Основы теории резания и РИ

Конспект лекций

ВВЕДЕНИЕ

Машиностроение призвано играть ведущую роль в ускорении научно-технического прогресса в народном хозяйстве нашей страны. Характерными чертами его развития является автоматизация технологических процессов, широкое внедрение робототехники, высокая производительность труда. Среди различных технологий, применяемых в машиностроении, обработка резанием является одним из основных методов получения точных деталей машин. Поскольку требования к точности машин и приборов постоянно повышаются, становится несомненной перспективность развития процессов механической обработки. Их универсальность и гибкость обеспечивают преимущества перед другими способами изготовления деталей, особенно для небольших партий изделий в индивидуальном и серийном производстве.

Одним из основных недостатков процесса резания является перевод части обрабатываемого материала в стружку – в отходы. Анализ, проведенный в 1957 г. в США, показал, что за год было произведено 100 млн тонн стали, из которых более 15 млн тонн было переведено в стружку, что составляет примерно 10 %. Поэтому долгое время считалось, что процесс резания в будущем будет заменен другими методами механической обработки, будут созданы так называемые безотходные технологии изготовления деталей (методы точного литья, пластического деформирования, порошковой металлургии и др.). Однако, несмотря на эти прогнозы, удельный вес обработки резанием на машиностроительных предприятиях за многие десятилетия фактически не меняется и составляет 50–70 %.

Процесс резания стал широко использоваться на машиностроительных предприятиях со второй половины XVIII века. Соответственно все больше возникало вопросов, связанных с его использованием, что порождало необходимость проведения соответствующих исследований.

Наука о резании материалов – относительно молодая наука. Первые опубликованные труды в этой области относятся к 1848 г. и принадлежат Кокилье, определившему силы сопротивления резанию, возникающие при сверлении стволов пушек из кованого железа. В 1850 и 1864 гг. опыты Кокилье применительно к точению повторяют Кларинваль и Жоссель (Жосселен). Однако исследователи ограничивались только фиксацией полученных результатов, не вдаваясь в сущность явлений, их определяющих.

Развитие науки о резании можно условно разделить на четыре периода. В первый период (1848–1917 гг.) определялось, что нужно изучать в процессе резания и как изучать, создавались первые измерительные приборы (динамометры и др.). Основоположником научного подхода к резанию материалов является русский ученый И. А. Тиме, который в 1868–1869 гг. на Луганском паровозостроительном заводе проводил опыты по строганию различных материалов, описанные им в книге «Сопротивление металлов и дерева резанию» (1870 г.). Предложенная им классификация типов стружек, установленное явление усадки стружки, понятие об угле скалывания, первая формула для определения силы резания при строгании различных по свойствам материалов используются в науке о резании и поныне.

Теория И. А. Тиме нашла последующее развитие в работах В. Л. Чебышева, А. П. Афанасьева, А. В. Гадолина, Т. И. Тихонова, Б. Г. Соколова Я. Г. Усачева, А. А. Брикса и, особенно, К. А. Зворыкина, поставившего в Харьковском технологическом институте ряд выдающихся по методике и результатам опытов по изучению сил при резании. В 1914 г. появляются исследования Я. Г. Усачева в области стружкообразования, нароста и тепловых явлений при резании.

Из зарубежных ученых в этот период, прежде всего, следует отметить исследования американского промышленника и экономиста Ф. Тейлора, создателя быстрорежущей стали. В своей работе «Искусство резать металлы» (1896 г.) он впервые рассматривает вопросы износа и стойкости режущего инструмента, предлагает эмпирические формулы степенного типа, связывающие скорость резания с подачей и глубиной резания.

Второй период (1918–1945 гг.) характерен созданием научных школ; организацией на крупных заводах лабораторий резания (ГАЗ, ЗИЛ, Уралмаш, ХТЗ и др.), созданием специальных научно-исследовательских институтов (ВНИИинструмент, ЭНИМС, ЦНИИТМАШ, НИИавтопром и др.), накоплением экспериментального материала при исследовании сил резания, износа инструмента, допустимой скорости резания и др.. В эти годы был создан принципиально новый инструментальный материал – твердый сплав. Становление отрасли производства этих сплавов в Украине связано с «Укртвердосплавом» позже – Институтом сверхтвердых материалов и его основателем – В. Н. Бакулем.

В этот период были созданы научные школы в МВТУ им. Н. Э. Баумана (И. М. Беспрозванный, Г. И. Грановский), МАИ

(В. А. Кривоухов), МАТИ (А. И. Каширин, А. М. Даниелян), Томском политехническом институте (А. М. Розенберг), Горьковском политехническом институте (М. И. Клушин), Киевском политехническом институте (С. С. Рудник), Харьковском политехническом институте (Н. И. Резников, М. Ф. Семко) и в др.

Одним из итогов этих работ в НИИ, заводских лабораториях и вузах была разработка общемашиностроительных нормативов по режимам резания под общим руководством Комиссии по резанию металлов при Народном комиссариате тяжелой промышленности (председатель Е. П. Надеинская).

За рубежом в этот период были созданы научные школы И. Д. Армарего (Австралия), П. Оксли (Англия), М. Мерчанта (США), Х. Опитца, И. Г. Шлезингера (Германия), Н. Такоямы (Япония).

Третий период (1946–1990 гг.) следует считать временем расцвета научных исследований в области обработки материалов резанием. Резко возросло число ученых, работающих в этой области. Укрепились (количественно и качественно) уже созданные научные школы, создавались новые: ЦНИИТМАШ (Н. Н. Зорев), Грузинский политехнический институт (Т. Н. Лоладзе), Киевский политехнический институт (В. А. Остафьев) Куйбышевские авиационный и политехнический институты (Н. И. Резников, А. Н. Резников, Б. А. Кравченко), Тульский политехнический институт (С. С. Петрухин, В. Ф. Бобров), Уфимский авиационный институт (А. Д. Макаров), Рыбинский авиационный институт (С. С. Силин), Харьковский политехнический институт (М. Ф. Семко, В. И. Дрожжин, А. И. Грабченко) и др.

Для изучения различных сторон процесса резания широко применяются высокоскоростная киносъемка, поляризационно-оптический метод, метод радиоактивных изотопов, рентгеноскопия и электроноскопия, сканирование и т. п. Разработана специальная аппаратура, позволяющая производить физические исследования процесса резания. Большой экспериментальный материал, накопленный в результате проведенных исследований, позволил приступить к разработке общей теории процесса резания. Этот период характерен созданием теоретических моделей процесса резания, аналитических методов расчета основных характеристик процесса – сил резания, температур, характеристик разрушения и износа режущих инструментов и др.

На основании этих исследований появилось много научных монографий и учебников, а обобщающим трудом на многие годы стала книга

«Развитие науки о резании металлов» (большая группа авторов, председатель редакционной коллегии Н. Н. Зорев).

Четвертый период (1991 г. – по настоящее время) связан со снижением творческой деятельности, отсутствием финансирования, распадом многих машиностроительных предприятий и др. Однако и в это время в Украине продолжаются работы по исследованию физики процесса резания (Запорожье, Киев, Харьков, Хмельницкий), изучению напряженного состояния в режущем инструменте (Запорожье, Киев, Сумы, Харьков, Хмельницкий), применению экологически чистых смазочно-охлаждающих технологических сред (Симферополь), созданию теоретических моделей износа режущего инструмента (Хмельницкий), изучению и практическому использованию процессов абразивной и алмазной обработки (Донецк, Киев, Севастополь, Харьков, Одесса).

Прогресс в технологии механической обработки достигается вследствие изобретательности и опыта, логического мышления и настойчивого труда многих тысяч практических работников и ученых, связанных с областями резания материалов. Все они постоянно пытаются найти решение новых проблем, вызванных появлением неизвестных ранее материалов, ограничением скорости обработки или необходимостью обеспечения достижимой точности и многими другими причинами. Однако, какими бы компетентными они ни были, немного найдется специалистов, кто бы не понимал, что возникающие перед ними проблемы лучше решать, обладая более глубокими знаниями о физических процессах, возникающих в зоне резания и на поверхностях инструмента. В то же время во всем мире и у нас (Киев, Сумы, Одесса, Харьков, Хмельницкий) распространение получило направление компьютерного моделирования процессов, происходящих при резании материалов: трения, напряженного состояния зоны резания, тепловых процессов и т. п.

Стало возможным:

1) создание методов и систем компьютерного расчета оптимальных режимов резания;

2) создание методов прогнозирующего моделирования и автоматизированной подготовки управляющих программ для станков с ЧПУ;

3) определение оптимальных конструкций режущих инструментов и условий применения адаптивных систем управления и др.

Именно то, что происходит в очень небольшом объеме материала, прилегающего к режущей кромке, определяет показатели работы режу-

щего инструмента, обрабатываемость металлов и сплавов, качество обработанной поверхности и поверхностного слоя.

В этом конспекте лекций использованы материалы учебника рекомендованного Министерством образования и науки, молодежи и спорта Украины для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлениям подготовки «Инженерная механика» и «Машиностроение» Основы теории резания материалов: учебник [для высш. учебн. заведений] / Мазур Н. П., Внуков Ю. Н., Грабченко А. И. и др. ; под общ. ред. Н. П. Мазура и А. И. Грабченко. –2-е изд., перераб. и дополн. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2013. – 534 с.

Тема 1
ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ, ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕОРИИ РЕЗАНИЯ МАТЕРИАЛОВ

Лекция 1. Классификация основных способов и видов обработки резанием

Понятие ***обработка*** связано с действием, направленным на изменение свойств предмета труда (заготовки) при выполнении технологического процесса. В зависимости от вида применяемой энергии для воздействия на заготовку обработка может быть механической, термической, химической, электрической и др. Под ***механической*** понимают обработку заготовки давлением или резанием.

Резание есть процесс управляемого разрушения (отделения) материала припуска и формообразования поверхности детали. Доминирующим фактором при этом является пластическое деформирование в сочетании со сложным комплексом явлений – механических, физических, химических, тепловых и т. д.

Обработка резанием заключается в образовании новых поверхностей путем отделения срезаемого слоя *5* с заготовки *3* (рис. 1.1) режущим лезвием инструмента *1* с режущей кромкой *4* с образованием стружки *2* в целях достижения заданных свойств (формы, размеров, точности, шероховатости, физико-химико-механического состояния) обработанной поверхности *6* и поверхностного слоя. ***Лезвие инструмента*** – клиновидный элемент режущего инструмента, созданный для проникновения в материал заготовки и отделения стружки.

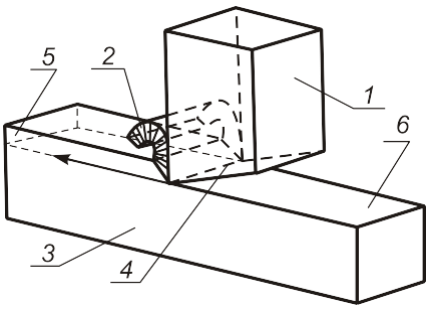


Рисунок 1.1 – Общая схема обработки резанием

Стружка – деформированный и отделенный в результате обработки резанием поверхностный слой материала заготовки, составляющий припуск.

Для того чтобы режущий инструмент мог срезать с заготовки при- пуск, он, заготовка или они вместе совершают движения с определенными направлениями и скоростями. В зависимости от соотношения скоростей движений, которые выполняют инструмент и заготовка, различают методы обработки. Одно из движений, необходимое для реализации процесса превращения срезаемого слоя в стружку, которое осуществляется с наи-

большей скоростью, называют ***главным движением резания, –*** D_r, а другие – движениями подачи D_S (рис. 1.2). ***Движение подачи*** D_S – прямолинейное или вращательное движение режущего инструмента или заготовки, скорость которого меньше скорости главного движения резания, предназначенное для того, чтобы распространить отделение слоя материала на всю обрабатываемую поверхность. Движение подачи может быть непрерывным (точение, сверление и др.) или прерывистым. Прерывистое движение подачи может происходить в перерывах циклов резания, например, при строгании (рис. 1.2 *б*).

Скорость главного движения резания V – скорость рассматриваемой точки режущей кромки или заготовки в главном движении. ***Скорость движения подачи*** V_S – скорость рассматриваемой точки режущей кромки или заготовки в движении подачи. Как следует из вышеизложенного, характерным признаком главного движения резания является то, что его скорость V во много раз превышает скорость движения подачи V_S.

Размер срезаемого слоя t, измеренный по нормали к направлению движения подачи D_S (или по нормали к обработанной поверхности *3*), называют ***глубиной резания*** (рис. 1.3).

В технической литературе скорость главного движения резания V называют ***скоростью резания***, а вместо понятия скорость движения подачи может употребляться термин подача.

Подача – отношение расстояния, пройденного рассматриваемой точкой режущей кромки или заготовки вдоль траектории этой точки в движении подачи, к соответствующему числу циклов или определенных долей цикла другого движения во время резания. Под циклом ***движения*** понимают один полный оборот при точении (рис. 1.3 *а*), ход или двойной ход режущего инструмента или заготовки при строгании или долблении (рис. 1.3 *б*), а ***частью цикла*** может быть поворот многозубого инструмента на один угловой шаг $\delta_ф$ (рис. 1.3 *в*).

Исходя из этого, различают подачи:

- ***подача на оборот*** S (S_0), мм/об – подача, соответствующая одному обороту заготовки или инструмента;
- ***подача на зуб*** S_z**,** мм/зуб – подача, которая соответствует повороту инструмента на один угловой шаг зубьев $\delta_ф$ (см. рис. 1.3 *в*), при этом $S=S_z z$, где z – число зубьев режущего инструмента;
- ***подача на ход*** S_x, мм/ход – подача, которая соответствует одному ходу инструмента или заготовки;

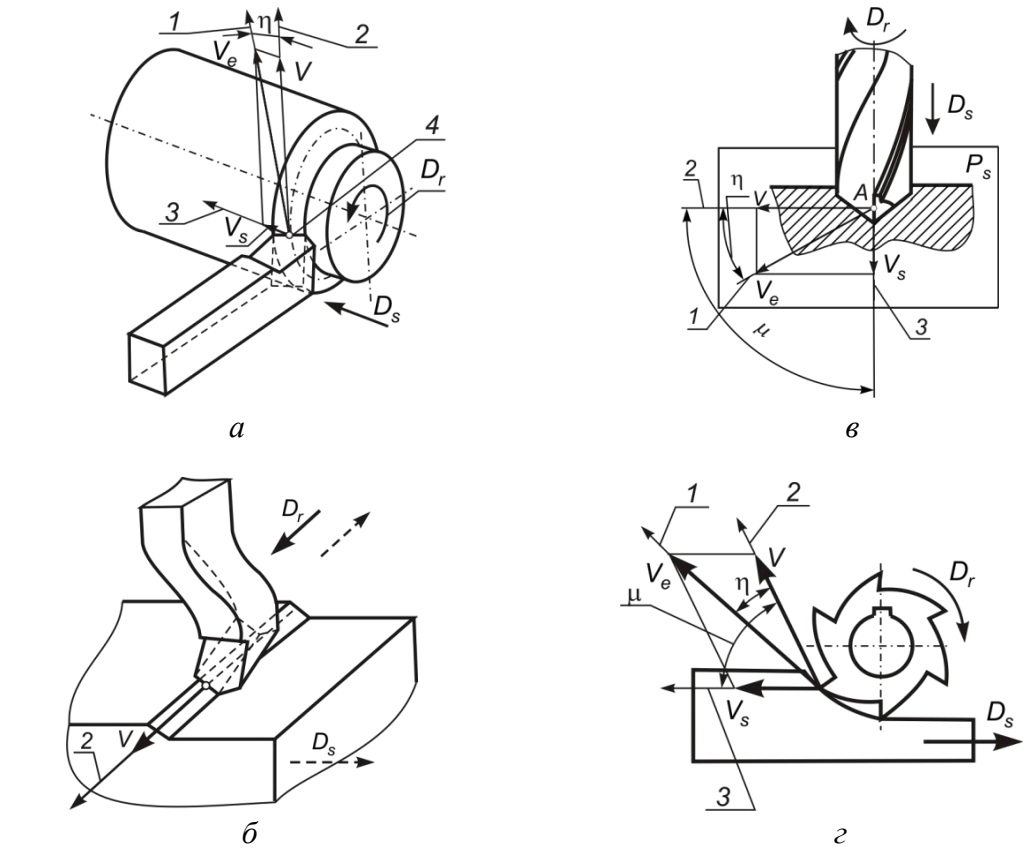


Рисунок 1.2 – Элементы движений в процессе резания:

а – при точении; *б* – при строгании;
в – при сверлении; *г* – при фрезеровании;

1 – направление скорости результирующего движения резания – V_e;
2 – направление скорости главного движения резания – V;
3 – направление скорости движения подачи – V_S

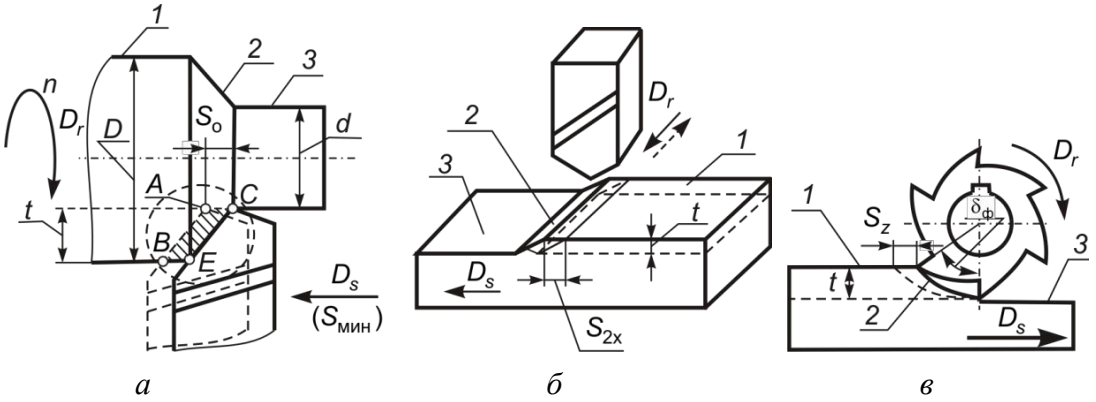


Рисунок 1.3 – Виды подач при резании лезвийным инструментом:

а – подача на оборот при точении S_0 (S); *б* – подача на двойной ход при строгании S_{2x};
в – подача на зуб при фрезеровании S_z;

1 – обрабатываемая поверхность; *2* – поверхность резания;
3 – обработанная поверхность

• ***подача на двойной ход*** S_{2x}, мм/дв.ход – подача, которая соответствует одному двойному ходу заготовки или инструмента; подачу на двойной ход используют при строгании (рис. 1.3 *б*), долблении, шлифовании и некоторых других видах обработки;

• ***минутная подача*** $S_{мин}$, мм/мин – перемещение инструмента или заготовки за одну минуту времени: $S_{мин} = Sn = S_z zn$, где n – число оборотов в минуту заготовки или инструмента (частота вращения).

Движения подачи могут отличаться по направлениям (рис. 1.4). Например, при точении перемещение резца параллельно оси заготовки называют ***продольной подачей*** (рис. 1.4 *а*), а перпендикулярно к оси – ***поперечной*** (рис. 1.4 *б*, *в*).

В случае комбинированного движения при точении образуется коническая или фасонная поверхности (рис. 1.4 *г*, *д*).

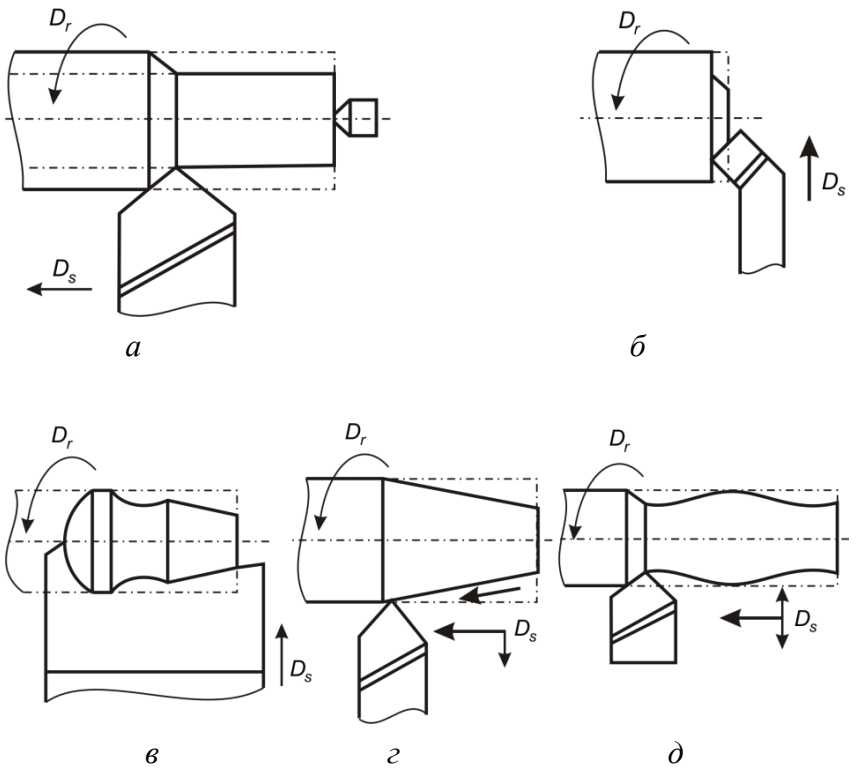


Рисунок 1.4 – Главные движения резания и движения подачи при обработке различных поверхностей деталей точением:
а – цилиндрической; *б* – торцевой; *в*, *д* – фасонной; *г* – конической

Суммирование скоростей V и V_S позволяет определить скорость результирующего движения резания V_e (см. рис. 1.2). Вектор этой скорости

V_e всегда касательный к траектории результирующего движения D_e данной точки инструмента.

На обрабатываемой заготовке при снятии стружки различают три поверхности: ***обрабатываемую***, которая частично или полностью удаляется при обработке; ***обработанную***, созданную на заготовке в результате обработки, и ***поверхность резания***, образованную режущей кромкой инструмента в результирующем движении резания (рис. 1.5, рис. 1.6).

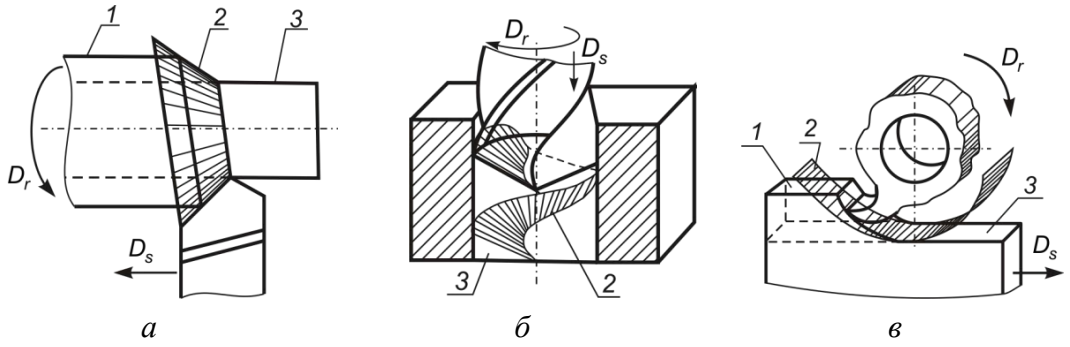


Рисунок 1.5 – Поверхности при точении (*а*), сверлении (*б*) и цилиндрическом фрезеровании (*в*):
1 – обрабатываемая; *2* – резания; *3* – обработанная

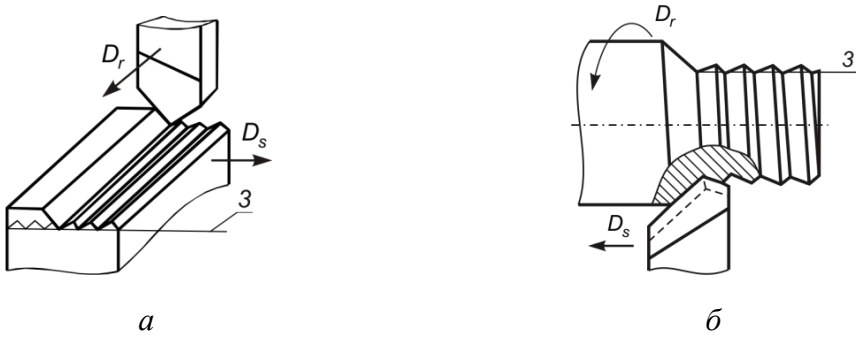


Рисунок 1.6 – Реальная форма обработанной поверхности при строгании (*а*) и точении (*б*)

В современной промышленности используются режущие инструменты, которые отличаются один от другого эксплуатационным назначением (например, резцы, фрезы), видом оборудования, на котором они применяются (токарное, фрезерное), материалом режущей части, конструктивным исполнением и т. п. Однако в каждом из них можно выделить одно или несколько режущих лезвий (в форме режущего клина), которые созданы для срезания слоя материала (припуска). Форма режущих лезвий, образованная определенными поверхностями, зависит от геометрических

параметров режущей части инструмента и непосредственно влияет на условия резания. Как правило, особенности геометрии лезвий любых сложных инструментов изучают на основе формы, понятий и определений самого простого инструмента – токарного резца.

Резец (рис. 1.7) состоит из двух частей: рабочей (*I*) – режущего лезвия и крепежной части (*II*), которая служит для фиксирования лезвия, а также для базирования и закрепления резца на станке. Режущее лезвие образуется пересекающимися передней и задними поверхностями.

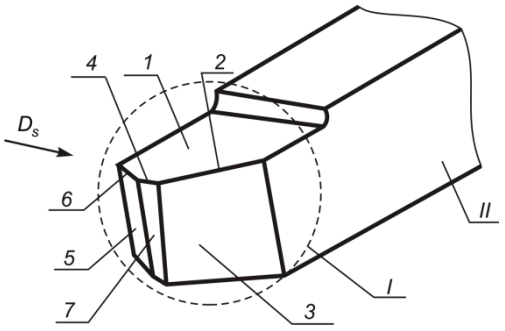


Рисунок 1.7 – Элементы конструкции, поверхности и кромки на рабочей части лезвийных инструментов

Передней поверхностью *1* (A_γ) называют ту поверхность лезвия инструмента, которая в процессе резания контактирует со срезаемым слоем и стружкой.

Поверхности лезвия инструмента, которые контактируют в процессе резания с поверхностями на заготовке (резания и обработанной), называются задними поверхностями. Передняя и задние поверхности инструмента могут быть вогнутыми, выпуклыми, плоскими или их комбинациями.

Главная задняя поверхность *3* (A_α) является поверхностью инструмента, которая контактирует с поверхностью резания. Поверхность лезвия инструмента, которая контактирует с обработанной поверхностью, называется вспомогательной задней поверхностью *5* (A'_α).

Линия пересечения передней и главной задней поверхности называется ***главной режущей кромкой***. Линия пересечения передней и вспомогательной задней поверхностью называется ***вспомогательной режущей кромкой.*** Участок режущего лезвия в месте пересечения двух задних поверхностей (или главной и вспомогательной режущих кромок) образует вершину лезвия. Для улучшения работы инструмента часто режущую кромку вершины лезвия очерчивают дугой окружности радиуса $r_в$ (радиус при вершине) или прямой линией длиной l_0 (рис. 1.8).

Независимо от способа окончательной заточки режущего лезвия оно не может быть сформировано идеально острым. В действительности передняя и задняя поверхности лезвия соединяются с помощью некоторой округляющей поверхности, которая характеризуется радиусом округления режущей кромки ρ (рис. 1.9) в сечении ее нормальной секущей плоско-

стью. Для инструментов разных типов этот радиус находится в пределах 0,005…0,05 мм.

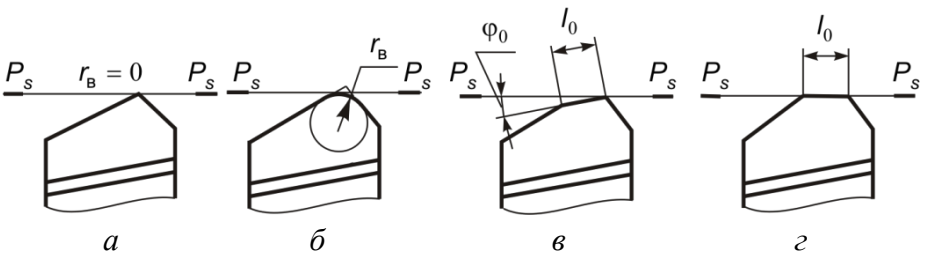


Рисунок 1.8 – Оформление вершины режущих инструментов

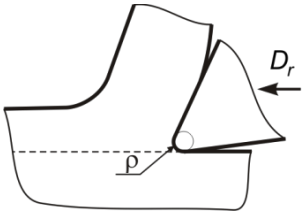


Рисунок 1.9 – Радиус округления режущей кромки

Существующее в наше время разнообразие обработок резанием, конструкций и геометрии инструментов, свойств обрабатываемых материалов, широкие пределы изменения режимов резания обусловливают практически безграничное число возможных комбинаций условий резания. Однако все они могут быть сведены к сравнительно небольшому числу основных типов обработки режущим лезвием. Их классификация, как правило, выполняется по следующим признакам.

1. По количеству режущих кромок, которые принимают участие в резании, – ***свободное*** и ***несвободное*** (рис. 1.10).

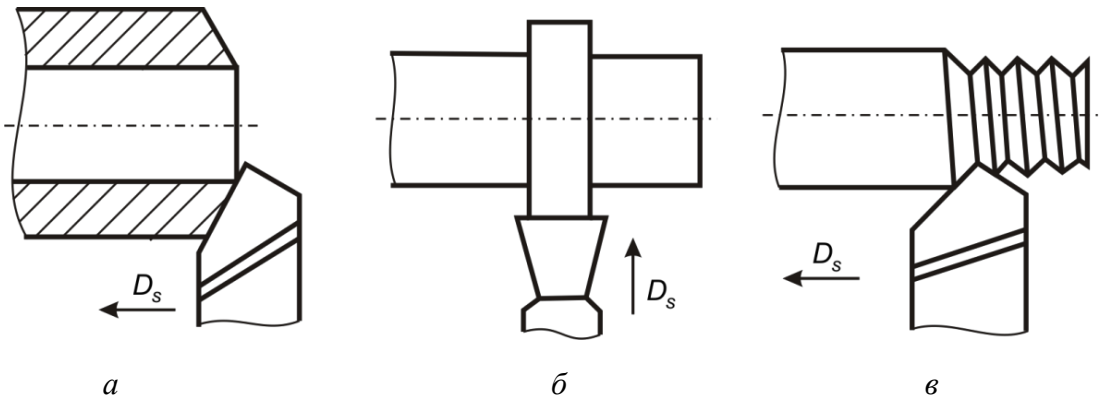
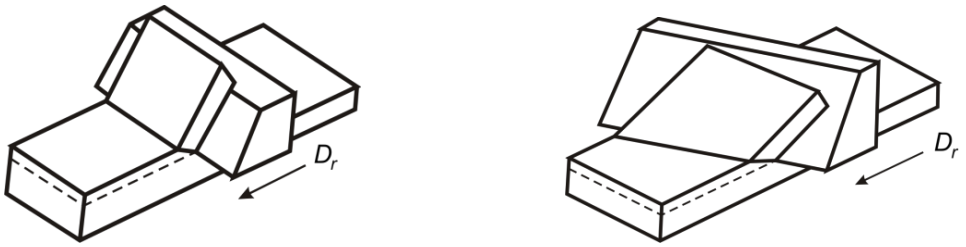


Рисунок 1.10 – Примеры свободного (*а*, *б*) и несвободного (*в*) резания

2. По ориентации главной режущей кромки относительно вектора скорости главного движения – ***прямоугольное*** **(*ортогональное*)** и ***косоугольное*** (рис. 1.11).



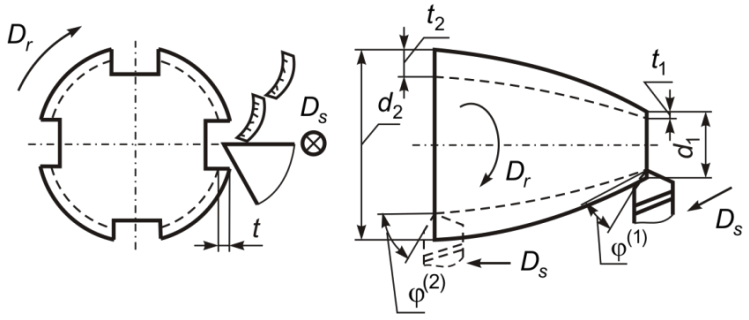
а *б*

Рисунок 1.11 – Прямоугольное (ортогональное) (*а*)
и косоугольное (*б)* резание

3. По количеству лезвий, которые одновременно принимают участие в работе, – ***одно-*** и ***многолезвийное***. К первому виду относится точение, строгание, долбление; ко второму – сверление, фрезерование и т. п.

4. По форме сечения срезаемого слоя – с ***постоянным*** и ***переменным сечениями***.

5. По времени и условиям контакта режущего лезвия с заготовкой – ***непрерывное, прерывистое и нестационарное резание*** (рис. 1.12).



а *б*

Рисунок 1.12 – Схемы прерывистого (*а*) и нестационарного (*б*) резания

Лекция 2. Элементы конструкции и геометрические параметры режущей части инструмента (на примере токарного резца)

Любой режущий инструмент нужно рассматривать с двух точек зрения: как некоторое геометрическое тело определенной формы и размеров или как орудие труда, с помощью которого осуществляется определенный вид обработки. В соответствии с этим и геометрические параметры инструмента целесообразно разделять на параметры инструмента как геометрического тела, необходимые при изготовлении инструмента (так назы-