2002. – 90 с.
4. Барац Я. И. Финишная обработка металлов давлением / Я.И Барац – Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1982. – 182 с.
5. Бартл Д., Мудрох О. Технология химической и электрохимической обработки поверхностей. М.: Машиностроение, 1991. 712 с.
6. Бартл Д., Мудрох О. Технология химической и электрохимической обработки поверхностей. М.: Машиностроение, 1991. 712 с.
7. Бернштейн М.Л. Термомеханическая обработка металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1968. Т. 1. 596 с.; Т. 2. 597 с.
8. Грановский Г.И. и др. Резание металлов. М.: Высшая школа, 1985. 304 с.
9. Карслоу Г. Теплопроводность твердых тел / Г. Карслоу, Д.Егер. – М.: Наука, 1964. – 488 с.
10. Колачев Б.А. и др. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1992. 480 с.
11. Корягин С.И., Пименов И.В., Худяков В.К. Способы обработки материалов: Учебное пособие / Калинингр. ун-т – Калининград, 2000. – 448 с. – ISBN 5-88874-152-3.
12. Маслов Е.Н. Теория шлифования материалов / Е.Н Маслов. – М.: Машиностроение, 1974. – 320 с.
13. Материаловедение: учебное пособие / Л.А. Мальцева, М.А. Гервасьев, А.Б. Кутыин – Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2007. 339 с.- ISBN 5-7038-1860-5.
14. Новиков И.И. Теория термической обработки металлов / И.И. Новиков – М. : Металлургия, 1986. 480 с.
15. Обработка конструкционных материалов резанием. М.: Машиностроение, 1987. 300 с.
16. Обработка материалов резанием / Под ред. А.А. Панова. М.: Машиностроение, 1988. 736 с.
17. Основы термической обработки стали / Смирнов М. А., Счастливцев В. М., Журавлев Л. Г. Учебное пособие. Екатеринбург: УрО РАН, 1999. – 494 с.
18. Папшев Д.Д. Упрочнение деталей обкаткой шариком / Д.Д. Папшев. – М.: Машиностроение, 1968. – 143 с.
19. Подураев В.Н. Резание труднообрабатываемых материалов. М.: Высшая школа, 1974. 590 с.
20. Резников А.Н. Теплофизика резания / А.Н. Резников – М.: Машиностроение, 1969. – 288 с.
21. Рыкалин Н.Н. Об условиях расщепления решений линейного параболического уравнения на ортогональные составляющие / Н.Н. Рыкалин // Доклады АН СССР. 1959. Т. 125, №3. С. 519-522.
22. Рыкалин Н.Н. Теория нагрева металла местными источниками теплоты / Н.Н. Рыкалин // Тепловые явления при обработке металлов резанием: сб. науч. тр. – М.: НТО Машпром, 1959. – С. 14-44.

23. Смирнов М.А. Основы термической обработки стали: учебное пособие для вузов / М.А. Смирнов, В.М. Счастливцев, Л.Г. Журавлев – Екатеринбург : УрО РАН, 1999. 495 с.
24. Справочник металлиста. – М.: Машиностроение, 1957. Т. 1. – 604 с.
25. Суворов И.К. Обработка металлов давлением. М.: Высшая школа, 1993. 383 с.
26. Суворов И.К. Обработка металлов давлением. М.: Высшая школа, 1993. 383 с.
27. Тепловые явления при обработке металлов и сплавов давлением / Н.И. Яловой, М.А. Тылкин, П.И. Полухин, Д.И. Васильев – М.: Высшая школа, 1973. – 830 с.
28. Теплообмен при резании и охлаждении инструментов. / А.Н. Резников. – М.: Машгиз, 1963. – 200 с.
29. Физическая энциклопедия. – М.: Большая Российская энциклопедия, 1988. Т. 1. – С. 582.
30. Ящерицын П.И. и др. Основы резания материалов и режущий инструмент. М.: Машиностроение, 1981. 327 с.
31. Ящерицын П.И. и др. Основы резания материалов и режущий инструмент. М.: Машиностроение, 1981. 327 с.

ISBN 978-5-9907992-9-5



Тихонов Денис Александрович
Стекольников Максим Владимирович
Маслякова Инна Анатольевна

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ
ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ**

Учебное пособие

Ответственный за выпуск Тихонов Д.А., Стекольников М.В.
Оригинал-макет Тихонов Д.А., Стекольников М.В..

Подписано в печать _____
Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman. Печать RISO.
Объем _____ Тираж _____ Заказ № _____

413100, Россия, Саратовская область, г. Энгельс, пл. Свободы, 17
ЭТИ (филиал) СГТУ имени Гагарина Ю.А.