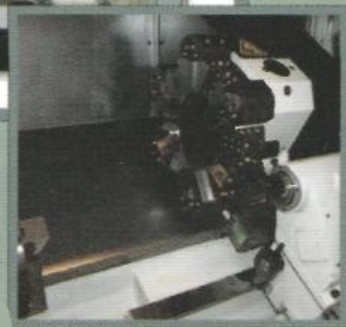
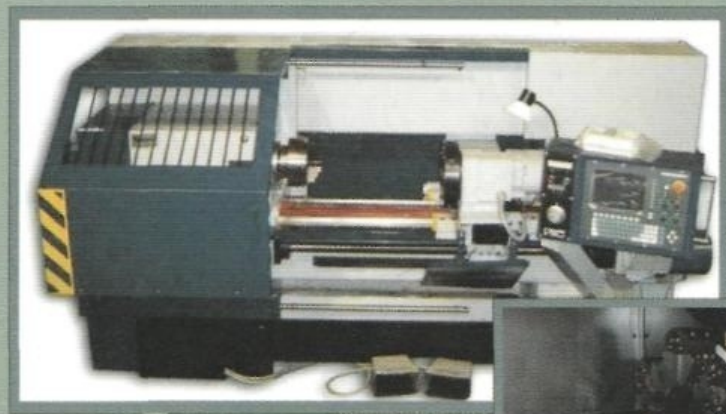


*Можин Н.А.
Аврелькин В.А.
Федулов Е.А.*

Основы теории резания материалов



Иваново 2018

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Ивановский государственный политехнический университет»
(ИВГПУ)

Кафедра технологических машин и оборудования

Можин Н.А., Аврелькин В.А., Федулов Е.А.

Основы теории резания материалов

Учебное пособие

Иваново 2018

УДК 677.052

Можин, Н.А. Основы теории резания материалов : учебное пособие / Н.А. Можин, В.А. Аврелькин, Е.А. Федулов.- Иваново: ИВГПУ, 2018. – 84 с.
ISBN 978-5-88954-250-6

В учебном пособии рассмотрена сущность процесса резания материалов, в частности вопросы выбора режущего инструмента, его конструкции и геометрии, определения параметров режима резания и сил резания.

Научный редактор канд. техн. наук Н.А. Можин

Оглавление:

Введение	3
1. Теория резания как наука. Цели и задачи теории резания	5
2. Основы теории резания	6
3. Усадка стружки, процесс наростообразования	17
4. Износ режущих инструментов	26
5. Основные конструктивные элементы резца	33
6. Силы резания, мощность, работа, тепловые явления в процессе резания	37
7. Инструментальные материалы	49
Литература	65

ВВЕДЕНИЕ

Машиностроение является ключевой отраслью промышленности, так как без использования его возможностей по изготовлению необходимых деталей, изделий, оборудования и т.п. не может обойтись ни одна другая отрасль. Ориентация отечественной промышленности на применение малооперационных, малоотходных и безотходных технологических процессов, на замену в отдельных случаях резания материалов более экономичными методами формообразования не исключают, однако, обработки резанием, которая является и на многие годы останется основным технологическим приемом изготовления деталей машин. Это связано, во-первых, с появлением новых материалов, трудноподдающихся обработке; во-вторых, с усложнением конструктивных форм деталей; в-третьих, с повышением требований к точности и качеству изготовления деталей; в четвертых, с возможностью гибкого управления обработкой резания в отличие от других методов.

Настоящее машиностроение характеризуется широким применением металлорежущих станков с числовым программным управлением и автоматизированных технологических комплексов, работающих по принципу "безлюдной технологии". Для изготовления режущих инструментов используются новые сверхтвердые композиционные материалы, синтетические и природные алмазы.

Современные тенденции развития машиностроения, связанные с автоматизацией производственных процессов, созданием гибких производственных систем и автоматизированных заводов требуют поиска новых подходов к исследованию процесса резания, основанных

на достижениях фундаментальных наук, разработки новых видов обработки резанием, режущих инструментов и станков. Все это невозможно без знания и использования достижений науки о резании материалов.

Учебная дисциплина «Резание металлов» является дисциплиной технологического цикла, формирующей у студентов основы знаний по механической обработке металлов, она является отправным пунктом в изучении таких учебных дисциплин, как «Режущие инструменты», «Оборудование машиностроительного производства» и «Технология машиностроения»; знания по «Резанию металлов» необходимы для осознанного восприятия и оценки всех сопровождающих процесс резания явлений и их влияния на эффективность механической обработки.

1. Теория резания как наука. Цели и задачи теории резания

Теорией резания называется совокупность теоретических представлений о природе и основных физических закономерностях деформирования срезаемого слоя и стружкообразования, изнашивания режущего инструмента, формирования обработанной поверхности детали, а также об оптимизации процесса резания и управлении его параметрами.

Основными целями теории резания являются:

1. Повышение производительности процесса резания за счет применения прогрессивных видов обработки резанием, конструкций инструментов и станков, рациональных режимов резания, эффективных инструментальных материалов, охлаждающих средств и т.д.

2. Повышение точности и качества изделий, полученных путем обработки резанием.

3. Снижение себестоимости выпуска продукции за счет уменьшения расходов, связанных с процессом резания и инструментом.

Для достижения этих целей необходимо решить ряд задач, связанных с изучением:

1. Кинематики процесса резания;
2. Геометрии режущего инструмента;
3. Инструментальных материалов;
4. Деформации и стружкообразования при резании;
5. Сил и колебаний при резании;
6. Тепловых явлений, сопровождающих процесс резания;

7. изнашивания режущих инструментов;
8. точности и качества обработанной поверхности детали;
9. особенностей обработки резанием материалов со специфическими свойствами;
10. функционирования системы резания, ее оптимизации и управления.

Изучение этих вопросов позволяет создавать новые прогрессивные виды обработки резанием и режущие инструменты, разрабатывать методы расчета инструментов, приспособлений и станков, вырабатывать требования к металлургии инструментальных материалов, давать рекомендации по резанию труднообрабатываемых материалов, предлагать пути интенсификации процесса резания за счет комбинации поверхностных и энергетических воздействий на заготовку, оптимизировать параметры обработки и управлять ими.

2. Основы теории резания.

Обработка металлов и других конструкционных материалов резанием на металлорежущих станках - весьма распространенный производственный процесс, назначением которого является придание заготовкам с помощью режущего инструмента правильной геометрической формы, требуемых размеров и чистоты поверхности.

Виды обработки металлов резанием различаются между собой конструкцией используемого режущего инструмента и характером относительных движений, совершаемых инструментом и обрабатываемой заготовкой на металлорежущем станке.

Резанием называется обработка материала, заключающаяся в образовании новых поверхностей путем механического или какого-либо

другого воздействия и последующего отделения части материала (стружки) (рис.1).

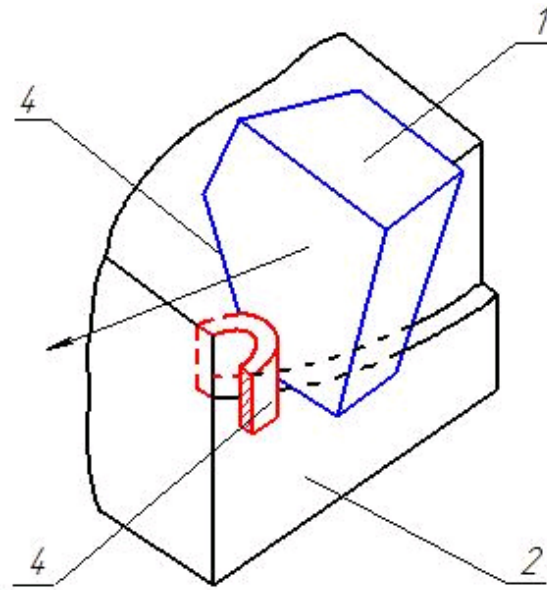


Рис.1. Общая схема обработки резанием:

1 - режущий инструмент; 2-заготовка; 3-стружка; 4-режущая кромка

Обработка резанием является по форме простой, так как для ее осуществления необходимы три основных компонента: режущий инструмент, заготовка и их относительное движение, а по содержанию - сложной, так как она зависит от большого количества величин, называемых параметрами резания.

К параметрам резания относятся: форма и размеры инструмента и заготовки, форма траектории резания, скорость относительного перемещения инструмента и заготовки, степень заглубления инструмента в заготовку, физические характеристики обрабатываемого и инструментального материалов и другие. Эти параметры в процессе резания взаимодействуют и приводят к возникновению взаимосвязанных механических, электрических, тепловых, химических и других явлений, которые обуславливают отделение и формирование

поверхностного слоя обрабатываемой заготовки, а также воздействие на инструмент.

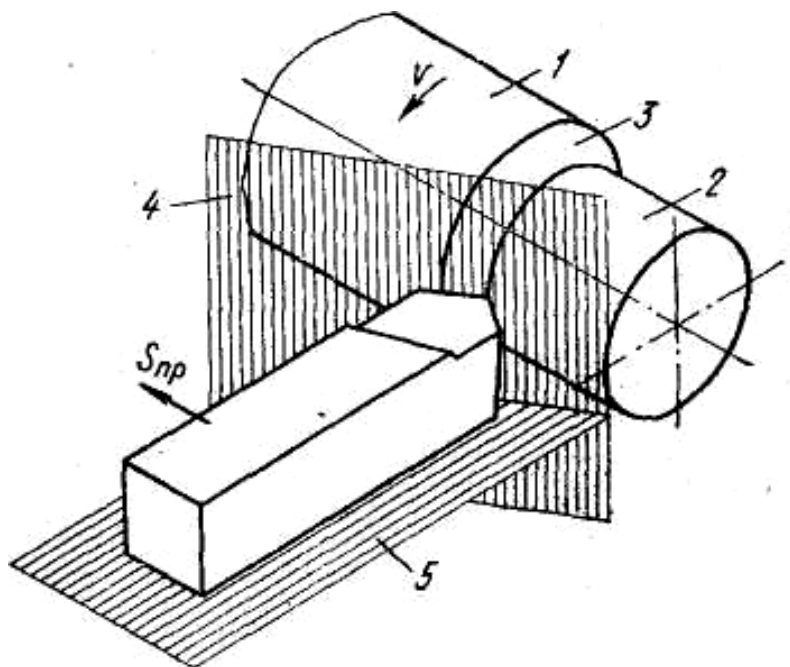
На обрабатываемой заготовке при снятии с нее стружки различают обрабатываемую поверхность 1, с которой срезается стружка; обработанную поверхность 2, с которой срезана стружка; поверхность резания 3, образованную главным режущим лезвием резца (Рис.2).

За координатные плоскости принимают плоскость резания 4, касательную к поверхности резания и проходящую через главное режущее лезвие резца, и основную плоскость 5, параллельную направлениям продольной и поперечной подач.

Величина проникновения лезвия инструмента в металл заготовки во время каждого прохода принято называть *глубиной резания* - t (мм). Значение перемещения резца по ходу обрабатываемой поверхности заготовки за один ее оборот называется – *подачей* - s (мм/об).

Скоростью резания называется скорость перемещения поверхности резания относительно режущей кромки инструмента. Скорость резания можно представить как путь, пройденный режущим инструментом в единицу времени в направлении главного движения по поверхности

резания.



Геометрию срезаемого слоя рассмотрим на примере обтачивания цилиндрической поверхности на токарном станке (рис.4).

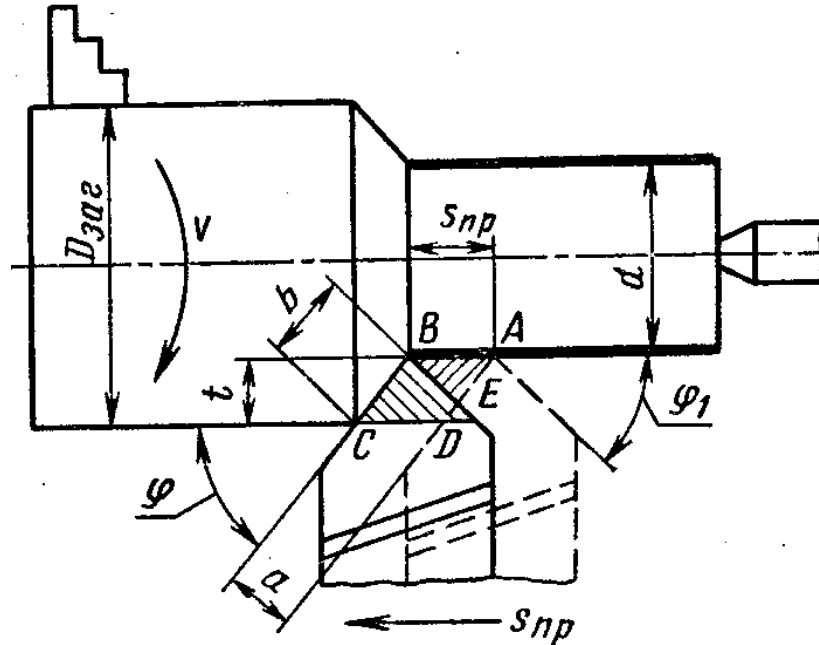


Рис.4. Элемент срезаемого слоя

Резец срезает с заготовки материал площадью поперечного сечения f_{ABCD} , называемой номинальной площадью поперечного сечения срезаемого слоя. Для резцов с прямолинейной режущей кромкой $f_{ABCD} = t \cdot s \text{ мм}^2$.

Форма и размеры номинального сечения срезаемого слоя материала зависят от s и t , углов φ и φ_1 и формы режущей кромки. В процессе резания участвуют одновременно два движения, поэтому траекторией движения вершины резца относительно заготовки будет винтовая линия. Начав резание в точке A , резец вновь встретится с этой образующей цилиндрической поверхности только в точке B . Следовательно, не вся площадь поперечного сечения материала f_{ABCD} будет срезана с заготовки, а только часть ее, и на обработанной поверхности останутся микронеровности.

упрочненного в результате предшествующей деформации. Линия ОВ – представляет собой поверхность, на которой осуществляется окончательная сдвиговая деформация.

Величина угла сдвига β может служить мерой степени пластической деформации срезаемого слоя и зависит от условий резания. Угол сдвига β увеличивается с ростом сопротивления сдвигу обрабатываемого материала в зоне стружкообразования, переднего угла, скорости резания, толщины срезаемого слоя. С увеличением угла β степень пластической деформации уменьшается.

Для того, чтобы уменьшить степень пластической деформации срезаемого слоя, следует увеличить скорость резания и передний угол инструмента. Существенное влияние на протекание пластической деформации оказывают также химический состав и механические свойства обрабатываемого материала, толщина срезаемого слоя, значение переднего угла, скорость резания (рис.6.), свойства режущего инструмента и т.д.

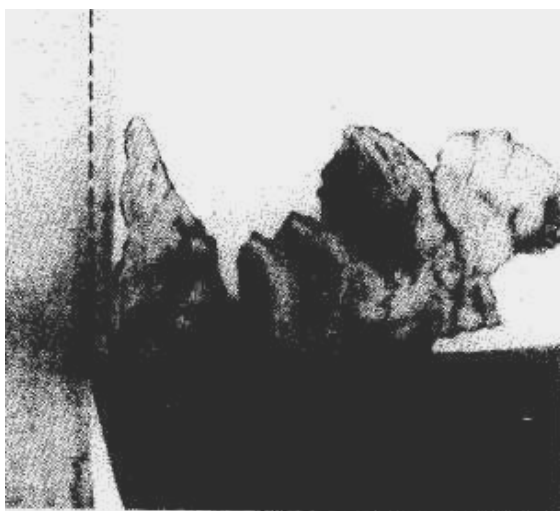
Конкретная задача процесса резания заключается в образовании новой поверхности. Поскольку прочность обрабатываемого материала соизмерима с прочностью материала инструмента, для обеспечения работоспособности инструмента его приходится упрочнять путем увеличения угла заострения до 90° и более. При такой конфигурации инструмента весь срезаемый слой припуска подвергается пластической деформации и превращается в стружку, а сам процесс резания по существу становится процессом пластической деформации всего срезаемого слоя припуска на обработку.

Процесс образования элемента стружки можно разделить на три этапа. На первом этапе происходит упругая и пластическая деформация; будущий элемент стружки упрочняется в зоне стружкообразования. На

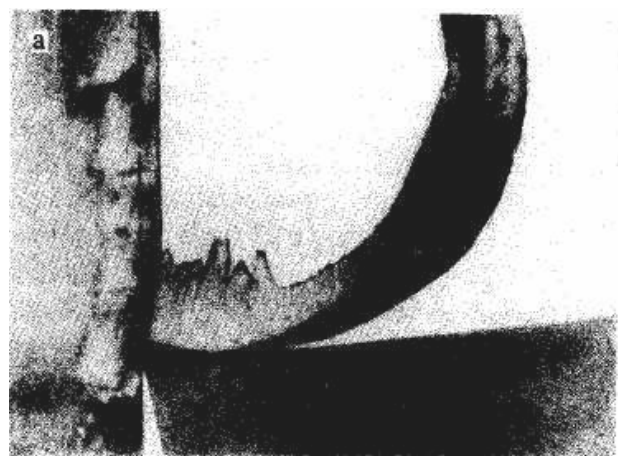
втором этапе элемент стружки сдвигается по плоскости сдвига. Это происходит в тот момент, когда напряжение в срезаемом слое превышает сопротивление сдвигу. Третий этап заключается в дополнительной пластической деформации образовавшегося элемента стружки при его движении по передней поверхности инструмента. В зависимости от свойств обрабатываемого материала и условий резания образуются три вида стружек.

Сливная стружка имеет вид сплошной ленты с гладкой внутренней (прирезцовой) и шероховатой внешней поверхностями. На поверхности стружки не видно границ между элементами стружки.

Суставчатая (скальвания) стружка – образуется при обработке твердых материалов. Прирезцовая поверхность стружки в этом случае также гладкая, а на внешней поверхности видны зазубрины.



а)



б)

Рис.6. Зависимость скорости резания на стружкообразование.

а) – 5 м/мин; б) – 25 м/ми.

Стружка надлома (элементная) образуется при обработке хрупких материалов и состоит из отдельных элементов случайной формы, не связанных между собой.

Сливную и суставчатую стружку называют стружками сдвига, так как их образование связано с напряжениями сдвига. Стружку надлома иногда называют стружкой отрыва, так как ее образование вызвано напряжениями растяжения.

Вид образующейся стружки зависит от многих факторов, таких как, например, свойства внешней среды, в которой осуществляется резание, величины переднего угла инструмента и других факторов.

На рис.7, где представлена микрофотография корня стружки скалывания в главной секущей плоскости и на рис.8. с микрофотографией корня сливной стружки. Обратите внимание на то, что в стружке скалывания четко видны ее отдельные элементы.



Рис.7. Фотография корня стружки скалывания

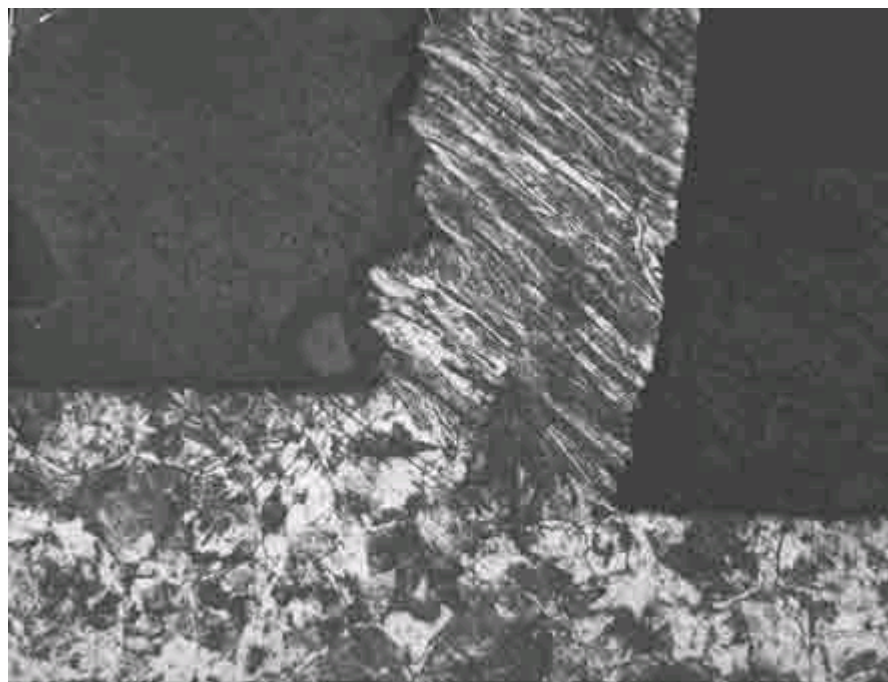


Рис.8. Фотография корня сливной стружки

Размеры скалываемых элементов зависят от физико-механических свойств обрабатываемого материала, толщины среза, величины переднего угла и угла скалывания, величина которого сильно зависит от свойств внешней среды, в которой осуществляется резание.

При внимательном рассмотрении корня сливной стружки можно увидеть, что отдельные ее элементы, деформированы (вытянуты) в направлении, не совпадающем с положением плоскости скалывания, расположенной под углом.

На фотографиях корней стружек можно видеть так же, что в прирезцовой части стружки (особенно хорошо видно на рис.8) деформация не имеет строго выраженного направления, прирезцовые слои металла вытянуты в направлении, параллельном передней поверхности инструмента. Такая вторичная деформация срезаемого слоя происходит из-за сильного трения на передней поверхности, в зоне контакта ее с прирезцовой поверхностью уже образовавшейся стружки.

При резании материалов средней пластичности на средних скоростях резания образуются стружки скалывания, при резании мягких пластичных материалов или тех же, но на больших скоростях резания образуются сливные стружки.

Признаком стружек скалывания является наличие различимых на глаз крупных элементов. Скалывание элементов не приводит к разрушению металла, стружка представляет собой прочное тело из крепко соединенных друг с другом элементов.

Сливная стружка представляет собой сплошную ленту, в которой отдельные ее элементы не вооруженным глазом трудно различимы и не просматриваются. В отличие от процесса образования стружек

скалывания, в сливных стружках деформация смятия происходит одновременно со сдвигом элементов.

При резании хрупких металлов образуются стружки надлома. Резец, внедряясь в металл, не сдвигает его, а сжимает и вырывает сжатый надломленный элемент. Разрушение идет по поверхности, произвольно охватывающей напряженную зону, поэтому обработанная поверхность получается неровной.

Контрольные вопросы:

1. В чем сущность технологии обработки металлов резанием?
2. Обозначить основные параметра процесса резания?
3. Какие явления пластической деформации образуются при резании металлов и факторы оказывающие на нее влияние?
4. Что называется стружкой и каков механизм ее образования?
5. Какие виды стружек Вам известны?
6. Что оказывает влияние на формирование того или иного вида стружки?

3. Усадка стружки, процесс наростообразования

Степень пластической деформации металла в процессе стружкообразования принято оценивать усадкой стружки, т.е. сопоставлением продольных и поперечных размеров срезаемого слоя и стружки, образовавшейся после срезания этого слоя. Пластическая деформация, состоит в непрерывном последовательном перемещении элементарных объемов массы металла в направлении плоскостей сдвига. В результате пластического деформирования металла в процессе стружкообразования (рис.9) длина l_0 срезанной стружки меньше длины $l_{стр}$ срезанного слоя, а толщина $a_{стр}$ и ширина $b_{стр}$ стружки, наоборот,

больше толщины a_0 и ширины b_0 срезаемого слоя. Таким образом, продольная усадка стружки $\xi = l_{cmp}/l_0 \leq 1$; поперечная усадка стружки $\xi = a_{cmp}/a_0 \geq 1$; уширение стружки $\xi = b_{cmp}/b_0 \geq 1$. Количественно усадка оценивается коэффициентом усадки стружки, который отражает величину пластической деформации, имевшей место при резании. Поэтому при исследовании влияния какого-либо фактора на процесс резания часто прибегают к оценке этого влияния по изменению величины коэффициента усадки стружки.

Степень пластической деформации металла в стружке принято оценивать коэффициентом усадки K_1 – величиной, обратной продольной усадке ξ_l

$$K_1 = l_{cmp}/l_0 = 1/\xi_l > 1. \quad (1)$$

Величина коэффициента усадки стружки зависит от свойств обрабатываемого материала, геометрии режущего лезвия инструмента, свойств внешней среды, в которой осуществляется резание, и других факторов. Из элементов режима резания менее всего на усадку, величину коэффициента усадки, влияет глубина резания, сильнее – подача и наиболее сильно скорость резания: с увеличением скорости усадка уменьшается. При резании углеродистых сталей коэффициент усадки стружки находится в пределах $2 \div 3$. При резании трудно обрабатываемых материалов, таких как жаропрочные и титановые сплавы, коррозионостойкие стали и другие, иногда наблюдается «отрицательная» усадка, при которой толщина стружки меньше толщины срезаемого слоя.

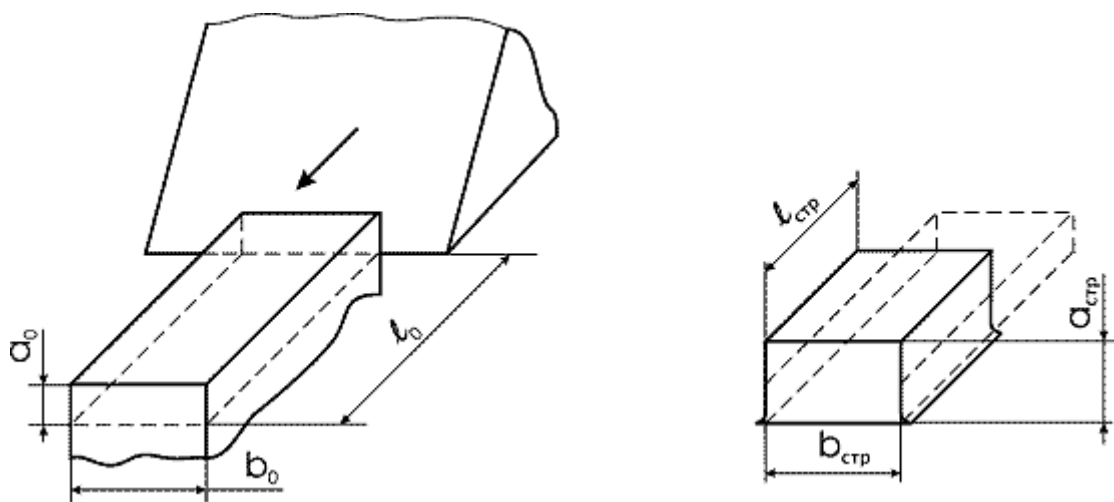


Рис.9. Усадка стружки

Процесс наростообразования. Наростообразование характерно для вязких материалов в случае обработки их с малыми скоростями и малыми подачами. С ростом переднего угла наростообразование резко уменьшается.

Так, при обработке материалов в определенном диапазоне скоростей резания на передней поверхности инструмента вблизи режущего лезвия появляется нарост в виде бугорка клиновидной формы. Он представляет собой упрочненную часть обрабатываемого материала, претерпевшие большие пластические деформации и приваренного к резцу. Первоначально на поверхности контакта стружки с передней поверхностью происходят точечные контакты с образованием налипов на передней поверхности. С течением времени число таких налипов растет и они покрывают площадь контакта сплошной тонкой пленкой из обрабатываемого материала, которая называется первослоем. Поскольку этот первослой обладает абсолютным сцеплением с обрабатываемым материалом, акты схватывания между ними происходят чаще и интенсивнее с

образованием более крупных наслоений. Схватывание и наслаивание микрообъемов обрабатываемого металла на переднюю поверхность инструмента приводит к образованию на ней слоя упрочненного микролегированного материала, прочно соединенного с инструментом.

В процессе резания эти образования находились в непосредственном контакте с опорной передней поверхностью и главной режущей кромкой лезвия резца. В момент прекращения процесса резания при быстром откидывании резца клиновидные образования теряют контакт с лезвием резца и остаются достаточно прочно соединенными с корнем стружки. При больших скоростях резания и больших значениях подач клиновидные образования отсутствуют. Возникающие в процессе резания клиновидные образования на передней поверхности лезвия резца получили название *наростов* (рис.10). Нарост состоит из основания и вершины. Вершина является неустойчивой частью нароста, она, по мере увеличения высоты нароста, разрушается и уносится из зоны стружкообразования, сходящей по ней стружкой.

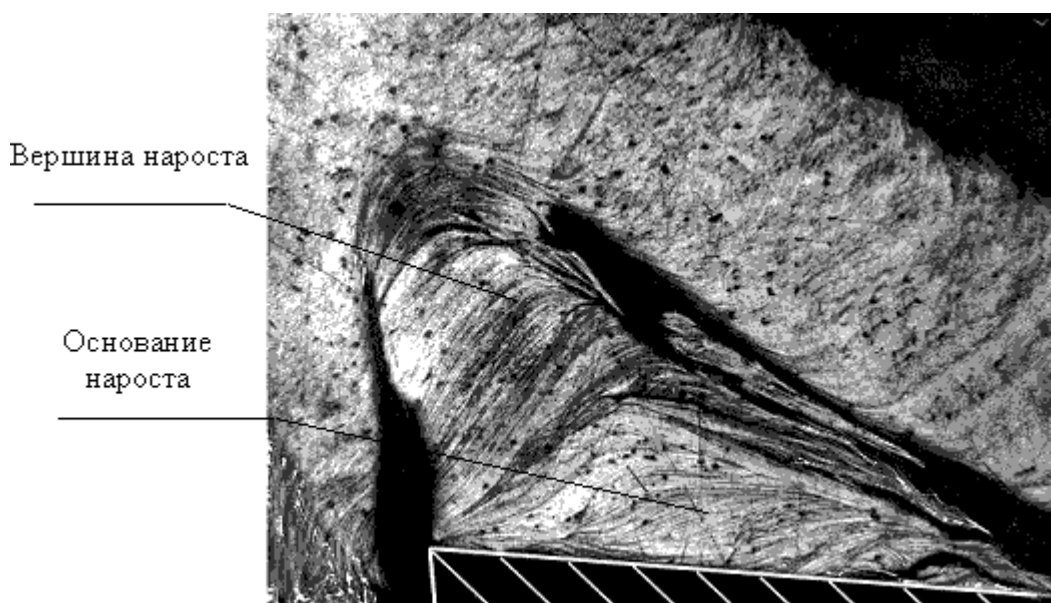


Рис.10. Строение нароста

Образование наростов при резании конкретного металла зависит от режимов резания, а точнее от соотношения подачи и скорости резания. С увеличением скорости резания до некоторого значения, нарост начинает появляться и расти, после которого он заметно уменьшается. С увеличением толщины срезаемого слоя и угла резания нарост увеличивается, т.к. меньше становится скорость резания.

Из параметров режима резания на интенсивность образования, размеры и форму нароста наиболее сильно влияет скорость резания. На очень малых скоростях резания нарост не удерживается на передней поверхности инструмента, из-за мелко-элементной сыпучей стружки с увеличением скорости интенсивность образования нароста возрастает лишь до какого-то значения скорости, после которого интенсивность его образования и размеры начинают уменьшаться.

Поскольку нарост образуется из сильно деформированного металла, твердость которого намного больше твердости исходного обрабатываемого, то и нарост в целом имеет высокую твердость, в 2...3 раза превосходящую твердость обрабатываемого материала. Наличие высокой твердости позволяет наросту успешно противостоять воздействию стружки и выполнять работу самого режущего инструмента. Он служит продолжением инструмента и принимает на себя его функции. Химический и микроструктурный анализы нароста показали, что в составе нароста задерживается наиболее сильно упрочняющаяся перлитная структурная составляющая обрабатываемого материала, которая и обеспечивает высокую твердость нароста.

На рисунке 11 изображена зависимость высоты нароста от скорости резания. На рисунке 12 зависимость высоты нароста от

главного угла в плане. Наличие нароста в зависимости от подачи и скорости резания изображено на рисунке 13.

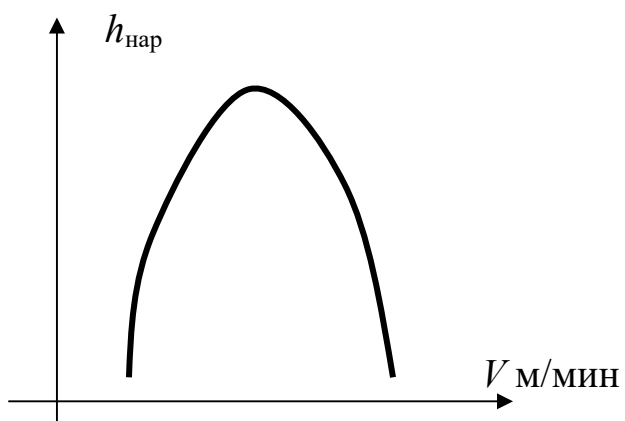


Рис.11.

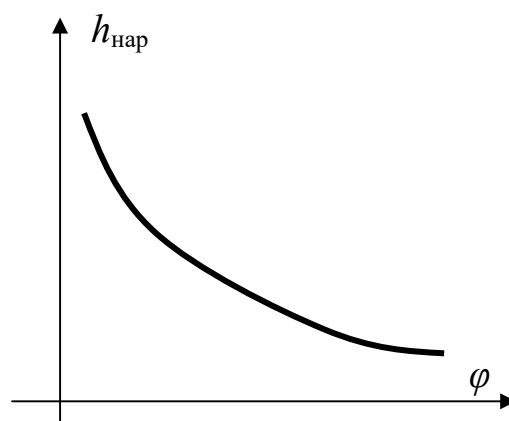


Рис.12.

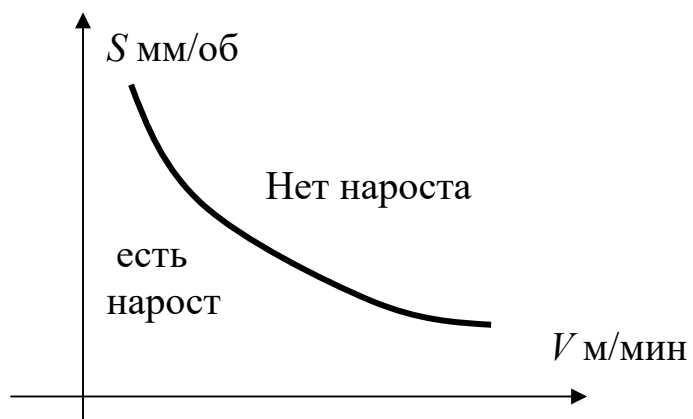


Рис.13.

Положительные особенности нароста:

1. Нарост берет на себя часть работы по срезанию металла;
2. Защищает переднюю поверхность и режущую кромку от износа;
3. Улучшает условия по отводу стружки, т.к. увеличивает передний угол;
4. Снижает перепад температуры на режущей кромке.

Отрицательные особенности нароста:

1. Снижает точность обработки;
2. Снижает качество поверхности;
3. Вероятностный характер процесса наростообразования не позволяет управлять этим процессом.

Нарост на режущем инструменте образуется не всегда, а только в тех случаях, когда условия резания благоприятствуют этому. Необходимыми условиями существования нароста являются следующие:

- обрабатываемый материал должен обладать способностью упрочняться при пластическом деформировании;
- температура в зоне резания должна быть ниже той температуры, при которой происходит разупрочнение материала нароста;
- должна образовываться сливная стружка. При образовании стружек скалывания нарост не удерживается на передней поверхности вследствие прерывистости процесса резания;
- коэффициент трения в зоне контакта обрабатываемого материала с передней поверхностью должен быть больше единицы.

Материал под поверхностью резания оказывается пластически деформированным, в нем появляются остаточные напряжения,

уравновешивающиеся внутри объема металла под поверхностью резания.

Физико-механические свойства поверхностного слоя под обработанной поверхностью существенно влияют на эксплуатационные качества деталей машин.

Важнейшими показателями состояния поверхностного слоя являются степень наклепа и толщина наклепанного слоя (рис.14), а также величина, знак и глубина зоны остаточных напряжений. Тонкий поверхностный слой обрабатываемой заготовки деформируется в зоне стружкообразования. Дополнительная деформация этого слоя происходит в результате «обкатки» закругленным лезвием режущего инструмента и эффекта упругого восстановления металла под задней поверхностью.

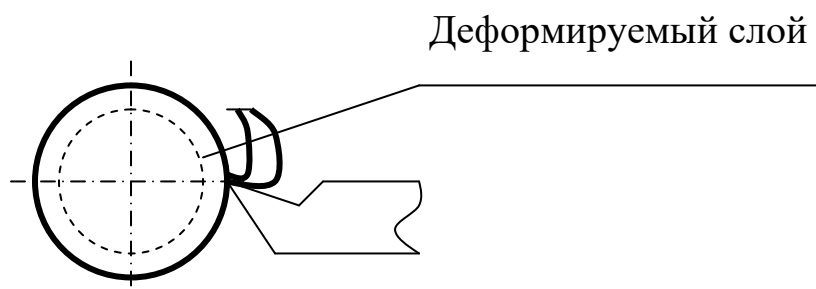


Рис.14. Деформация в процессе резания

Элементарные объемы металла теперь не только деформируются вдоль плоскостей сдвига, но также сжимаются, растягиваются и изгибаются под действием режущей кромки.

В результате упруго-пластической деформации обработанной поверхности образуется тонкий слой упрочненного (наклепанного) металла твердость которого в 1,5-2 раза больше, чем твердость исходного металла.

Степень наклепа и толщина наклепанного слоя находятся в прямой зависимости от степени деформации срезаемого слоя и действующих сил резания.

В результате упруго-пластического деформирования металла в слое под обработанной поверхностью возникают остаточные напряжения, величина и знак которых зависят от силового поля, создаваемого силами резания, нагрева материала обрабатываемой детали и структурных превращений. На рис.15 приведена эпюра остаточных напряжений возникающих при обработке пластичных материалов.

В очень тонком слое 0,001 – 0,004 мм (зона I) действуют сжимающие напряжения. Протяженность этой зоны и величина сжимающих остаточных напряжений возрастают с увеличением угла резания, толщины срезаемого слоя, уменьшения заднего угла и скорости резания.

В зоне II действуют растягивающие напряжения. Ее протяженность обычно почти в 10 раз больше протяженности зоны I, и поэтому состояние поверхностного слоя определяют величина и характер напряжений в зоне II. В зоне III действуют сжимающие напряжения.

Остаточные растягивающие напряжения в поверхностном слое обработанной детали снижают усталостную прочность, способствуют образованию микротрещин.

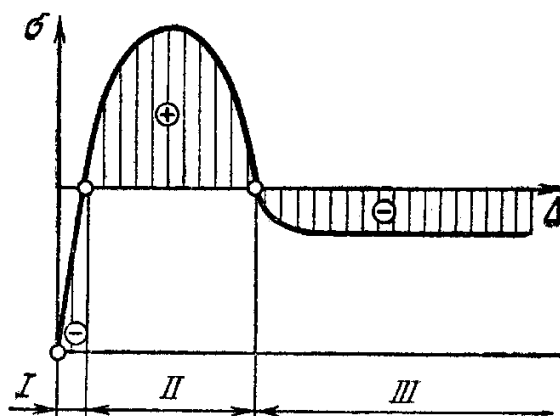


Рис.15. Зоны действующих напряжений в заготовке

Поэтому для получения поверхностного слоя с высокими эксплуатационными свойствами необходима дополнительная чистовая обработка. Изменяя условия резания, можно снизить протяженность и величину растягивающих остаточных напряжений в зоне II.

При увеличении скорости резания абсолютная величина остаточных напряжений увеличивается, но величина зон уменьшается. С увеличением подачи растет величина растягивающих напряжений и протяженность зоны II. С увеличением износа инструмента растет величина растягивающих остаточных напряжений и зона II.

Степень упрочнения и глубина деформации зависят от толщины среза, скорости резания, геометрии режущего инструмента, свойств обрабатываемого материала и других факторов.

Контрольные вопросы:

1. Что такое усадка стружки и какими параметрами она оценивается?
2. В чем сущность процесса наростообразования?
3. Какие основные факторы оказывают влияние на процесс формирования нароста?
4. Что по Вашему мнению положительного и отрицательного в наросте?

5. Каким образом влияют на эксплуатационные качества деталей машин физико-механические свойства поверхностного слоя обработанной поверхности детали?

4. Износ режущих инструментов.

Режущий инструмент в процессе резания воздействует на обрабатываемый материал и вызывает образование стружки и формирование новой поверхности, однако сам при этом подвергается воздействию со стороны обрабатываемого материала и интенсивно изнашивается. Режущие инструменты работают в чрезвычайно тяжелых условиях действия громадных давлений на поверхностях контакта и высокой температуры.

Износостойкость режущей части инструмента характеризуется его способностью сопротивляться микроскопическим разрушениям на поверхностях контакта со стружкой и заготовкой.

Контактное нагружение рабочей поверхности инструмента создает сложное напряженное состояние, способствующее протеканию пластической деформации в поверхностных микрообъемах даже у прочных и твердых материалов режущих инструментов. Пластическая деформация является основным, первичным процессом изнашивания режущего инструмента. Одним из способов повышения его износостойкости является повышение сопротивления пластическим деформациям путем увеличения твердости материала режущей части инструмента.

Характер износа режущего инструмента, то есть распределение его по рабочим поверхностям инструмента, зависит от многих конкретных условий, в которых производится резание. Износ режущего инструмента выражается в появлении лунки на передней поверхности, площадок износа на главной и вспомогательной задних поверхностях и в уменьшении вылета вершины резца или режущего лезвия иного инструмента.

Различают следующие основные виды износа:

Абразивный износ - механическое истирание, царапание инструмента твердыми частицами обрабатываемого материала, которые часто обладают твердостью, соизмеримой с твердостью материала инструмента.

Этот вид износа преобладает при относительно небольших скоростях резания и при обработке хрупких материалов и происходит, как правило, по задней поверхности инструмента. Высоким сопротивлением абразивному износу обладают ванадиевые быстрорежущие стали, твердые сплавы с малым содержанием кобальта, минералокерамические твердые сплавы. Истирающая способность углеродистых сталей растет с увеличением содержания углерода, а легированных сталей - с увеличением содержания карбидов хрома, вольфрама, марганца и т. д.; чугунов - при увеличении содержания в структуре цементита, фосфидов и т. д.

Адгезионный износ - результат непрерывно протекающих процессов схватывания (холодного сваривания) материала стружки и инструмента на выступающих участках площади контакта между ними и последующего отрыва мельчайших частиц материала инструмента, уносимых со стружкой.

Высоким сопротивлением адгезионному износу обладают более теплостойкие инструментальные материалы, у которых снижение твердости наступает при более высоких температурах резания, а также материалы инструментов, обладающие высокой циклической прочностью.

Значительное снижение интенсивности адгезионного износа достигается применением СОЖ с активными добавками, когда на контактной поверхности появляются прочные пленки, препятствующие схватыванию.

Диффузионный износ наблюдается при температурах контактной поверхности инструмента 900-1100° С. При этом происходит взаимная диффузия материала инструмента и обрабатываемого материала. Инструменты из углеродистых, легированных и быстрорежущих сталей не подвергаются диффузионному износу, так как их теплостойкость ниже температуры начала диффузионного растворения.

Окислительный износ. При температурах резания 700-800°С кислород воздуха вступает в химическую реакцию с кобальтовой связкой твердого сплава и карбидами WC и TiC.

Вследствие значительной пористости твердых сплавов окислительным процессам подвергаются не только контактные поверхности, но и зерна, лежащие на глубине. В результате окислительного процесса нарушается монолитность сплава, ослабляются связи между зернами и создаются благоприятные условия для их вырывания силами трения. Интенсивность и скорость окисления увеличиваются с повышением содержания кобальта.

Хрупкий (скачкообразный) износ заключается в скалывании, выкрашивании макрочастиц инструментального материала. Этот вид износа наблюдается при прерывистых процессах резания, когда

циклически повторяющиеся «пики» температур и контактных напряжений создают динамическую нагрузку на инструмент.

Износ протекает по задней поверхности инструмента, по передней поверхности (рис. 16, а), либо одновременно по задней и передней поверхностям (рис. 16,б). В первом случае — на задней поверхности режущего лезвия — появляется площадка с глубокими канавками, расположенными перпендикулярно к режущему лезвию; количественно величина износа оценивается максимальной высотой площадки h_3 . Обработка металлов на тяжелых станках обычно ведется с большими подачами $S = 1$ мм/об. Работа с большими подачами характеризуется увеличением размеров контактных площадок, давления и силы трения, а также высокой температуры. Под действием этих факторов в процессе резания устанавливаются условия, когда интенсивность изнашивания передней поверхности выше, чем задней.

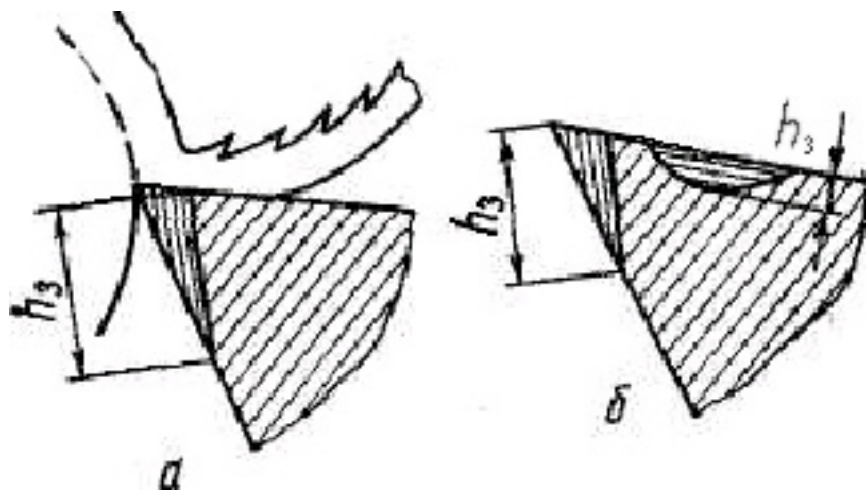


Рис.16. Износ задней и передней поверхности режущего инструмента.

При окончательной чистовой обработке различают также радиальный или размерный износ, в результате которого вершина резца смещается в направлении, перпендикулярном к обработанной поверхности, и размер обработанной детали изменяется.

Оптимальной величиной износа считают такую величину, при которой суммарный период стойкости достигает максимума, а шероховатость поверхности и отклонения размеров детали от заданных не выходит за пределы, указанные на чертеже детали.

На протяжении всего времени резания изнашивание непрерывно продолжается и размеры видимых признаков износа лезвий увеличиваются. В зависимости от условий резания видимые признаки износа находятся на разных участках лезвий инструментов.

Для количественной оценки износа режущего инструмента используются линейную меру износа. Измерение износа поверхностей производят с помощью лупы, оснащенной шкалой.

Когда износ задних поверхностей лезвий достигает установленного допустимого значения максимального линейного износа h_{3max} , дальнейшую работу этим инструментом прекращают.

Виды износа режущего клина представлены на рисунке 17. Износ по задней поверхности в виде площадки износа, которая характеризуется высотой износа h_3 . Износ по передней поверхности в виде лунки имеющей параметры: b – длина лунки, a – ширина лунки, h_3 – глубина лунки.

На рисунке 18. показана зависимость величины износа от времени. Участок I – приработки, далее следует период нормального износа (участок II) и затем интенсивность износа резко возрастает и наступает период катастрофического износа (участок III).

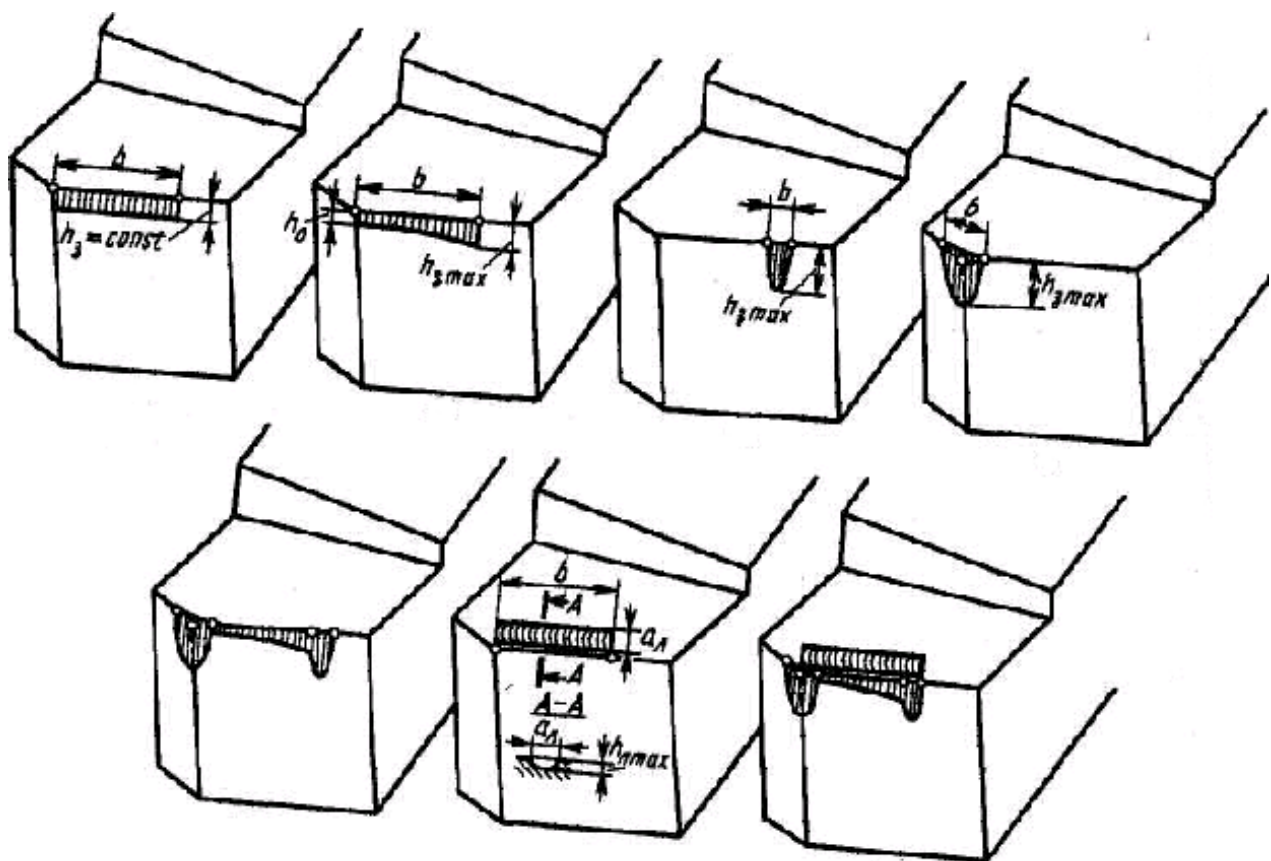


Рис.17. Износ элементов резца

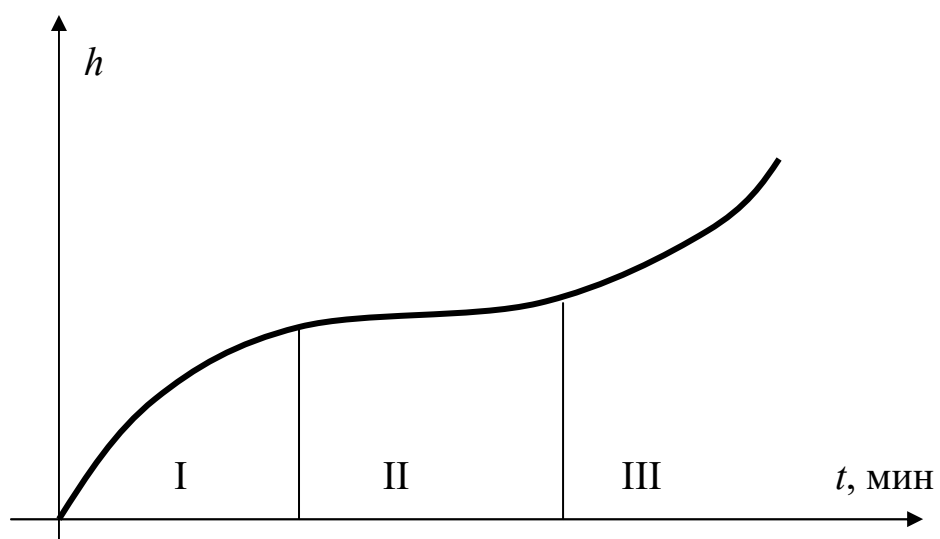


Рис.18.

Когда конструкция инструмента предусматривает применение многогранных сменных пластинок, восстановление режущих свойств инструмента производят их поворотом на следующую грань. Норма износа многогранных пластинок равна значению допустимого максимального линейного износа каждой ее вершины. Если конструкция инструмента предусматривает восстановление его режущих свойств посредством повторных переточек, нормой износа инструмента является нормированная толщина стачиваемого слоя. Толщину рассчитывают, исходя из требования полного удаления следов износа, а также дополнительного слоя, в пределах которого возможно снижение твердости и других механических свойств, происходящее вследствие нагрева до высоких температур в процессе резания.

Стойкость инструмента. Время непрерывной работы инструмента на постоянных режимах резания до заданной (оптимальной) величины износа называют периодом стойкости T .

При прочих равных условиях период стойкости инструмента уменьшается с увеличением скорости резания v , подачи S и глубины резания t :

$$T = \frac{C}{v^n S^{n_1} t^{n_2}}, \quad (2)$$

где C – постоянная величина, характеризующая влияние всех прочих параметров на период стойкости; n , n_1 , n_2 – показатели относительной стойкости.

С увеличением скорости резания сокращается основное технологическое время, но уменьшается период стойкости, и поэтому необходимо чаще менять износившийся инструмент, возрастают расходы на инструмент. Оптимальный период стойкости выбирается из условий минимальной себестоимости операции и наибольшей

производительности. Чтобы стойкость инструмента оставалась неизменной при увеличении скорости резания, используют современные износостойкие материалы, применяют режущий инструмент с оптимальной геометрией, а также эффективные СОЖ. В целом все это существенно удорожает механическую обработку и ограничивает ее эффективность. Поэтому, задача уменьшения интенсивности изнашивания режущих инструментов и увеличения срока его службы была и остается одной из главных задач металлообработки.

Контрольные вопросы:

1. Какие факторы, определяют интенсивность изнашивания инструмента?
2. Чем характеризуется износостойкость инструмента?
3. Какие основные факторы оказывают влияние на износ режущей части инструмента?
4. Основные виды износа?
5. Как характеризуется величина износа от времени работы инструмента?
6. Что такое стойкость инструмента?
7. Каким образом можно увеличить стойкость инструмента?

5. Основные конструктивные элементы резца

Разные инструменты имеют различную форму зажимной и режущей частей, однако их режущие части имеют общее устройство и ограничиваются рабочими поверхностями, присущими режущей части любого инструмента. Токарный прямой проходной резец (рис.19) имеет – рабочую часть I (головка) и тело – стержень II, который служит для

закрепления резца в резцедержателе. Головка резца образуется при заточке и имеет следующие элементы: переднюю поверхность 1, по которой сходит стружка; главную заднюю поверхность 2 обращенную к поверхности резания заготовки; вспомогательную заднюю поверхность 5, обращенную к обработанной поверхности заготовки; главную режущую кромку 3 и вспомогательную 6, вершину 4. Инструмент затачивают по передней и задним поверхностям. Для определения углов, под которыми расположены поверхности рабочей части инструмента относительно друг друга, вводят координатные плоскости (рис.20).

Для рассмотрения геометрических параметров режущей части инструмента устанавливаются системы координатных плоскостей и сами координатные плоскости: плоскость резания и основная плоскость. Для контроля режущего инструмента применяется инструментальная система координат с началом в вершине лезвия, ориентированная относительно геометрических элементов режущего инструмента, принятых за базу.

Статическая система координат – прямоугольная система координат с началом в рассматриваемой точке режущей кромки, ориентированная относительно направления скорости главного движения резания.

Кинематическая система координат – прямоугольная система координат с началом в рассматриваемой точке режущей кромки, ориентированная относительно направления скорости результирующего движения резания.

Основная плоскость (ОП) - плоскость, параллельная направлениям продольной и поперечной подач.

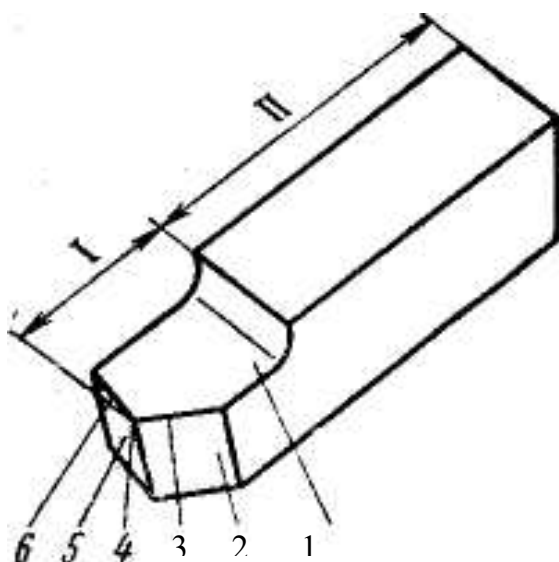


Рис.19.

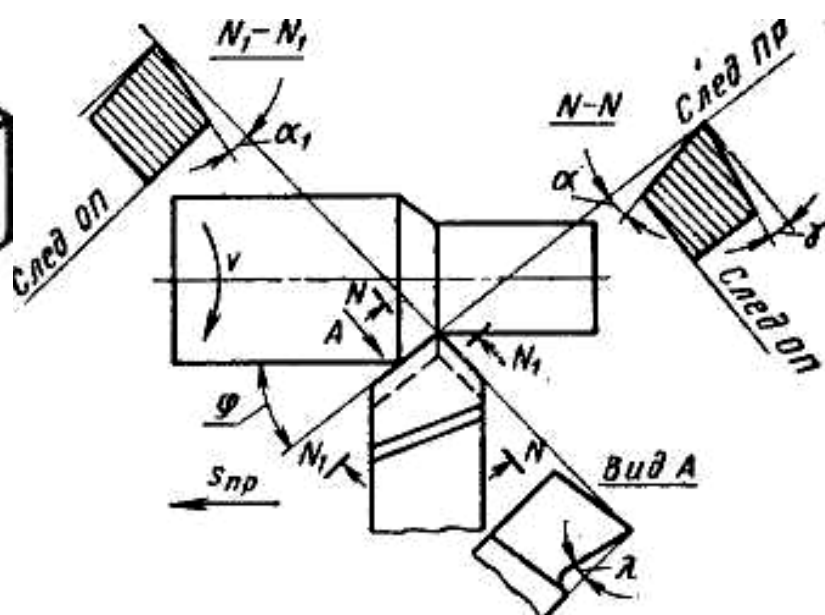


Рис.20.

Плоскость резания (ПР) проходит через главную режущую кромку резца, касательно к поверхности резания. Главная секущая плоскость ($N - N$) - плоскость, перпендикулярная к проекции главной режущей кромки на основную плоскость. Вспомогательная секущая плоскость ($N_1 - N_1$) - плоскость, перпендикулярная к проекции вспомогательной режущей кромки на основную плоскость. Перечисленные элементы имеют и другие режущие инструменты.

Углы резца (см. рис. 20) определяют положение элементов рабочей части относительно координатных плоскостей и друг друга. Эти углы называют углами резца в статике. Углы инструмента оказывают существенное влияние на процесс резания и качество обработки.

У токарного резца различают главные и вспомогательные углы, которые рассматривают, исходя из следующих условий: ось резца перпендикулярна к линии центров станка; вершина резца находится на линии центров станка; совершается главное движение резания.

Главный передний угол γ измеряют в главной секущей плоскости между следом передней поверхности и следом плоскости,

перпендикулярной к следу плоскости резания. Передний угол γ оказывает большое влияние на процесс резания. С увеличением угла уменьшается деформация срезаемого слоя, так как инструмент легче врезается в материал, снижаются сила резания и расход мощности. Одновременно улучшаются условия схода стружки, а качество обработанной поверхности заготовки повышаются. Чрезмерное увеличение угла γ приводит к снижению прочности главной режущей кромки, увеличению износа вследствие выкрашивания, ухудшения условий теплоотвода от режущей кромки.

Главный задний угол α измеряют в главной секущей плоскости между следом плоскости резания и следом главной задней поверхности. Наличие угла α уменьшает трение между главной задней поверхностью инструмента и поверхностью резания заготовки, что уменьшает износ инструмента по главной задней поверхности.

Вспомогательный задний угол α_1 измеряют во вспомогательной секущей плоскости между следом вспомогательной задней поверхности и следом плоскости, проходящей через вспомогательную режущую кромку перпендикулярно к основной плоскости. Наличие угла α_1 уменьшает трение между вспомогательной задней поверхностью инструмента и обработанной поверхностью заготовки.

Главный угол в плане ϕ - угол между проекцией главной режущей кромки на основную плоскость и направлением подачи - оказывает значительное влияние на шероховатость обработанной поверхности. С уменьшением угла ϕ шероховатость обработанной поверхности снижается. Одновременно увеличивается активная рабочая длина главной режущей кромки. Сила и температура резания, приходящиеся на единицу длины кромки, уменьшаются, что снижает износ инструмента. С уменьшением угла ϕ возрастает сила резания,

направленная перпендикулярно к оси заготовки и вызывающая ее повышенную деформацию. С уменьшением угла φ возможно возникновение вибраций в процессе резания, снижающих качество обработанной поверхности.

Вспомогательный угол в плане φ_1 - угол между проекцией вспомогательной режущей кромки на основную плоскость и направлением, обратным движению подачи. С уменьшением угла φ_1 шероховатость обработанной поверхности снижается, увеличивается прочность вершины резца и снижается его износ.

Угол в плане при вершине резца ε измеряют между проекциями режущих лезвий на основную плоскость.

Угол наклона главной режущей кромки λ измеряют в плоскости, проходящей через главную режущую кромку резца перпендикулярно к основной плоскости, между главной режущей кромкой и линией, проведенной через вершину резца параллельно основной плоскости. С увеличением угла λ качество обработанной поверхности ухудшается.

Углы γ , α , φ и φ_1 могут изменяться вследствие погрешности установки резца. Если при обтачивании цилиндрической поверхности вершину резца установить выше линии центров, то угол γ увеличится, а угол α уменьшится, а при установке вершины резца ниже линии центров станка - наоборот. Если ось резца будет не перпендикулярна к линии центров станка, то это вызовет изменение углов φ и φ_1 . Изменение углов инструмента при резании тем больше, чем меньше диаметр обрабатываемого изделия и больше подача. При установке резца выше центра задний угол уменьшается, а передний - увеличивается. При установке резца ниже центра увеличивается задний угол и уменьшается передний.

Контрольные вопросы:

1. Основные конструктивные элементы резца?
2. Основные геометрические параметры режущей части резца?
3. На что оказывает влияние изменение главного угла в плане?
4. Каким образом изменение переднего угла влияет на прочность режущей кромки?
5. Какой угол оказывает влияние на направление сбега стружки?

6. Силы резания, мощность, работа, тепловые явления в процессе резания.

Сопротивление металла резанию преодолевается силой резания. Работа силы резания затрачивается на упруго-пластическую деформацию металла и отрыв элемента стружки от основной массы металла, а также на преодоление трения на контактных поверхностях режущего инструмента.

В общем случае сила резания является равнодействующей сил нормального давления и сил трения, приложенных к рабочим поверхностям инструмента.

Для решения практических задач равнодействующую силу резания P заменяют ее составляющими, как это показано на рис.21. Направление составляющих сил совпадает с движениями, совершаемыми на станке. Сила P_z - главная составляющая сила резания - направлена по касательной к поверхности резания в направлении главного движения. Ее называют вертикальной или тангенциальной силой.

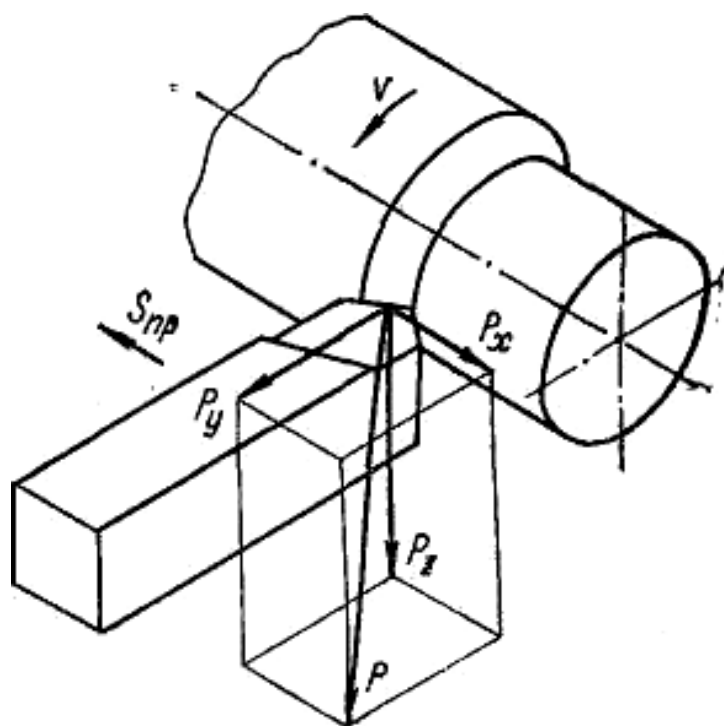


Рис. 21. Силы резания при точении

По величине силы P_z определяют эффективную мощность резания и крутящий момент на обрабатываемой заготовке:

Сила P_y - радиальная составляющая силы резания, направлена перпендикулярно оси обрабатываемой заготовки.

Сила P_x - осевая составляющая силы резания - направлена параллельно оси заготовки. Силы резания существенно зависят от условий резания и физико-механических свойств обрабатываемого материала. На практике их определяют в каждом отдельном случае экспериментально. Большое влияние на силы резания оказывают размеры срезаемого слоя, определяемые подачей и глубиной резания; с их увеличением силы резания возрастают.

Силы резания зависят также от геометрии режущей части инструмента. С увеличением угла резания δ все три составляющие силы возрастают. Более интенсивно растут силы P_y и P_x . С увеличением главного угла в плане φ до 60° сила резания P_z уменьшается, а при

дальнейшем увеличении его несколько возрастает. Сила P_x растет, а сила P_y уменьшается с увеличением главного угла в плане φ . Силы P_z и P_y возрастают с увеличением радиуса закругления режущего лезвия. По мере износа резца силы резания возрастают, особенно силы P_y и P_x . Применение смазывающе-охлаждающих жидкостей позволяет уменьшить значение силы резания на 15-30%.

За время резания до последующей переточки лезвие резца изнашивается. Износ передней поверхности мало влияет на соотношение составляющих силы резания. Износ же задней поверхности лезвия существенно влияет на значения горизонтальных составляющих P_x и P_y . Все прочностные и мощностные расчеты ведутся по максимально достигаемым значениям составляющих силы резания. Из написанных выше соотношений между ними следует, что наибольшей из составляющих является вертикальная составляющая P_z и, следовательно, она в основном определяет ход процессов, протекающих в зоне стружкообразования.

На рисунке 22 показано изменение составляющих силы резания от главного угла в плане.

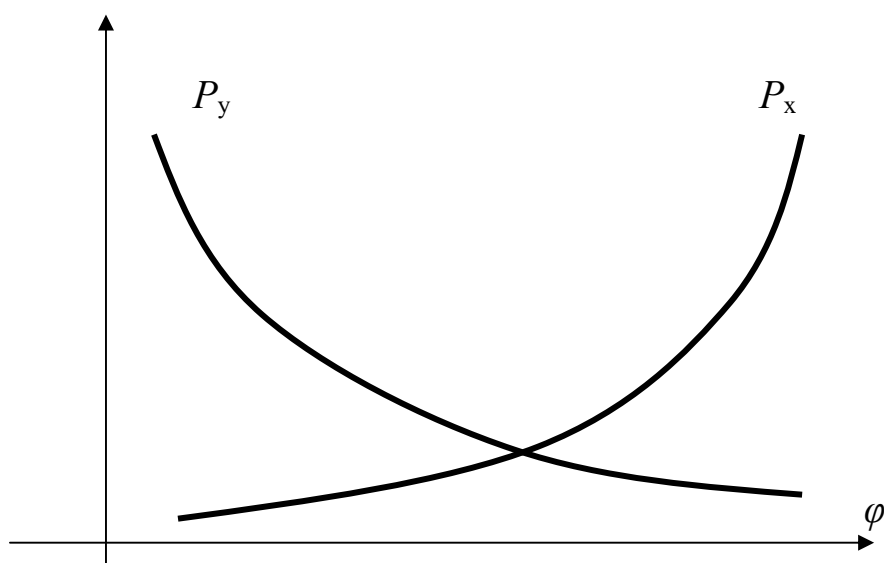


Рис.22.

Для определения величины сил резания используются экспериментальные формулы вида:

$$P_z = C_p t^{X_p} S^{Y_p} K_\mu K_\delta K_\varphi K_r, \quad (3)$$

где C_p - удельная сила резания, зависящая от механических свойств обрабатываемого и инструментального материалов. Коэффициенты K_μ , K_δ , K_φ и K_r учитывают изменение условий резания в сравнении с заданными при определении C_p . Значения C_p , показателей степени X_p и Y_p и коэффициенты – приводятся в справочниках.

Для решения некоторых производственных задач иногда требуется ориентировочно определить уровень возможных сил резания при механической обработке. Для этого желательно иметь достаточно простую математическую зависимость.

Упрощенное выражение для определения силы резания, выглядит:

$$P = K_p \sigma_B f_n, \quad (4)$$

где K_p – коэффициент;

f_n - площадь поперечного сечения срезаемого слоя;

σ_B – предел прочности материала.

Экспериментально установлено, что при резании углеродистых конструкционных сталей $K_p = 2,5$. Для других марок конструкционных сталей в зависимости от их химического состава, структурного состояния и механических свойств коэффициент $K_p = 2,3...2,8$. Упрощенное уравнение (4) силы резания позволяет в первом приближении оценить значение силы, действующей в процессе резания. Например, при резании углеродистой стали 45 с глубиной резания $t = 3$ мм и подачей $S = 0,5$ мм/об площадь поперечного сечения срезаемого

слоя $f_n = 1,5 \text{ мм}^2$. Предел прочности стали 45 $\sigma_B = 0,61 \text{ ГПа}$ и, следовательно, сила резания $P = 2,5 \cdot 0,61 \cdot 1,5 = 2,3 \text{ кН}$. Если предел прочности стали неизвестен, но известна или может быть оперативно определена его твердость по Бринеллю, то с достаточной степенью точности предел прочности можно определить по уравнению $\sigma_B = 0,31 \cdot \text{НВ}$.

Мощность затрачиваемая на резание. Работа резания. Для разрушения материала срезаемого слоя и превращения его в стружку необходимо затратить некоторое количество энергии и произвести работу резания. Мощность, непосредственно затрачиваемая на осуществление процесса резания, называется эффективной мощностью и обозначается N_e . Если при резании направления действующей силы резания P и скорости резания v совпадают, то

$$N_e = 60 P v. \quad (5)$$

Если выразить P в килоньютонах, а v в метрах в минуту, то получим единицу мощности - киловатт.

Учитывая коэффициент полезного действия кинематических цепей $\eta < 1$, мощность электродвигателя металлорежущего станка может быть определена по формуле:

$$N_{эд} = \frac{N_e}{\eta}. \quad (6)$$

Эффективная мощность N_e в общем случае является суммарной мощностью, затраченной в процессе резания всеми составляющими P_x , P_y и P_z силы резания P_p . Мощность осевой составляющей силы резания:

$$N_{ex} = P_x n S, \quad (7)$$

где n - частота вращения обрабатываемой заготовки; S - продольная подача.

Мощность радиальной составляющей силы резания

$$N_{ey} = P_y v \cos 90 = 0, \quad (8)$$

так как вектор P_y перпендикулярен вектору v . Мощность вертикальной составляющей P_z , направление которой совпадает с направлением скорости резания, определяется уравнением:

$$N_{ez} = P_z v. \quad (9)$$

Следовательно, эффективная мощность с использованием этих уравнений определяется как $N_e = N_{ex} + N_{ey} + N_{ez} = P_x nS + P_z v$. Скорость подачи, выраженная произведением nS , примерно на два порядка меньше окружной скорости v . Поэтому мощность N_{ex} составляет 1...2 % всей затраченной эффективной мощности, а основная доля эффективной мощности (98... 99 %) приходится на составляющую N_{ez} .

$$A = \frac{N_e}{t}. \quad (10)$$

При резании металлов около 95% механической работы деформации и трения переходит в теплоту. Выделяющаяся теплота распределяется между стружкой, заготовкой и инструментом.

Тепловые явления при резании. Распределение теплоты между стружкой, деталью и резцом зависит в основном от свойств обрабатываемого материала, скорости резания и толщины срезаемого слоя. Например, при обработке стали в стружку уходит до 80% теплоты. С увеличением скорости резания и толщины срезаемого слоя доля теплоты, уходящей со стружкой, увеличивается. Распределение теплоты имеет большое практическое значение. Чем больше теплоты уйдет со стружкой, тем меньше попадет в заготовку, тем менее вероятны тепловые деформации, влияющие на точность размеров и форму изготовленной детали и меньше вероятность структурных превращений в поверхностном слое обработанной детали. Чем меньше

теплоты попадет в инструмент, тем меньше будет интенсивность его износа.

На рисунке 23 показано влияние параметров резания на температуру резания.

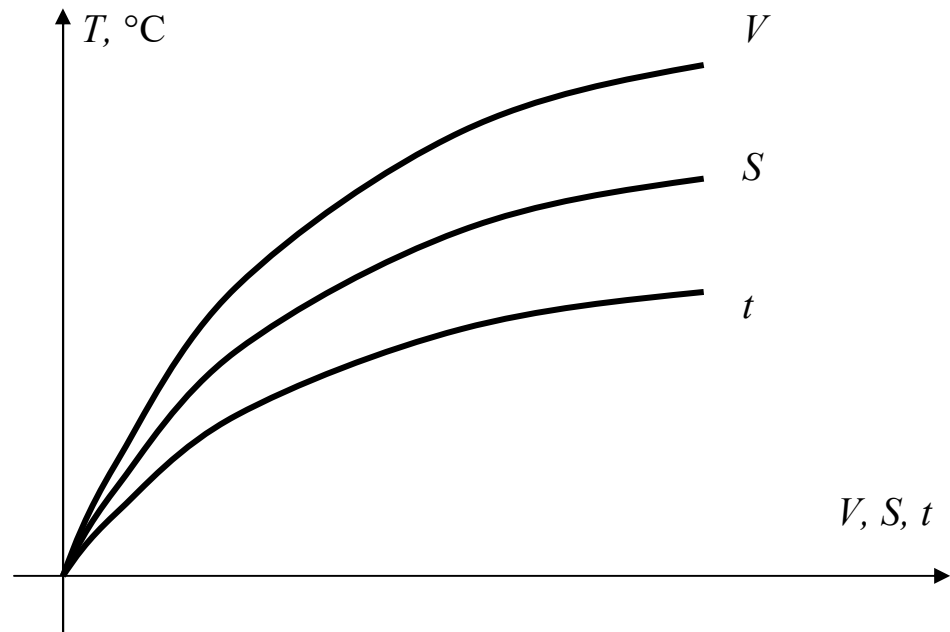


Рис.23.

Теплообразование отрицательно влияет на процесс резания. Нагрев инструмента до высоких температур ($800-1000^\circ\text{C}$) вызывает структурные превращения в металле, из которого он изготовлен, снижение твердости инструмента и потерю режущих свойств. Нагрев инструмента вызывает изменение его геометрических размеров, что влияет на точность размеров и геометрическую форму обработанных поверхностей. Например, при обтачивании цилиндрической поверхности на токарном станке удлинение резца при повышении его

температуры изменяет глубину резания, и обработанная поверхность получается конусообразной. Температурные деформации инструмента, приспособления, заготовки и станка снижают качество обработки.

Источники и распределение теплоты в зоне резания. Процесс резания металлов сопровождается значительным тепловыделением в результате того, что механическая работа резания переходит в тепловую энергию. Основными источниками возникновения тепла в зоне резания являются:

- внутреннее трение между частицами срезаемого слоя в результате его пластической деформации при образовании стружки (Q_1);
- трение стружки о переднюю поверхность инструмента (Q_2);
- трение поверхности резания и обработанной поверхности по задним поверхностям инструмента (Q_3).

Схема расположения источников тепла в зоне резания представлена на рис.24.

Наиболее интенсивное выделение тепла происходит в области стружкообразования, в этой области теплота выделяется в результате двух одновременно протекающих процессов: во-первых, в результате пластической деформации сдвига элементов образующейся стружки по плоскости скалывания; во-вторых, в результате пластической деформации сжатия и частично пластической деформации смятия тонкого слоя металла примыкающего к плоскости скалывания со стороны срезаемого слоя припуска.

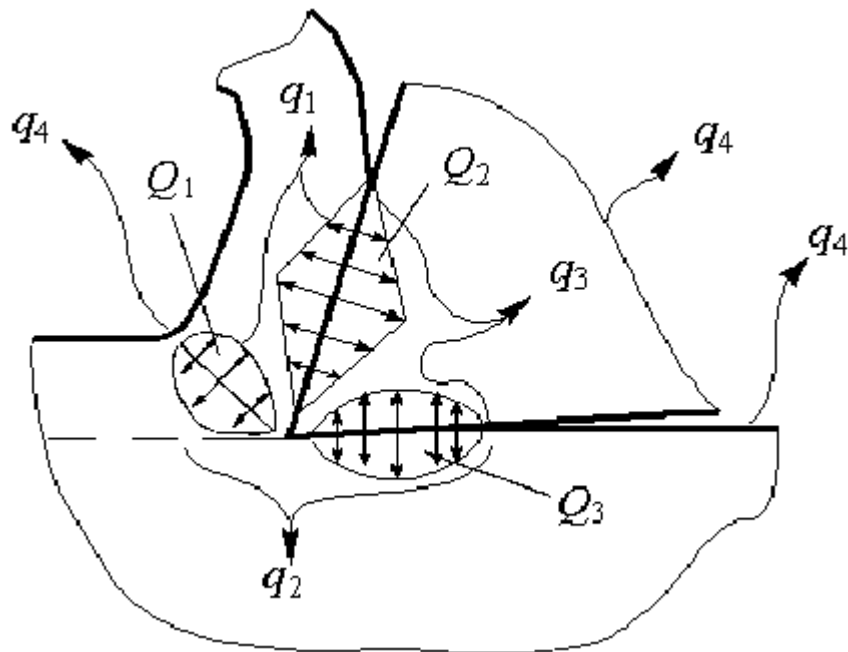


Рис.24. Источники тепла в зоне резания.

Тепло, образующееся в процессе резания, не аккумулируется в местах его образования, а распространяется от точек с более высокой температурой к точкам с низкой температурой. Из зоны резания тепло уносится со стружкой (q_1), передается в заготовку (q_2) и инструмент (q_3) и распространяется в окружающую среду (q_4). Тепловой баланс процесса резания может быть выражен уравнением:

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 = q_1 + q_2 + q_3 + q_4. \quad (11)$$

Соотношение количества тепла, отводимого со стружкой в деталь, в инструмент и окружающую среду, зависит от физико-механических свойств обрабатываемого материала, режима резания, геометрии режущего инструмента и внешних условий, в которых осуществляется резание.

Количественные оценки тепловых явлений, происходящих в зоне стружкообразования, производят различными методами. Измерение количества теплоты, выделяющейся при резании и отводимой перечисленными выше путями, может осуществляться, например, калориметрическим способом. Наибольшее применение для измерения

температуры в зоне стружкообразования нашли различные варианты метода термоэлектрической эмиссии.

Термопара. Экспериментальное определение температуры в процессе резания чаще всего производится различного рода термопарами. Суть этого явления заключается в том, что если в точках 1 и 2 (рис.25) соединить два металлических проводника А и Б разного химического состава, то при условии, что температура в точке 1 больше температуры в точке 2, в замкнутой цепи появляется электродвижущая сила, пропорциональная разнице температур. Если температура точки 2 (так называемой свободной точки) термопары постоянна, то электродвижущая сила, создаваемая термопарой, будет зависеть только от температуры рабочей точки 1. Для измерения значений электродвижущей силы между точками 3 и 4 подключают гальванометр.

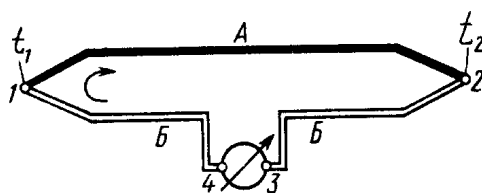


Рис.25. Термопара

Чтобы получить более чувствительную термопару, т. е. развивающую большую ТЭДС, желательно в качестве проводников А и Б, образующих термопару, подбирать такое сочетание материалов, один из которых обладает возможно большей положительной, а другой возможно большей отрицательной ТЭДС в контакте с платиной.

В отверстие, просверленное в корпусе резца (рис. 26), вставлялась термопара. Спай рабочего конца термопары касался в точке 1 нижней поверхности быстрорежущей пластинки. Пластика, прикрепленная к корпусу резца, выполняет функцию передней

поверхности лезвия. В процессе резания тепловой поток, генерируемый на контактных поверхностях лезвия, нагревал быстрорежущую пластинку и рабочий спай термопары. Просверливая отверстия в разных местах корпуса, можно последовательно одной или одновременно несколькими термопарами измерять температуру в разных точках быстрорежущих пластинок разной толщины.

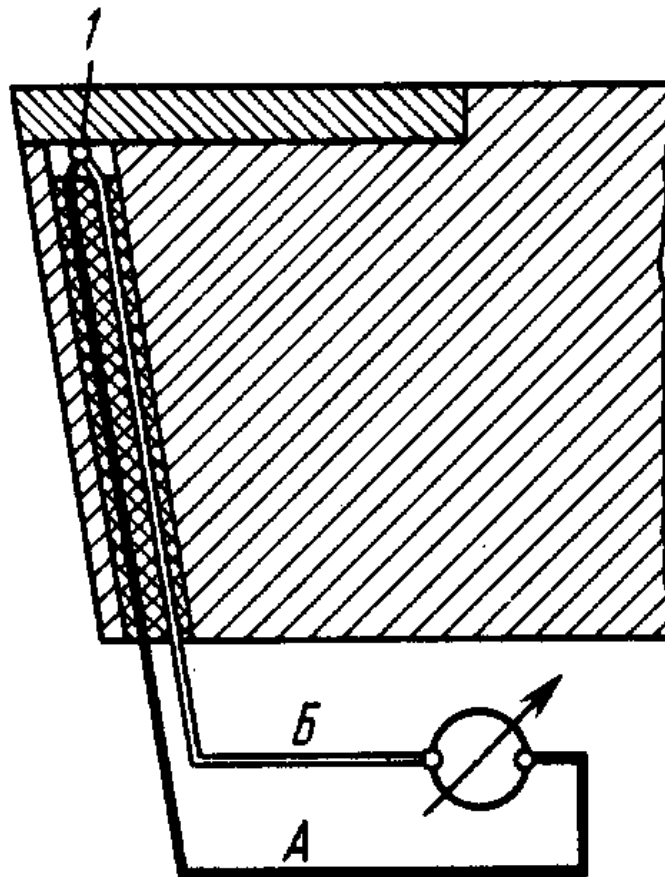


Рис.26. Измерение температуры резца методом искусственной термопары

Калориметрический метод заключается в том, что стружка собирается в калориметре с водой. Зная количество воды в калориметре, вес стружки и ее теплоемкость, можно определить среднюю температуру стружки по разности температуры воды в калориметре до, и после резания.

Температуру поверхности инструмента за пределами зоны его контакта с обрабатываемым изделием или стружкой можно определить с помощью термочувствительных красок, которые изменяют свой цвет при нагревании до определенной температуры и т.д.

Температурное поле после резца (рис.27). Установлено, что теплота в зоне резания распределяется неравномерно, так, наибольшая температура действует на передней поверхности при удалении от главной режущей кромки на $1/3$ длины контакта стружки с передней поверхностью. Совокупность мгновенных значений температуры в различных точках зоны резания называется температурным полем. Температурное поле дает наиболее яркую и полную картину температурной обстановки в зоне резания.

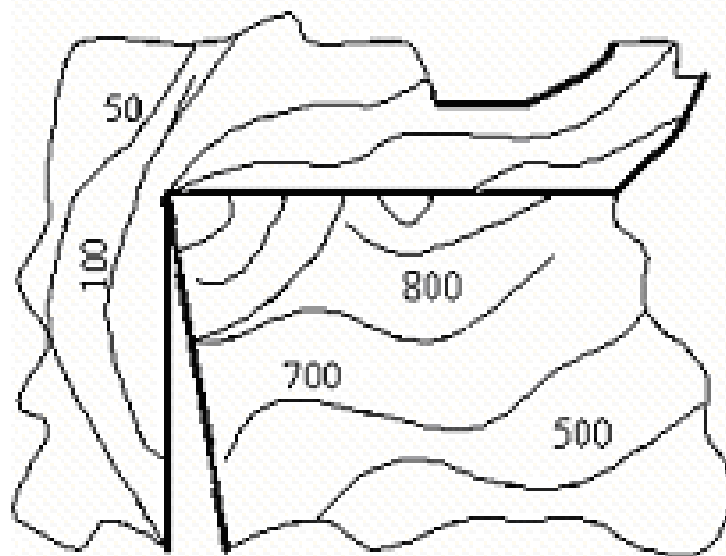


Рис.27. Температурное поле

Многочисленные исследования зависимости температуры от различных факторов показывают, что температура в зоне резания зависит от физико-механических свойств обрабатываемого материала, режима резания, геометрии режущего инструмента и многих других условий. Наибольшее влияние на температуру в зоне резания оказывает

скорость резания, в меньшей степени влияет подача, а влияние глубины резания почти не обнаруживается. Из геометрических параметров режущей части инструмента наиболее сильно на температуру резания влияют передний угол, главный угол в плане и радиус закругления при вершине, сопряжения главной и вспомогательной режущих кромок на вершине режущего лезвия инструмента.

Контрольные вопросы:

1. Какие основные силы резания образуются при точении и от чего они зависят?
2. Как влияет главный угол в плане на силу резания?
3. Каким образом можно определить эффективную мощность, непосредственно затрачиваемую на осуществление процесса резания?
4. Какие основные тепловые явления образуются в процессе резания?
5. Как влияют параметры резания на температуру резания?
6. Какие способы существуют для измерения температуры резания?

7. Инструментальные материалы.

Инструментальные материалы подразделяют на стали, твердые сплавы, алмазы и кубический нитрид бора. Наиболее важную группу составляют инструментальные стали. Они предназначены для изготовления 1- режущих инструментов, 2 – измерительных, 3 –

штампов холодного деформирования, 4 – штампов горячего деформирования.

Работоспособность металлорежущего инструмента может быть обеспечена только в том случае, если его рабочая часть выполнена из материала, обладающего комплексом определенных физико-механических свойств. Для того чтобы исключить пластическое течение рабочих кромок режущего, инструментальный материал должен обладать высокой твердостью и теплостойкостью. Материалы, в той или иной мере отвечающие требованиям этого комплекса и способные осуществлять резание, называются инструментальными. Рассмотрим основные физико-механические свойства инструментальных материалов.

Твердость материала – сопротивление проникновению в его поверхность другого тела. Чтобы внедриться в поверхностные слои обрабатываемой заготовки, материал режущих лезвий рабочей части инструментов должен иметь высокую твердость. Твердость инструментальных материалов может быть природная, т. е. свойственная этому материалу при его образовании, и может быть получена специальной обработкой. Так, инструментальные стали поставляются с металлургических заводов в отожженном состоянии, и в этом состоянии они легко поддаются обработке резанием. Механически обработанные инструменты подвергают термообработке, шлифованию и заточке. В результате термообработки существенно повышаются прочность и твердость инструментальных сталей. Твердость термообработанных инструментальных сталей измеряется по шкале С Роквелла и выражается в условных единицах HRC. При твердости термообработанных инструментов, изготовленных из инструментальных сталей, в пределах HRC 63...64 достигаются

наиболее устойчивая их работа и наименьшая изнашиваемость лезвий. При меньшей твердости возрастает изнашиваемость лезвий инструментов, а при большей твердости лезвия начинают выкрашиваться из-за чрезмерной хрупкости.

Конструкционные металлы, имеющие твердость HRC 30...35, удовлетворительно обрабатываются инструментами, выполненными из инструментальных сталей, термообработанных до HRC 63...64, т.е. при отношении твердостей, примерно равном двум. Конструкционные металлы, термообработанные до HRC 45...55, могут быть обработаны твердыми сплавами.

Прочность - способность тела (металла) сопротивляться деформациям и разрушению. Из всех инструментальных материалов наилучшим сочетанием прочностных характеристик обладают инструментальные стали. Отношение между их пределами прочности на изгиб и растяжение равно 1,3... 1,6, а отношение между пределами прочности на сжатие и растяжение - 1,6...2,0. Благодаря этому рабочая часть инструментов, выполненных из инструментальных сталей, успешно выдерживает сложный характер нагружения и может работать на сжатие, кручение, изгиб и растяжение.

Далее в порядке убывания прочностных характеристик следуют: твердые сплавы, минералокерамика, синтетические инструментальные материалы и алмазы. Все эти материалы достаточно хорошо выдерживают сжимающие напряжения. Однако их существенным недостатком является низкое значение прочности на изгиб ($\sigma_{\text{и}} = 300... 1000 \text{ Н/мм}^2$). Предел же прочности на растяжение у этих материалов настолько мал, что вообще не позволяет производить обработку резанием при действии в них растягивающих напряжений. При использовании этой группы инструментальных материалов необходимо

за счет соответствующей геометрии рабочей части добиваться, чтобы в процессе резания в них действовали только сжимающие напряжения.

Температуростойкость. Интенсивное выделение теплоты в процессе резания металлов ведет к нагреву лезвий инструмента, причем наибольшая температура развивается на контактных поверхностях лезвий. Нагрев до температуры ниже некоторого ее критического значения, разного для различных инструментальных материалов, не сказывается на их структурном состоянии и твердости. После нагрева вплоть до этой температуры и охлаждения инструментальные материалы не изменяют своих свойств. При нагреве выше критической температуры в инструментальных материалах происходят структурные изменения и связанное с этим снижение твердости. Критическая температура - называется температурой красностойкости. В основе термина «красностойкость» лежит физическое свойство металлов в нагретом до 600 °С состоянии излучать темно-красный свет. Термин «красностойкость» означает температуростойкость инструментальных материалов. Различные инструментальные материалы имеют температуростойкость в широких пределах - от 220 до 1800°С. В порядке убывания температуростойкости инструментальные материалы располагаются в следующем порядке: а) синтетические инструментальные материалы; б) минералокерамика; в) твердые сплавы; г) инструментальные быстрорежущие стали; д) инструментальные углеродистые стали.

Теплопроводность. Увеличение работоспособности режущего инструмента может быть достигнуто не только за счет повышения температуростойкости инструментального материала, но и благодаря улучшению условий отвода теплоты, выделяющейся в процессе резания на лезвии инструмента и вызывающей его нагрев до высоких

температур. Чем большее количество теплоты отводится от лезвия в глубь массы инструмента, тем ниже температура на его контактных поверхностях. Теплопроводность λ инструментальных материалов зависит от химического состава и температуры нагрева. Теплопроводность инструментальных быстрорежущих сталей повышается с увеличением температуры до 650...750°C и уменьшается при нагреве, свыше этих температур (рис.1). Присутствие в стали таких легирующих элементов, как вольфрам и ванадий, снижает теплопроводящие свойства инструментальных сталей, а легирование титаном, молибденом и кобальтом, наоборот, заметно повышает. Это же относится и к твердым сплавам, в состав которых входит карбид титана. Они более теплопроводны, чем твердые сплавы, содержащие только карбид вольфрама.

Износостойкость режущей части инструмента характеризуется его способностью сопротивляться микроскопическим разрушениям.

Кроме служебных свойств для инструментальных сталей большое значение имеют технологические свойства: прокаливаемость, малые объемные изменения при закалке, обрабатываемость давлением, резанием и шлифованием.

Разработанные в настоящее время инструментальные материалы, подразделяются на следующие группы: а) углеродистые и низколегированные инструментальные стали; б) быстрорежущие стали; в) твердые сплавы (металлокерамика); г) минералокерамика; д) синтетические композиции из нитрида бора; е) синтетические и природные алмазы.

Основным химическим элементом, определяющим физико-механические свойства углеродистых и легированных инструментальных сталей, является углерод. Углерод образует карбиды железа, которые в процессе термообработки активно участвуют в фазо-

вых превращениях и образовании твердой мартенситной структуры. Из группы углеродистых инструментальных сталей в инструментальном производстве наиболее широкое применение имеют стали марок У7, У7А ... У13, У13А. Буква У обозначает что сталь углеродистая, число показывает содержание углерода в десятых долях процента. Эти стали по содержат 0,65-1,35% С.

Углеродистые инструментальные стали обладают высокой твердостью, прочностью, хорошо шлифуются при изготовлении инструмента, дешевы и недефицитны. Стали У7, У7А, У8, У8А, содержащие 0,7-0,8% С, применяют для инструментов по дереву и инструментов ударного действия, когда требуется повышенная вязкость, пуансонов, кернов, зубил, кузнечных штампов и т.д.

Стали У9-У13 (У9А-У13А), содержащие 0,9 - 1,3% С, обладают более высокой твердостью и износостойкостью. Из этих сталей изготавливают сверла, метчики, развертки, фрезы, плашки и др. Из стали У13, имеющей максимальную твердость (HRC 62-64) и износостойчивость, изготавливают напильники, граверный инструмент и т. п.

Основные недостатки углеродистых сталей - их небольшая прокаливаемость, примерно до 5-10 мм, и низкая теплостойкость. При нагреве выше 200°С их твердость резко снижается. Инструменты из этих сталей могут работать лишь при небольших скоростях резания. Из-за низкой прокаливаемости (10-12 мм) углеродистые стали пригодны для мелких инструментов. Из углеродистых сталей изготавливают – метчики, напильники, пилы, шаберы и т.д.

Легированные инструментальные стали. Эти стали обычно содержат 0,9 - 1,4% С. Суммарное содержание легирующих элементов (Cr, W, Mn, Si, V и др.) не превышает 5%.

Хром – Х; никель – Н; молибден – М; вольфрам – В; кобальт – К; титан – Т; азот – А; марганец – Г; медь – Д; ванадий – Ф; кремний – С; фосфор – П; алюминий – Ю; бор – Р; ниобий – Б; цирконий – Ц.

Легирующие элементы, увеличивая устойчивость аустенита, уменьшают критическую скорость закали и увеличивают прокаливаемость. Инструменты закаливают в масле, что уменьшает возможность коробления и образования закалочных трещин.

Термическая обработка таких инструментов заключается в закалке с 800-860° С в масло или ступенчатой закалке (температура закали определяется составом). Отпуск проводят низкотемпературный - при 150 - 200° С. Твердость после термической обработки составляет HRC 61-66. Иногда для увеличения вязкости повышают температуру отпуска до 300°С, но при этом твердость понижается до HRC 55-60.

Малолегированные стали, содержащие 1-1,5% легирующих элементов, относятся к сталям небольшой прокаливаемости.

Применяемые для режущего инструмента стали 9ХС, ХВСГ, ХВГ и др. по сравнению с углеродистыми сталями имеют более высокую прокаливаемость, повышенную твердость и износоустойчивость.

Повышенное содержание кремния (9ХС, ХВСГ) способствует увеличению прокаливаемости (критический диаметр для стали 9ХС равен 40 мм, а для стали ХВСГ 100 мм при закалке в масле) и устойчивости мартенсита при отпуске.

Повышенное содержание марганца (ХВГ, ЭХВСГ)), способствует увеличению количества остаточного аустенита, что уменьшает деформацию инструмента при его закалке. Поэтому эти стали часто применяют для изготовления инструмента, имеющего большую длину при относительно небольшом диаметре, например

протяжек. Легирование хромом увеличивает прокаливаемость и твердость после закалки.

Из сталей этой группы изготавливают различные инструменты - от ударного до режущего. Теплостойкость инструментов, как правило, не превышает 300° С, поэтому эти стали не используют для обработки с большими скоростями резания.

Так называемая «алмазная» сталь ХВ5 (5% W) благодаря присутствию вольфрама в термически обработанном состоянии имеет избыточную мелкодисперсную карбидную фазу и твердость HRC 65-67. Из этой стали изготавливают инструмент, сохраняющий длительное время острые кромки и высокую размерную точность (развертки, фасонные резцы, граверный инструмент и т.п.).

Низколегированные стали, к которым относятся стали марок ХВГС, 9ХС и ХВГ, по содержанию углерода соответствуют углеродистым инструментальным сталям, но дополнительно легированы небольшим количеством вольфрама, ванадия и других элементов. По структуре низколегированные стали относятся к заэвтектоидным сталям перлитного класса. Структура мартенсита и легированного цементита обеспечивает им твердость и высокую износостойкость. Незначительное количество в сталях обеих подгрупп хрома, марганца и кремния мало сказывается на эксплуатационных свойствах этих сталей. Эти компоненты вводят в их состав для улучшения технологических свойств (литейных, закалочных и т. п.). Используют для изготовления сверл, разверток, протяжек и т.д.

Быстрорежущие стали. К ним относятся высоколегированные стали, предназначенные для изготовления инструментов высокой производительности. Быстрорежущие стали (см. таблицу) получили такое название за свои свойства. Вследствие высокой теплостойкости

(550-650° С) инструменты могут работать со скоростями резания, в три-четыре раза большими, чем инструменты из углеродистых и легированных сталей.

Быстрорежущие стали содержат 0,7-1,5% С, до 18% W, являющегося основным легирующим элементом, до 4,5% Cr, до 5% Mo, до 10% Co. В обозначении марок стоит буква P, цифры за этой буквой показывают среднее содержание вольфрама (P18, P9 и т.д.).

Добавление ванадия повышает износостойкость инструмента, но ухудшает шлифуемость. Кобальт повышает теплостойкость до 650°С и вторичную твердость до HRC 67-70. Наиболее высокую теплостойкость имеют стали P14Ф4, P10K5Ф5 и P8M4K8 (до 640-650°С). По структуре в равновесном состоянии эти стали относятся к ледебуритному классу. Отливки из быстрорежущей стали подвергают ковке, а затем отжигу, нагревая до 860-900° С.

В результате комплексного легирования инструменты из быстрорежущих сталей сохраняют высокую твердость до 560-640°С и допускают в 2-4 раза более производительные режимы резания, чем инструментальные углеродистые и легированные стали.

Быстрорежущие стали делятся на две группы: нормальной и повышенной производительности.

Группу сталей нормальной производительности образуют вольфрамовые (P18, P12, P9, P9Ф5) и вольфрамомолибденовые (P6M3, P6M5) стали.

К группе сталей повышенной производительности относятся стали, содержащие кобальт и повышенное количество ванадия: P6M5K5, P9M4K8, P18K8Ф2. Стали высокой производительности предназначены для обработки высокопрочных сталей, коррозионно-

стойких и жаропрочных сталей с аустенитной структурой и других труднообрабатываемых материалов.

Ввиду высокой стоимости и дефицитности вольфрама из быстрорежущей стали изготавливают только рабочую часть инструмента, которую прикрепляют к державке из обычной углеродистой инструментальной стали.

Твердые сплавы. Металлокерамические сплавы значительно превосходят быстрорежущие и другие инструментальные стали по твердости (HRC 70-80), износостойкости, а также по теплопрочности (900-1000°C), но уступают сталям по прочности на изгиб и являются хрупкими. Структура сплавов состоит из частиц очень твердых и тугоплавких карбидов вольфрама (WC), титана (TiC), тантала (TaC), равномерно распределенных в мягкой эвтектике на основе кобальта соединенных между собой металлической связкой. С увеличением содержания кобальта снижаются твердость и износостойкость, но повышается прочность сплавов.

В зависимости от назначения и условий работы инструментов применяют однокарбидные сплавы системы WC - Co (BK3, BK6 и др.); двухкарбидные сплавы WC – TiC-Co (T30K4, T15K6 и др.); трехкарбидные WC –TiC-TaC-Co (TT7K12 и др.). В обозначении марок сплавов буква В означает карбид вольфрама (WC), Т с последующим числом -% TiC; ТТ с цифрой - % TiC+TaC; К с цифрами - % Со (кобальт). Содержание WC не указывают: % WC=100 - %Со - %TiC - %(TiC+TaC).

По сравнению со сплавами типа ВК двухкарбидные сплавы имеют повышенную вязкость, трехкарбидные - повышенную износоустойчивость, вязкость, хорошо сопротивляются вибрациям.

Значительно (в 2,5...3,2 раза) уступая инструментальным сталям по прочности на изгиб, твердые сплавы обладают высоким пределом прочности на сжатие и по этому параметру соответствуют или даже превосходят инструментальные стали.

Природная твердость твердых сплавов, т. е. твердость, полученная непосредственно при их изготовлении без дополнительной термообработки, превышает твердость термообработанных быстрорежущих сталей и, измеренная по шкале Роквелла, колеблется в пределах HRA 87...91.

Карбиды вольфрама и титана, составляющие основу твердых сплавов, обладают высокой природной температуростойкостью. Увеличение содержания в твердом сплаве карбидов вольфрама, титана и тантала при соответствующем уменьшении содержания кобальта ведет к повышению температуростойкости твердых сплавов. Высокая температуростойкость дает возможность вести твердосплавными инструментами обработку металлов с высокими скоростями резания с допускаемой на лезвиях температурой свыше 1000 °С. В этом заключается преимущество твердых сплавов перед инструментальными сталями.

Из твердых сплавов разных марок промышленностью изготавливается большая номенклатура пластинок различных стандартных форм и размеров. Твердыми, температуростойкими и износостойкими твердосплавными пластинками оснащают все виды токарных резцов и значительную часть фрез. Их устанавливают на зенкерах, развертках, протяжках, зуборезных и резьбонарезных инструментах. Для высокопроизводительной обработки специальных конструкционных материалов мелкоразмерные сверла, зенкеры, развертки и фрезы целиком изготавливают из твердых сплавов.

Некоторые металлорежущие инструменты, преимущественно резцы, изготавливают из минералов. Эти минералы имеют различный химический состав, кристаллическое строение, физико-механические свойства.

Минералокерамика. Основой керамики является корунд - минерал кристаллического строения, состоящий из оксида алюминия Al_2O_3 . Получают корунды из глинозема в электропечах при высокой температуре, в связи с чем их принято называть электрокорундами. Кристаллы свободного от примесей электрокорунда имеют белый цвет.

Из кристаллов электрокорунда, добавляя к ним стекло как связующее вещество, изготавливают стандартные минералокерамические режущие пластинки. Минералокерамика обладает очень высокой твердостью и по этому параметру приближается к алмазу. Кристаллы электрокорунда имеют высокую природную температуростойкость. Минералокерамика ЦМ332 имеет температуростойкость порядка $1500^{\circ}C$. Столь высокая температуростойкость позволяет обрабатывать металлы со скоростями резания 300.. 600 м/мин. Существенным недостатком белых минералокерамических пластинок является их низкая механическая прочность. Для пластинок марки ЦМ332, например, предел прочности на изгиб $\sigma_{и} = 370 \text{ Н/мм}^2$ (углеродистая инструментальная сталь $\sigma_{и} = 190 \text{ Н/мм}^2$, для быстрорежущей стали $\sigma_{и} = 3300 \text{ Н/мм}^2$). Пластинки хрупки и их режущие лезвия могут выкрашиваться в процессе резания. Поэтому минералокерамика пригодна только для тонкой окончательной обработки.

Твердость минералокерамики и твердых сплавов измеряется по шкале Роквелла и находится в пределах HRA 87...93. Твердость синтетических инструментальных материалов настолько велика, что сопоставима с твердостью природного алмаза. Поэтому оценку

твердости этих материалов производят по их микротвердости, которая находится в пределах 85...94 ГПа. Синтетические инструментальные материалы благодаря своей высокой твердости способны производить обработку закаленных сталей.

Низкая прочность и склонность к выкрашиванию минералокерамики послужили толчком к поискам новых, более прочных составов минералокерамики. С этой целью в нее начали добавлять различные тугоплавкие соединения - карбиды вольфрама, титана и молибдена. Образовавшиеся составы из кристаллов корунда и карбидов тугоплавких металлов получили название *керметы*. Пластинки керметов, имеющие темную, практически черную окраску, изготавливаются промышленностью в виде многогранных и круглых пластинок. Они имеют марки ВОК-60, ВОК-63 и ВЗ. Керметы имеют предел прочности на изгиб $\sigma_{и} = 0,6.. .0,7$ ГПа, что почти в два раза выше, чем у пластинок марки ЦМ332. Однако добавка к минералокерамике карбидов тугоплавких металлов снизила температуростойкость керметов до 1300° С. Твердость пластинок из кермета и минералокерамики практически одинакова. Керметы применяются как режущие пластинки для окончательной обработки металлов резанием.

Нитрид бора. Это искусственный инструментальный минерал темного цвета, не имеющий природного аналога. В процессе изготовления в зависимости от технологии синтеза азота с бором образуются кристаллы кубического или гексагонального строения. Нитрид бора по твердости уступает лишь синтетическому алмазу, превосходя минералокерамику и керметы. Кроме того, он прочнее всех прочих синтетических инструментальных материалов и из него можно изготавливать вставки-лезвия к режущим инструментам.

Температуростойкость нитрида бора достигает 1800 °С (выше, чем у всех известных инструментальных материалов).

Нитрид бора выпускают под маркой *эльбор*. Эльбор является эффективным инструментальным материалом для оснащения резцов, которыми ведется окончательная обработка чугунных деталей, труднообрабатываемых материалов и термообработанных сталей.

Алмазы. Совершенствование технологии получения синтетических алмазов позволило изготавливать поликристаллические образований достаточно больших размеров, из которых делают вставки-лезвия к металлорежущие инструментам. Синтетические поликристаллические алмазы содержат небольшое количества примесей тугоплавких металлов - вольфрама, титана и молибден. Масса кристаллов, идущих на оснащение режущих инструментов, составляет 0,2 – 0,8 карат (1 карат = 0,2 г.).

В зависимости от технологии выращиваемые кристаллы алмаза имеют различное строение (балласы, карбонадо) и соответственно различные физико-механические свойства. Как инструментальные материалы синтетические алмазы типа карбонадо лучше, чем алмазы типа баллас. По твердости синтетические поликристаллы лишь незначительно уступают природным монокристаллам алмазов. Прочностные характеристики поликристаллических алмазных вставок позволяют успешно выдерживать значительные ударные нагрузки, имеющие место при обработке резанием вязких и пластичных материалов, так и при выглаживании закаленных стальных поверхностей. Температуростойкость алмазов сравнительно низка - она составляет около 650 °С.

Этот недостаток компенсируется теплопроводностью. Теплота, выделяющаяся в процессе резания на трущихся поверхностях вставок-

лезвий, хорошо отводится вглубь алмаза и, таким образом температура на рабочих поверхностях обычно не превышает его температуростойкости.

Синтетические алмазы маркируй буквами «АС». Применяются они для прецизионной обработки алюминиевых и медных сплавов, пластмасс, стеклопластиков, полупроводниковых материалов. Большие скорости резания 1000-1200 м/мин обеспечивают высокую производительность обработки.

Контрольные вопросы:

1. Какие основные физико-механические свойства инструментальных материалов Вам известны?

2. Какой основной химический элемент, определяющий физико-механические свойства углеродистых и легированных инструментальных сталей?

3. Основные отличия углеродистых сталей от легированных?

4. Свойства и область применения твердых сплавов.
Расшифровать марки сталей: ВК6, Т30К4, ТТ7К12.

5. Основные преимущества и недостатки неметаллических инструментальных материалов?

Литература:

1. Мелентьев, Г.А. Резание материалов. Учебник / Г.А. Мелентьев, А.Г. Схиртладзе, В.П. Борискин. – М.: Юрайт, 2019. 512 с.

ISBN: 978-5-94178-135-5

2. Чемборисов, Н.А. – отв. ред. Резание материалов. Режущий инструмент. Учебник. В 2 частях. Часть 1. / С. Н. Григорьев, В. А. Гречишников, А. Г. Схиртладзе, И.А. Савин, Н. Чемборисов.- М.: Юрайт, 2017. – 264 с.

ISBN: 978-5-534-02278-0

3. Чемборисов, Н.А. – отв. ред. Резание материалов. Режущий инструмент. Учебник. В 2 частях. Часть 1. / С. Н. Григорьев, В. А. Гречишников, А. Г. Схиртладзе, И.А. Савин, Н. Чемборисов.- М.: Юрайт, 2017. – 246 с.

4. Грановский, Г.И. Резание металлов: Учебник для машиностр. и приборостр. спец. вузов. / Г.И. Грановский, В.Г. Грановский – М.: Высш. шк., 1985. – 304с.

5. Васин, С.А. Резание металлов: Термомеханический подход к системе взаимосвязей при резании: учебник для техн. вузов / С.А. Васин, А.С. Верещака, В.С. Кушнир. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001, - 448с.

6. Дроздов, Ю.Н. Трение и износ в экстремальных условиях: Справочник. / Ю.Н. Дроздов, В.Г. Павлов, В.Н. Пучков – М.: Машиностроение, 1986. – 224 с.