



Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования  
«Гомельский государственный технический  
университет имени П. О. Сухого»

Кафедра «Металлорежущие станки и инструменты»

**Ю. А. Новоселов**

## **ТЕОРИЯ РЕЗАНИЯ**

**ПОСОБИЕ**

**для студентов**

**машиностроительных специальностей**

**Электронный аналог печатного издания**

**Гомель 2007**

УДК 621.9(075.8)  
ББК 30.61я73  
Н76

*Рекомендовано к изданию научно-методическим советом  
машиностроительного факультета ГГТУ им. П. О. Сухого  
(протокол № 5 от 29.05.2006 г.)*

Рецензент: канд. техн. наук, доц., зав. каф. «Технология машиностроения»  
ГГТУ им. П. О. Сухого *М. П. Кульгейко*

**Новоселов, Ю. А.**

Н76 Теория резания : пособие для студентов машиностроительных специальностей / Ю. А. Новоселов. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2007. – 100 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <http://gstu.local/lib>. – Загл. с титул. экрана.

ISBN 978-985-420-538-0.

Данная книга предназначена для самостоятельного изучения первой базовой учебной дисциплины технологического цикла, на основе теоретических положений которой строится материал большинства других специальных дисциплин.

Фундаментальные положения этой учебной дисциплины лежат в основе курсовых и дипломных проектов по кафедрам «Технология машиностроения» и «Металлорежущие станки и инструменты».

Для студентов машиностроительных специальностей.

**УДК 621.9(075.8)  
ББК 30.61я73**

**ISBN 978-985-420-538-0**

© Новоселов Ю. А., 2007  
© Учреждение образования  
«Гомельский государственный технический  
университет имени П. О. Сухого», 2007

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
Глава 1. ПРОЦЕСС РЕЗАНИЯ .....	6
1.1. Значение обработки резанием .....	6
1.2. Цели и задачи теории резания .....	8
1.3. Понятие обработки резанием .....	10
1.4. Элементы режущего инструмента .....	14
1.5. Диалектика процесса резания .....	18
1.6. Краткий исторический обзор .....	20
Глава 2. ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ .....	23
2.1. Основные свойства и группы .....	23
2.2. Углеродистая инструментальная сталь .....	26
2.3. Легированная инструментальная сталь .....	26
2.4. Быстрорежущая сталь .....	27
2.5. Твёрдый сплав (металлокерамика) .....	28
2.6. Минералокерамика и керметы .....	29
2.7. Природный алмаз .....	31
2.8. Синтетические сверхтвёрдые материалы (СТМ) .....	32
2.9. Абразивные материалы .....	35
Глава 3. КИНЕМАТИКА РЕЗАНИЯ .....	39
3.1. Движения резания .....	40
3.2. Количественные характеристики движений .....	43
3.3. Рабочая плоскость .....	45
3.4. Технологическая система координат .....	48
3.5. Кинематические схемы резания .....	52
3.6. Траектория резания .....	59
3.7. Поверхность резания и направляющие векторы .....	65
3.8. Координатные плоскости и системы .....	71
3.9. Классификация разновидностей резания .....	78
3.10. Способы токарной и фрезерной обработки .....	84
3.11. Способы осевой и строгально-долбёжной обработки .....	89
3.12. Способы протяжной и абразивной обработки .....	93
ЛИТЕРАТУРА .....	99

## ВВЕДЕНИЕ

Технологические процессы изготовления деталей машин в условиях современного машиностроительного производства базируются на различных видах обработки исходных материалов. Наиболее массовым и ответственным видом обработки, обеспечивающим максимальный съём материала, наивысшее качество образуемой поверхности, наибольшую точность при минимальных материальных и энергетических затратах, является обработка резанием. Её преимуществами является также и то, что она позволяет обрабатывать весьма сложные поверхности и поверхности в труднодоступных местах.

Комплекс теоретических знаний и практических представлений об обработке резанием составляет важную основу инженерно-технических знаний специалиста в области машиностроения. Будучи вооружённым этими знаниями и навыками современный инженер-механик может самостоятельно решать на производстве сложные проблемы технологических процессов, связанные с производительностью и точностью обработки, шероховатостью получаемой поверхности, качеством поверхностного слоя, контролем параметров деталей, рациональным использованием оборудования, надёжностью и долговечностью обработанных деталей, технико-экономическими характеристиками процесса, безопасностью труда, научной его организацией и т. д. Теоретической основой формирования всех этих инженерно-технических знаний специалиста и является специальная учебная дисциплина – теория резания.

За последние 20–25 лет претерпела существенные изменения система основополагающих понятий теории резания в связи с выходом в свет и внедрением в СССР в 1984 г. трёх терминологических государственных стандартов на обработку резанием:

1. ГОСТ 25762-83. Обработка резанием. Термины, определения и обозначения общих понятий.
2. ГОСТ 25761-83. Виды обработки резанием. Термины и определения общих понятий.
3. ГОСТ 25751-83. Инструменты режущие. Термины и определения общих понятий.

Однако охватываемая этими стандартами новая система понятий обработки резанием в полном объёме не вошла ещё в изданные учебники и учебные пособия по теории резания. В отдельных же далеко не редких случаях эти понятия в учебной литературе освещаются неточно и не в полном объёме, что свидетельствует о том, что её

авторы сами недостаточно освоили сущность стандартизованных понятий.

Учитывая это, автор данных строк, являясь одним из разработчиков упомянутых стандартов, поставил перед собой задачу написать методическое пособие по первому разделу курса теории резания, связанному с кинематикой резания. В него автоматически вошли и инструментальные материалы как начальный этап общего знакомства с обработкой резанием. Материал в пособии излагается с учётом перечисленных ГОСТов, действующих терминологических рекомендаций СЭВ и ИСО, а также материалов собственных методологических исследований автора.

# Глава 1. ПРОЦЕСС РЕЗАНИЯ

## 1.1. Значение обработки резанием

Бурное развитие всех сфер человеческой деятельности требует создания огромного множества разнообразных агрегатов, станков, механизмов, машин и установок, значительно расширяющих физические и творческие возможности человека. Эти устройства в большей или меньшей мере, в зависимости от их назначения, состоят из деталей, получаемых путём механической обработки резанием. У таких деталей форма, размеры, точность, технологические и эксплуатационные данные, а также долговечность и себестоимость, в значительной степени определяются тем, насколько правильно выбран вид обработки резанием, назначены режим резания и прочие условия обработки, сконструирован режущий инструмент, применен тип станка и т. д.

Обработка резанием в связи с этим имеет весьма широкое практическое применение. Она используется в различных отраслях машиностроения, включая собственно машиностроение и станкостроение, автотракторное, транспортное, сельскохозяйственное, судостроительное, авиационное, энергетическое, электронное, оборонное и другие виды машиностроения, а также машиностроение для лёгкой, пищевой, нефтяной, химической и нефтегазоперерабатывающей промышленности, строительства, транспорта, приборостроения, связи, бытового и коммунального машиностроения, машиностроения для животноводства и кормопроизводства. Обработка резанием имеет также применение в космической и ракетной технике, в радиотехнике, геологии, медицине, искусстве, быту. Она применяется в ремонтных службах практически любых предприятий для восстановления машин, прочих технических объектов и изготовления их запасных частей.

Обработка резанием является весьма специфичным видом обработки материалов. Она создаёт на детали довольно сложные поверхности путём их формирования из внутренних слоев обрабатываемого материала за счёт срезания лишнего слоя. Эти свежееобразованные из внутренней основы материала поверхности (так называемые ювенильные поверхности) обладают особыми свойствами, которые обуславливают их наибольшую пригодность для изготовления ответственных деталей. К таким их свойствам относятся: высокая химиче-

ская чистота, однородность структуры на всей площади поверхности, отсутствие дефектного слоя, наведенного в детали предшествующей обработкой, высокая точность, возможность обеспечивать предельно низкую шероховатость поверхности, особое состояние поверхностного слоя и т. д.

По сравнению с другими видами металлообработки обработка резанием характеризуется меньшими технологическими потерями (отходами) металла. Так, по данным профессора Зорева Н. Н. потери металла в технологическом процессе составляют: при литье – 44 %, при обработке давлением – 40 %, при обработке резанием – 17 %.

Обработка резанием отличается и от таких видов обработки материалов, которые своими способами и средствами также создают новые поверхности деталей машин (например, от электрохимической, электроэрозионной, ультразвуковой и лазерной обработок), значительно большей производительностью процесса (съёмом обрабатываемого материала в единицу времени,  $\text{см}^3/\text{с}$ ) и меньшей затратой электрической энергии (мощности в кВт, затраченной на удаление  $1 \text{ см}^3$  материала,  $\text{кВт}/\text{см}^3$ ). Сравнение обработки резанием с другими видами обработки по производительности и энергетическим затратам (по данным профессора Сахарова Г. М.) приведены в табл. 1.1.

Как видно из табл. 1.1, по производительности процесса и удельным энергозатратам обработка резанием находится вне конкуренции со стороны других видов обработки деталей, связанных с образованием новых поверхностей.

В силу данной специфики обработка резанием сопровождается многочисленными сложными физическими явлениями, которые в свою очередь оказывают весьма сложное и противоречивое влияние на качество поверхности и эффективность обработки. Поэтому для успешного использования обработки резанием в производстве и восстановлении машин была введена специальная научная дисциплина, которая получила название теории обработки резанием.

**Теорией обработки резанием, или теорией резания** называется совокупность теоретических представлений о внутренней физической природе резания, о закономерностях протекания тех или иных явлений в процессе обработки, о грамотном выборе условий резания, инструмента и станка.

Таблица 1.1

**Производительность и энергозатраты  
различных видов обработки материалов**

<b>Виды обработки материалов</b>	<b>Производительность, см<sup>3</sup>/с</b>	<b>Энергозатраты, кВт/см<sup>3</sup></b>
Лезвийная обработка	14	3
Абразивная обработка	8	30
Электрохимическая обработка	1	500
Электроэрозионная обработка	0,1	150
Ультразвуковая обработка	0,005	150
Лазерная обработка	0,0001	150 000

Теория резания возникла на базе технологии машиностроения и превратилась в настоящее время в сложную самостоятельную науку. Если технология машиностроения указывает на то, как, какими приемами и в какой последовательности нужно обрабатывать ту или иную деталь, то теория резания отвечает на вопрос о том, какие последствия оставляет на детали выбранный технологический процесс и почему. В этом и состоит принципиальное различие технологии машиностроения и теории резания.

Вместе с тем технология машиностроения и теория резания органически между собой связаны. Теория резания, опирающаяся на современные достижения физики, химии, механики, металловедения, теплотехники, электротехники, математики и других наук, является своего рода научной основой технологии машиностроения. Знание теории резания, как уже было отмечено, позволяет инженерам-технологам достаточно быстро решать технологические проблемы производства.

### **1.2. Цели и задачи теории резания**

Изучая физические основы технологических процессов обработки резанием, теория резания служит интересам производства и преследует те же конечные практические цели, что и технология машиностроения.

Вместе с тем, кроме чисто производственных целей, теория резания как наука ставит перед собой комплекс целей для решения соб-



ственных научных задач. Прежде всего, теория резания помогает производителям достичь те главные цели, которые поставлены перед машиностроителями и металлообработчиками решениями правительства, а именно:

1. Повышение производительности обработки за счет применения производительных видов резания, прогрессивных многолезвийных режущих инструментов, многоинструментальной обработки, рациональных режимов резания, эффективных инструментальных материалов и смазывающе-охлаждающих сред, многостаночного обслуживания и других мероприятий.

2. Снижение себестоимости обработки резанием за счет уменьшения расходов, связанных с процессом резания, инструментом и станком.

3. Повышение качества изделий, получаемых путем механической обработки резанием.

Помимо главных целей теория резания преследует и другие цели, определяемые её местом в системе технологических знаний и ролью в решении вопросов дальнейшего совершенствования технологических процессов обработки резанием. Она исследует внутренние закономерности процесса резания, создаёт единый научный аппарат, присущий всем разновидностям обработки резанием, получает необходимые расчетные зависимости для проектирования режущего инструмента, металлорежущих станков и приспособлений, формулирует требования к металлургии инструментальных материалов. По мере появления в машиностроении новых труднообрабатываемых материалов таких, например, как жаропрочные, кислотоупорные, титановые сплавы, керамика, пластмассы, ферриты, минералы, композиционные материалы и т. д., теория резания разрабатывает способы и средства их эффективной обработки, т. е. занимается решением вопросов обрабатываемости материалов.

В современных условиях, характеризующихся более интенсивным проникновением вычислительной техники в производство (станки с числовым программным управлением и роботы), в инженерную практику (системы автоматизированного проектирования – САПР) и в инженерно-техническую информатику, в теории резания создаются методологические и теоретические основы обработки сложных поверхностей, проектирования для этих целей режущего инструмента и станков, построения оптимальных технологических процессов их обработки, формализации и хранения инженерной и технологической

информации, теоретические основы создания гибких автоматизированных производств (ГАП) и т. д.

Достичь указанные цели применительно к конкретным производственным условиям оказывается весьма непросто. Причиной является большая физическая сложность процесса резания, трудность изучения важнейших его закономерностей.

Для получения необходимых практических результатов и рекомендаций теория резания решает задачи, связанные с изучением:

1. Кинематики процесса резания.
2. Геометрии режущих инструментов и заготовки.
3. Механики стружкообразования.
4. Сил резания.
5. Тепловых явлений.
6. Износа режущих инструментов.
7. Методов определения рациональных режимов резания.

### 1.3. Понятие обработки резанием

Слово «резание» имеет широкий смысл и, можно сказать, всеобщее употребление. Оно означает процесс механического отделения твердым острым предметом некоторой части от целого тела или деления целого тела на части. В таком физическом понимании резание встречается в самых разнообразных частных видах трудовой деятельности человека и приемах его работы: разрезка бумаги, чистка картофеля, отрезка масла для бутерброда, скалывание льда, столярная обработка древесины, пахота земли, рытье канавы, обрубка литья, опиление металла напильником и другие работы. Процесс использования резания при механической обработке различных деталей (техническое понятие резания) носит название обработка резанием.

**Обработкой резанием** называется обработка, заключающаяся в образовании новых поверхностей путем деформирования, разрушения и последующего отделения лишних слоев материала с образованием стружки.

Принцип обработки резанием представлен схематично на рис. 1.1. В непосредственной близости от твердого тела 1 совершает определенное относительное движение другое более твердое тело 2 двух принципиально различных форм: округлой (рис. 1, а) и клинообразной (рис. 1, б). Если внешние контуры этих тел по ходу движения пересекутся, то тело 2, проникнув в контур тела 1, вызовет интенсивное деформирование и разрушение его слоя на участке пересечения контуров тел. Этот «лишний» слой тела 1 после деформирования и

разрушения отделяется в виде некоторого тела 3. В результате этого на контуре тела 1 появляется новая поверхность. Так происходит обработка резанием.

Упомянутые три тела, участвующие в процессе резания, будем называть **компонентами обработки резанием**. Каждое из них имеет определенное название и обозначение:

- тело 1 (предмет обработки) называется **заготовкой 3**;
- тело 2 (средство обработки) называется **режущим инструментом И**;
- тело 3 (отход обработки) называется **стружкой С**.

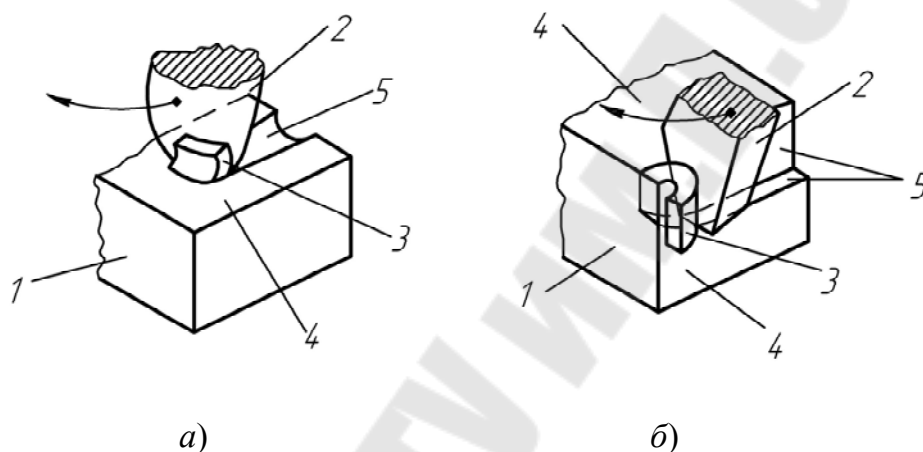


Рис. 1.1. Схема процесса резания при абразивной (а) и лезвийной (б) обработках: 1 – заготовка 3; 2 – режущий инструмент И; 3 – стружка С; 4 – обрабатываемая поверхность; 5 – обработанная поверхность

На заготовке (рис. 1.1) можно указать обрабатываемую 4 и обработанную 5 поверхности. **Обрабатываемой поверхностью** называется исходная поверхность заготовки, частично или полностью удаляемая при обработке. **Обработанная поверхность** – это поверхность, образованная на заготовке в результате обработки. Она является как бы конечным результатом обработки резанием. Обработанная поверхность, а также относительно малый слой заготовки, примыкающий к ней (так называемый **поверхностный слой**), должны удовлетворять всем требованиям, предъявляемым к данной поверхности детали производимой машины по точности формы и размеров, шероховатости, структуре, химическому составу, механическим свойствам, наводимым при обработке напряжениям и т. д. Вся совокупность характеристик обработанной поверхности и поверхностного слоя заготовки, связанного с этой поверхностью, носит название **качества обработки**.

На рис. 1.2 изображены примеры обрабатываемой и обработанной поверхностей для некоторых разновидностей обработки резанием.

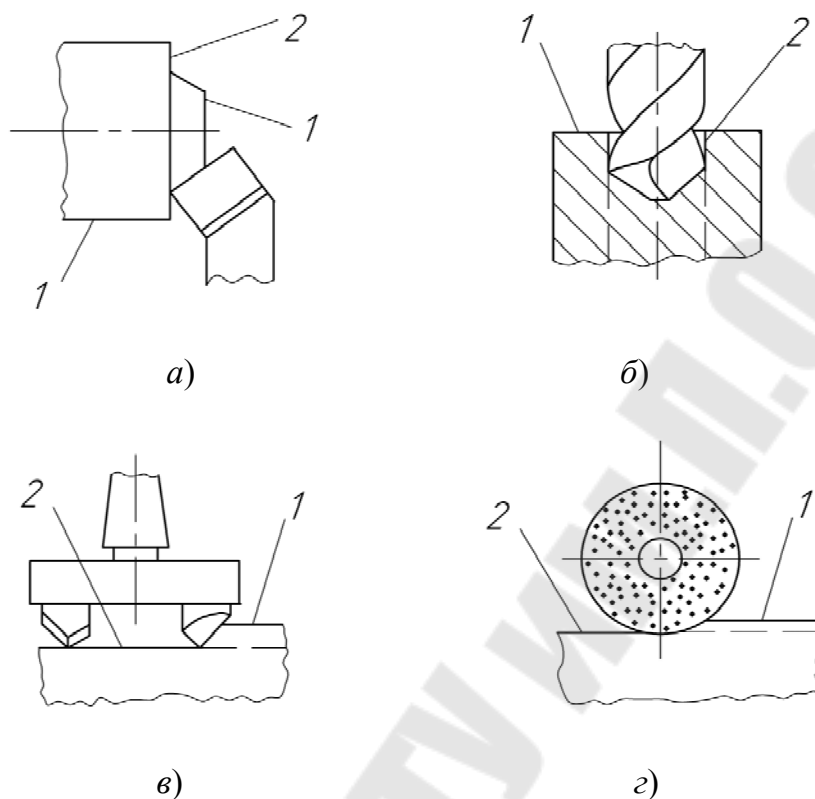


Рис. 1.2. Поверхности заготовки при подрезании торца на токарном станке (а), сверлении (б), торцовом фрезеровании (в) и плоском шлифовании (г):  
1 – обрабатываемая поверхность; 2 – обработанная поверхность

Образование обработанной поверхности требуемого качества в большей мере относится к достаточному условию процесса резания, т. к. такая же поверхность на заготовке в принципе может быть получена и другими видами обработки, например, в результате обработки давлением. Необходимым же условием существования процесса резания является наличие стружки при образовании поверхности, т. е., иными словами, без стружки нет резания.

Для обеспечения этого важного условия процесса резания режущий инструмент в той своей части, которая проникает под отделяемый слой заготовки, должен быть достаточно острым, т. е. иметь какое-то острие. Остриё инструмента, имеющее округлую форму (округлый режущий элемент) и выполненное из кристаллического, преимущественно неметаллического, материала, носит название **абразивного зерна**. Абразивные зерна образуются в результате механического дробления (измельчения) исходных конгломератов (кусков) ин-

струментального материала. Обработка резанием абразивными зернами называется **абразивной обработкой** (рис. 1.1, а). Остриё же, имеющее клинообразную форму (клинообразный режущий элемент) с четко оформленными гранями, называется **лезвием инструмента**. Лезвия образуются путем соответствующей обработки резанием. Обработка резанием лезвиями называется **лезвийной обработкой** (рис. 1.1, б).

Процесс резания осуществляется на специальной обрабатывающей машине, которая называется **металлорежущим станком**. Заготовка и режущий инструмент закрепляются на станке с помощью специальных устройств, называемых **станочными приспособлениями**. Во время обработки создается замкнутая система (рис. 1.3) последовательно соединенных элементов: станок Ст – приспособление для инструмента Пи – инструмент И – заготовка З – приспособление для заготовки Пз – станок Ст. Такая система не так давно была названа **технологической системой обработки резанием** (старое ее обозначение СПИД: станок – приспособление – инструмент – деталь). Она состоит, как это показано на рис. 1.3, из четырех подсистем: подсистемы процесса резания ИЗ, подсистемы инструмента ПиИ, подсистемы станка Ст, подсистемы заготовки ПзЗ. Каждая из этих подсистем и технологическая система в целом имеют комплекс характеристик (жесткость, прочность, виброустойчивость, теплораспределение, надежность, долговечность и др.), которые оказывают весьма существенное влияние на различные стороны процесса резания и все его конечные результаты.

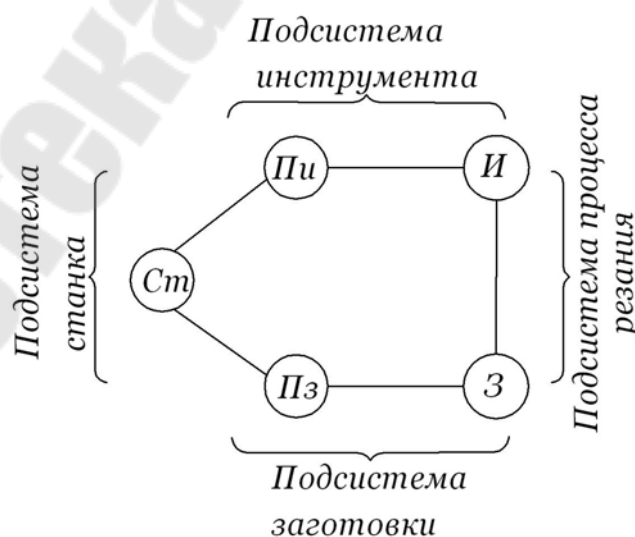


Рис. 1.3. Структура технологической системы обработки резанием

Эти подсистемы рассматриваются в ряде специальных курсов:

- подсистема ИЗ – в курсе «Теория резания»;
- подсистема Ст – в курсе «Металлорежущие станки»;
- подсистема ПиИ – в курсах «Проектирование режущего инструмента» и «Технология инструментального производства»;
- подсистема ПзЗ – в курсе «Проектирование станочных приспособлений».

Технологическая система в целом является предметом рассмотрения в курсе «Технология машиностроения».

#### 1.4. Элементы режущего инструмента

Рассмотрим основные элементы режущего инструмента и связанные с этим принципы классификации общих видов процесса резания.

Современный режущий инструмент представляет собой достаточно массивное тело, оснащенное одним режущим элементом (острием) или каким-то их множеством. В зависимости от формы режущих элементов можно выделить две большие группы режущего инструмента. Инструмент, режущими элементами которого являются абразивные зерна, называется **абразивным режущим инструментом**. Тот инструмент, у которого в качестве режущих элементов используются лезвия, называется **лезвийным режущим инструментом**.

Режущий инструмент состоит, как правило, из трех функциональных частей: 1) **режущей части**, представляющей собой совокупность всех режущих элементов (абразивных зерен или лезвий); 2) **крепежной части**, служащей для крепления на станке и передачи или восприятия усилий резания; 3) **корпусной части**, соединяющей режущую и крепежную части. Крепежная часть режущего инструмента может быть в виде державки (у резца), хвостовика (у внутренней протяжки, сверла, зенкера), посадочного отверстия (у фрезы, зуборезного долбяка), направляющих типа «ласточкин хвост» (у призматического фасонного резца) и других конструктивных элементов. Корпусная часть наиболее наглядно представляется в виде монолитного корпуса (у торцевой фрезы). Во многих же других случаях корпусная часть существует в неявном виде и выступает в форме пластины (у зуборезной гребенки), диска (у зуборезного долбяка, дисковой фрезы), стержня (у резцов), шейки (у круглой протяжки) и т. д.

Лезвие инструмента имеет некоторые важные элементы: переднюю и заднюю поверхности, режущую кромку и вершину (рис. 1.4).

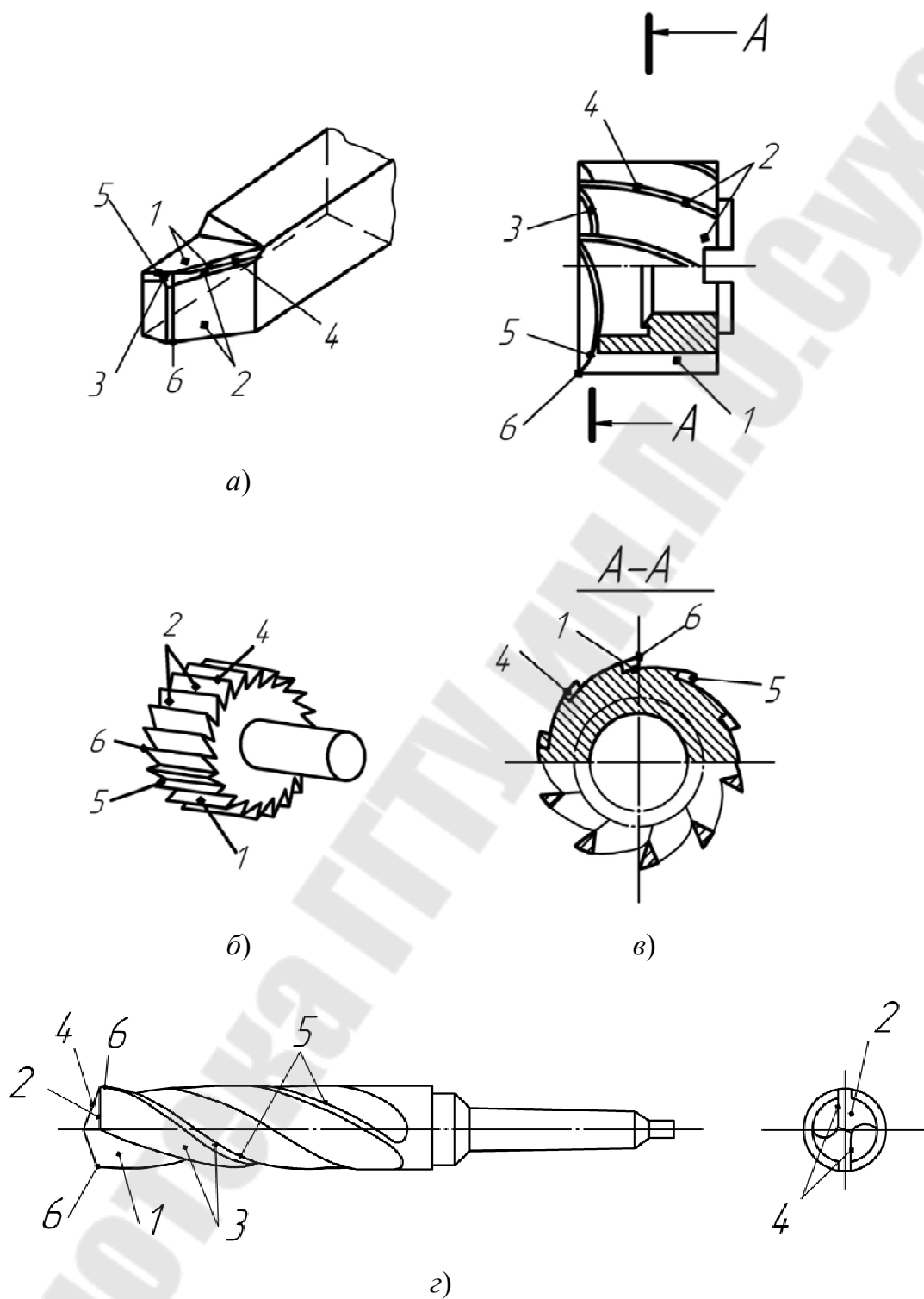


Рис. 1.4. Элементы токарного проходного резца (а), угловой концевой фрезы (б), периферийно-торцевой фрезы (в) и винтового сверла (г):  
 1 – передняя поверхность; 2 – главная задняя поверхность; 3 – вспомогательная задняя поверхность; 4 – главная режущая кромка К; 5 – вспомогательная режущая кромка К'; 6 – вершина лезвия В

**Передней поверхностью**  $A_\gamma$  инструмента называется поверхность лезвия, контактирующая в процессе резания со стружкой, **задней поверхностью**  $A_\alpha$  – поверхность лезвия, контактирующая с поверхностями заготовки. **Режущей кромкой**  $K$  называется кромка, образуемая пересечением передней и задней поверхностей. Точка или участок режущей кромки, имеющие максимальное проникновение под отделяемый слой, называются **вершиной лезвия**  $V$ .

Режущие кромки и задние поверхности инструмента могут быть главными и вспомогательными. **Главной режущей кромкой**  $K$  принято называть режущую кромку или её часть, осуществляющие удаление слоя заготовки (припуска), **вспомогательной же кромкой**  $K'$  – часть режущей кромки, обеспечивающую зачистку обработанной поверхности. Участок режущей кромки, находящийся в непосредственном контакте с удаляемым слоем заготовки (припуском), называется **рабочим участком режущей кромки**. Любую точку, выбранную на режущей кромке для анализа в ее окрестности процесса резания, будем называть **рассматриваемой точкой режущей кромки** и обозначать для единообразия буквой  $M$ . **Главной задней поверхностью**  $A_\alpha$  считается тот участок задней поверхности, который примыкает к главной режущей кромке, **вспомогательной задней поверхностью**  $A'_\alpha$  – участок задней поверхности, примыкающий соответственно к вспомогательной режущей кромке. Отдельные виды инструментов могут не иметь вспомогательной режущей кромки, главная же режущая кромка присутствует всегда на всех инструментах.

Все описанное выше иллюстрируется примерами на рис. 1.4.

В зависимости от формы и расположения в зоне резания режущей кромки можно выделить некоторые общие виды процесса резания. Режущая кромка инструмента может быть как прямолинейной, так и криволинейной со сложной пространственной кривизной. В последнем случае процесс резания значительно усложняется, затрудняется при этом исследование физических закономерностей резания и разработка оптимальных условий процесса. В связи с этим можно выделить **прямолинейное резание**, т. е. резание прямолинейной режущей кромкой, и **криволинейное резание**, т. е. резание криволинейной кромкой.

Взаимное расположение режущей кромки и относительного движения инструмента и заготовки может давать два вида резания: **прямоугольное резание**, в котором режущая кромка в каждой своей точке перпендикулярна траектории этой точки в относительном дви-



жении резания, и **косоугольное резание**, в котором условие перпендикулярности режущей кромки и траектории относительного её движения не соблюдается.

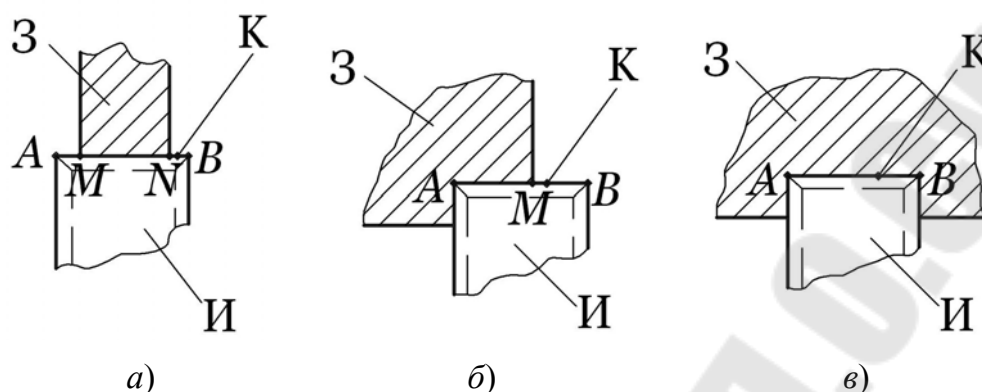


Рис. 1.5. Виды резания по характеру проникновения режущей кромки под отделяемый слой: свободное резание (а); полусвободное резание (б); несвободное резание (в)

Наконец, если смотреть на переднюю поверхность лезвия, то по характеру проникновения режущей кромки под отделяемый слой (по степени проникновения в заготовку) можно выделить три вида резания (рис. 1.5): 1) **свободное резание** (рис. 1.5, а), когда оба конца режущей кромки (точки *A* и *B*) в резании не участвуют, а внедрение режущей кромки в обрабатываемый материал происходит лишь на ограниченном участке её длины (участок *MN*); 2) **полусвободное резание** (рис. 1.5, б), когда один конец режущей кромки (точка *B*) свободен от резания, а внедрение её в материал осуществляется на некотором её участке (участок *AM*); 3) **несвободное резание** (рис. 1.5, в), при котором оба конца режущей кромки (точки *A* и *B*) участвуют в резании и вся кромка оказывается внедренной в обрабатываемый материал. Полусвободное резание, внешний вид которого изображен на рис. 1.5, б, является самым распространенным видом резания. Несвободное резание, используемое при отрезных и прорезных работах, при обработке пазов, шлицев, зубьев, канавок и других внутренних элементов деталей, отличается особо тяжелыми условиями работы лезвия: большим давлением, ухудшенным внутренним теплоотводом из зоны резания, пониженным доступом смазывающе-охлаждающей жидкости (СОЖ), повышенным износом лезвия на концах режущей кромки (точки *A* и *B*), низкой прочностью этих участков и т. д.

## 1.5. Диалектика процесса резания

Процесс резания, содержащий всего три компонента, представляет собой довольно значительную сложность. Эта сложность носит диалектический характер, т. е. он постоянно изменяется в течение всего процесса резания.

Дело в том, что на ход процесса резания оказывает влияние множество обстоятельств, определяемых схемой резания, условиями обработки, внешними и внутренними характеристиками инструмента и заготовки и т. д. К этим обстоятельствам можно отнести форму и размеры инструмента и заготовки, характеристики их относительного движения, вид и способ подвода к зоне резания смазывающе-охлаждающей жидкости, физические характеристики инструмента и заготовки, такие как механические, электрические, тепловые и другие свойства, химический состав, структурно-фазовое состояние и прочие характеристики. Все эти независимые от процесса резания величины, определяющие условия его протекания, будем называть **параметрами процесса резания**. В ходе процесса резания происходит появление каких-то новых характеристик, определяющих его состояние и конечные результаты, или изменение прежних характеристик под влиянием самого процесса резания. Эти зависимые от процесса резания величины различной физической природы, определяющие его состояние и конечные результаты, назовем **показателями процесса резания**. К показателям процесса резания можно отнести, например, силы резания, температуру резания, коэффициент усадки стружки, относительный сдвиг, напряжения, высоту нароста, период стойкости инструмента и т. д.

Параметры и показатели процесса резания, родственные с физической точки зрения, взаимодействуют между собой по определенным физическим законам. Процесс взаимодействия физически родственных параметров и показателей процесса резания представляет собой физическое явление.

В процессе резания возникает целый ряд физических явлений: механические, тепловые, термомеханические, термохимические, электрические, электромагнитные и др. Эти явления протекают одновременно, связаны между собой и оказывают сложное влияние друг на друга, что и определяет диалектическую сложность процесса резания.

Сложность обстановки в зоне резания можно оценить по следующему примерному описанию. При движении инструмента через контур заготовки со скоростью, достигающей в отдельных случаях до

нескольких десятков метров в секунду, он испытывает со стороны заготовки значительное сопротивление, определяемое механическими свойствами её материала. При этом возникают силы резания, достигающие в отдельных случаях до десяти тонн, что при малых площадках контакта инструмента со стружкой и заготовкой вызывает давление в зоне резания иногда  $(1...2) \cdot 10^{-3}$  МПа. Такое давление определяет значительные пластические деформации обрабатываемого материала – параметры кристаллической решетки металла изменяются в отдельных случаях в 10...20 раз, что приводит металл к разрушению. Твёрдость отдельных участков заготовки в процессе обработки за счёт деформации увеличивается в 3...4 и более раз.

Силы резания совершают большую работу, которая превращается в теплоту. Общее тепловыделение в процессе резания может достигать до нескольких десятков килоджоулей в одну секунду, в результате чего температура поверхностей инструмента достигает иногда 1500–2000 °С. При такой температуре происходят существенные структурные изменения в обрабатываемом и инструментальном материалах вплоть до расплавления их поверхностных слоев.

Высокие температура и давление приводят инструмент к быстрому износу на основе приваривания стружки и заготовки к поверхностям инструмента, интенсивного взаимного диффузионного растворения материалов инструмента и заготовки и других явлений.

Можно было бы продолжить рассмотрение цепочки сложных явлений при обработке резанием, однако приведенных примеров вполне достаточно для понимания сложности этого процесса, трудности его изучения и исследования.

Таким образом, резюмируя, можно отметить, что диалектическая сложность процесса резания и трудность его исследования проявляются в следующем:

1. Большое количество параметров и показателей, характеризующих процесс резания.
2. Множество физических явлений, сопровождающих процесс резания.
3. Одновременность физических явлений.
4. Взаимосвязь и взаимообусловленность физических явлений процесса резания.
5. Затруднительность применения при исследовании процесса резания известных закономерностей смежных наук в связи со сложностью форм заготовки и инструмента и условий их взаимодействия.

Эти обстоятельства привели к тому, что в теории резания было разработано множество оригинальных методов исследования процесса резания, получены ценные научные и практические результаты.

В связи с упомянутой диалектической сложностью процесса резания в теории резания исключительно ярко проявляются все законы и категории диалектического материализма. Так закон перехода количественных изменений в коренные качественные чётко просматривается во всех физических явлениях процесса резания: он с одной стороны характеризует влияние параметров процесса резания на различные его показатели, с другой – позволяет установить такое предельное состояние процесса резания, при котором количественные изменения могут вызвать коренное ухудшение качественного состояния процесса резания. Закон единства и борьбы противоположностей также является стержневым законом процесса резания – он описывает главную суть процесса резания, заключающуюся в постоянной взаимной борьбе двух антагонистических противоположностей: инструмента и заготовки. В процессе резания хорошо просматриваются закон отрицания отрицания и другие законы.

## **1.6. Краткий исторический обзор**

Теория обработки резанием является еще сравнительно молодой наукой – её история определяется, можно сказать, чуть более чем столетним периодом. Большинство положений и закономерностей резания в этом периоде было открыто русскими и советскими учёными. Поэтому наука о резании по праву считается отечественной наукой.

Родоначальником теории обработки резанием является профессор Петербургского горного института Иван Августович Тиме (1838–1920), опубликовавший в 1870 г. свою первую научную работу «Сопrotивление металла и дерева резанию». Тиме И. А. выполнил комплекс экспериментально-теоретических исследований процесса стружкообразования, в результате которых было дано научное объяснение механизма превращения срезаемого слоя заготовки в стружку, была разработана классификация видов стружки, установлено существование плоскости скалывания, выведены формулы для расчета силы резания и усадки стружки. Многие результаты исследований Тиме И. А. имеют важное научное значение и в наши дни. Его работы заложили прочный фундамент для дальнейшего развития науки о резании металлов.

Вслед за Тиме И. А. профессор Афанасьев П. А. (1984) и академик Гадолин А. В. (1888) разработали теоретические формулы для расчета сил резания.

Большой вклад в науку о резании внес профессор Харьковского технологического института Зворыкин К. А., опубликовавший в 1893 г. научный труд «Работа и усилие, необходимые для отделения металлических стружек». Зворыкин К. А. разработал схему сил на контактных поверхностях инструмента, установил формульную связь между углом скалывания и условиями обработки, вывел уравнение для подсчета удельной силы резания в зависимости от толщины срезаемого слоя, которое в принципе сохранилось и до наших дней, впервые экспериментально исследовал силы резания, сконструировав для этой цели гидравлический динамометр.

В 1896 г. профессор Михайловской Артиллерийской академии Брикс А. А. опубликовал свою монографию «Резание металлов», в которой впервые произвел глубокий анализ отечественных работ в области теории резания, сделал попытку обобщения и уточнения терминологии режущего инструмента. В этой же книге довольно подробно были рассмотрены элементы механики процесса резания металлов.

В 1905–1910 гг. профессор Петербургского политехнического института Саввин Н. Н. выполнил первые исследования по влиянию смазки и охлаждения на процесс резания и другим вопросам.

Особо важные физические исследования процесса резания металлов были произведены мастером-механиком Петербургского политехнического института Усачевым Я. Г., опубликовавшим в 1915 г. свою работу «Явления, происходящие при резании металлов». Усачев Я. Г. впервые исследовал зону резания с помощью микроскопа, установил существование плоскостей скольжения, первый применил калориметр и термопары для исследования тепловых явлений процесса резания, создал естественную термопару, разработал первую теорию наростообразования и т. д. Он также впервые указал на то, что обработка резанием сопровождается наклёпом поверхностного слоя заготовки. Усачев Я. Г. по праву считается основоположником физических исследований в теории резания.

Первым советским исследователем процесса резания являлся преподаватель Ленинградского военно-механического института Челюсткин А. Н. Из всех его разработок особое значение имеет работа

«Влияние размеров стружки на усилия резания металлов» (1925), в которой получено важнейшее уравнение для расчета силы резания.

Рассмотренные работы явились фундаментом науки о резании металлов. Далее, в период развернутого строительства социализма в нашей стране, наука о резании стала развиваться колоссальными темпами. Появились десятки, а затем и сотни новых ученых-исследователей, внесших значительный вклад в теорию резания. Эти ученые изучали процессы резания отдельно при точении, сверлении, фрезеровании, шлифовании и других более сложных разновидностях обработки. Одновременно с этим совершенствовалась методическая база теории резания: разрабатывались новые эффективные методики исследования различных явлений и характеристик процесса резания, создавались современные исследовательская аппаратура и измерительные средства, совершенствовался математический аппарат. Как результат этой разнообразной работы было опубликовано множество фундаментальных работ.

С 1935 г. в теории и практике резания начал происходить революционный процесс совершенствования. Это связано с тем, что на декабрьском пленуме ЦК ВКП(б) в 1935 г. было принято решение на основании результатов массового стахановского движения пересмотреть существовавшие до того времени в машиностроительной промышленности технические руководящие материалы и нормативы, на которых базировалось техническое нормирование труда в стране. Во исполнение этого решения в 1936 г. при техническом совете Наркомата тяжелой промышленности (впоследствии при Министерстве станкостроения СССР) была создана специальная постоянно действующая Комиссия по резанию металлов под председательством доктора технических наук профессора Надеинской Е. П. в составе ученых Каширина А. И., Кривоухова В. А., Беспрозванного И. М. и Тишина С. Д. В течение пяти лет (1936–1941) Комиссия по резанию металлов являлась по существу Всесоюзным центром по планированию и координации всех научно-исследовательских работ по резанию металлов в Советском Союзе. К её работе было привлечено более 30 вузов страны, множество НИИ и заводских лабораторий. В ходе этой работы учеными было выполнено около 250 капитальных научно-исследовательских работ, число экспериментов в которых превысило 120 000. Такого размаха научно-исследовательских работ в области обработки резанием и богатства полученного материала, завершив-

шихся разработкой Общесоюзных нормативов режимов резания, не знала ни одна страна в мире.

В годы Великой Отечественной войны большое развитие получила практика обработки резанием, в процессе которой был накоплен огромный экспериментальный материал. На основе этого материала в послевоенный период наука об обработке резанием получила бурное развитие, число ученых увеличилось настолько, что в настоящее время практически можно говорить только о тех отечественных ученых, которые явились основателями целых научных школ и направлений: в области кинематики резания – профессор Грановский Г. И., в области механики стружкообразования – заслуженный деятель науки и техники РСФСР профессор Зорев Н. Н., в области динамики резания – профессор Розенберг А. М., в области износа и стойкости инструментов – профессор Лоладзе Т. Н., в области тепловых явлений – профессор Резников А. Н., в области смазки и охлаждения – профессор Клушин М. И., в области обрабатываемости – заслуженный деятель науки и техники РСФСР профессор Резников Н. И. и др.

Весомый вклад в развитие науки и практики металлообработки внесли передовики и новаторы производства такие как Быков П. Б., Борткевич Г. С., Семинский В. К., Колесов В. А. и др.

## **Глава 2. ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

### **2.1. Основные свойства и группы**

Материалы, из которых изготавливаются режущие инструменты, по сравнению с другими материалами должны отвечать более высоким требованиям в смысле следующих их свойств: твердости, прочности, износостойкости, теплостойкости, теплопроводности, химического состава (степени химического родства с обрабатываемым материалом), стоимости.

**Твердостью** называется свойство металла или другого материала сопротивляться внедрению в него другого более твердого тела (индентора). Твердость материала оценивается размерами отпечатка, оставленного на его поверхности стандартным индентором, например, алмазным конусом.

Считается, что для обеспечения нормального резания отношение твердостей инструментального и обрабатываемого материалов должно быть более двух.

**Прочностью** называется свойство металла или другого материала воспринимать без разрушения деформации изгиба, сжатия и удара. Прочность инструментальных материалов оценивается пределами прочности при изгибе  $\sigma_{и}$  и сжатии  $\sigma_{сж}$ , а также ударной вязкостью  $a_{н}$ . При выборе инструментального материала необходимо учитывать прочность в совокупности с твёрдостью, т. к. эти свойства у хрупких инструментальных материалов связаны обратной зависимостью.

**Износостойкостью** называется свойство металла или другого материала сопротивляться механическому изнашиванию. С увеличением износостойкости инструментального материала повышаются режущие свойства инструмента и возрастает его долговечность. Износостойкость инструментального материала определяет стойкость инструмента, т. е. время непрерывной работы инструмента до заданных значений механического износа. Износостойкость находится в прямой зависимости от твердости материала, однако характер этой зависимости ещё не установлен.

**Теплостойкостью** (старое название красностойкость) называется свойство инструментального материала сохранять свои режущие свойства при высокой температуре резания. Теплостойкость оценивается предельной температурой, при которой инструментальный материал уже начинает терять свои режущие свойства в связи с резким изменением его структуры. Эта характеристика материала инструмента является одной из важнейших. Теплостойкость применяемых в настоящее время инструментальных материалов колеблется в весьма широких пределах – от 200 до 1500 °С.

**Теплопроводностью** называется свойство металла или материала проводить тепло от более нагретых участков к менее нагретым. Теплопроводность оценивается коэффициентом теплопроводности  $\lambda$  с размерностью Дж/см · с · °С. С увеличением коэффициента теплопроводности увеличивается теплоотвод из зоны резания в тело инструмента, что снижает температуру резания  $\Theta$ , точнее, температуру контактных поверхностей инструмента, и повышает тем самым стойкость инструмента  $T$ . Это свойство особенно важно при обработке высоколегированных сталей и других труднообрабатываемых материалов с низкими значениями теплопроводности, когда отвод теплоты резания в инструмент является, можно сказать, главным фактором снижения температуры резания.



**Степенью химического родства** инструментального материала с обрабатываемым назовем общность (одинаковость) химических элементов, входящих в состав этих материалов. Чем больше степень химического родства инструментального материала с обрабатываемым, т. е. чем больше в инструментальном материале содержится химических элементов обрабатываемого материала и выше их процент, тем это хуже для работоспособности режущего инструмента, процесса резания и конечных его результатов. В этом случае между инструментом с одной стороны и заготовкой (стружкой) с другой возникают силы контактного молекулярного взаимодействия, приводящие к их схватыванию (частичному привариванию) и взаимному растворению, что в результате способствует налипанию стружки на передней поверхности инструмента, увеличению сил и температуры резания и повышению износа лезвия. Для создания более благоприятных условий обработки необходимо, насколько это возможно, подбирать инструментальный материал с меньшей степенью химического родства с обрабатываемым.

**Стоимость** инструментального материала является важным его свойством, т. к. она определяет себестоимость обработки, а в итоге – стоимость выпускаемых машин. Тем не менее стоимость инструментального материала прямо связана с другими его определяющими свойствами, т. е. стоимость его тем больше, чем выше твердость, прочность, износостойкость, теплостойкость и т. д. И поэтому снижение стоимости применяемого инструментального материала не может быть какой-то самоцелью, т. к. это неизбежно приведёт к снижению его режущих свойств и в конечном счете будет способствовать повышению себестоимости обработки и снижению её производительности.

В настоящее время используются следующие группы инструментальных материалов:

1. Углеродистые инструментальные стали.
2. Легированные инструментальные стали.
3. Быстрорежущие стали.
4. Твёрдые сплавы (металлокерамика).
5. Минералокерамика и керметы.
6. Природный алмаз.
7. Синтетические сверхтвёрдые материалы.
8. Абразивные материалы.

## 2.2. Углеродистая инструментальная сталь

Углеродистыми инструментальными сталями являются стали с повышенным содержанием углерода 0,6...1,4 %. Маркировка этих сталей состоит из буквы «У» от слова «углеродистая» и цифры, выражающей количество в стали десятых долей процента углерода. Основные марки углеродистых инструментальных сталей: У7, У8, У9, У10, У11, У12 и У13. Это стали обыкновенного качества. Высококачественная углеродистая сталь отличается по маркировке тем, что к обозначению стали приписывается буква А. Содержание в углеродистых сталях легирующих элементов не превышает 0,3 %.

Углеродистые инструментальные стали имеют относительно высокую поверхностную твердость HRC 60...63, в глубинных же слоях вследствие низкой прокаливаемости твердость снижается до HRC 40. Они имеют в связи с этим низкую износостойкость. Теплоустойчивость углеродистых сталей 200...250 °С. Кроме того, эти стали при термообработке склонны к поводке и трещинообразованию. Теплопроводность углеродистых сталей составляет  $\lambda = 0,63 \text{ Дж/см} \cdot \text{с} \cdot \text{°С}$ .

Из углеродистых инструментальных сталей изготавливают различные слесарные и кузнечные инструменты, режущие инструменты для дерева, кожи, бумаги, резины, пластических масс, инструменты, работающие с ударной нагрузкой, корпуса и державки сборных и составных инструментов с пластинами твёрдого сплава, штампы. Режущие инструменты для обработки металла изготавливают из сталей с повышенным содержанием углерода (У10А...У13А). Однако такие инструменты могут работать с малыми скоростями резания до 8...10 м/мин и с ручным приводом.

## 2.3. Легированная инструментальная сталь

Легированные инструментальные стали – это стали, в состав которых входят в количестве от 0,5 до 10 % и более такие легирующие элементы, как хром (Х), марганец (Г), кремний (С), вольфрам (В), ванадий (Ф), никель (Н) и др. Маркировка их составляется из букв русского алфавита, обозначающих легирующие элементы, преимущественно в той последовательности, в какой они даны в перечислении. Цифра, стоящая после буквы, обозначает содержание данного химического элемента в процентах. Начальная цифра указывает на процентное содержание углерода в десятых (однозначная цифра) и в сотых (двузначная цифра) долях процента.

Основные марки легированных сталей: X05, 9XC, X6BF, 9XBF, X12, X12M, XB5, X12F1, 95XGCBF.

Легированные инструментальные стали обладают по сравнению с углеродистыми сталями несколько большими износостойкостью и твердостью (например, у XB5 – HRC 70), их теплостойкость составляет 350...400 °С, благодаря чему они допускают скорость резания в 1,5 раза большую, чем углеродистые стали. Теплопроводность легированных сталей  $\lambda = 0,42 \text{ Дж/см} \cdot \text{с} \cdot \text{°С}$ .

Из легированной стали изготавливаются протяжки, метчики, плашки, фрезы, зенкеры, развертки, ножовочные полотна, штампы, в общем любой инструмент с машинным приводом, работающий на невысоких скоростях резания (до 12...15 м/мин).

## 2.4. Быстрорежущая сталь

**Быстрорежущими сталями** называются по существу высоколегированные стали, т. е. стали с высоким содержанием легирующих элементов (от 5 до 20 %). Маркировка этих сталей начинается с русской буквы Р, после которой указывается процентное содержание вольфрама. Далее следуют буквенные обозначения остальных легирующих элементов и их процентное содержание. Основные марки быстрорежущих сталей: Р9, Р12, Р18, Р9К5, Р9Ф5, Р9К10, Р14Ф4, Р18Ф2, Р10Ф5К5, Р18Ф2К5, Р6М5 и т. д.

Быстрорежущие стали отличаются от предыдущих групп инструментальных сталей совокупностью свойств. Они имеют высокую твердость HRC 60...68, повышенную теплостойкость 600...650 °С и хорошие показатели прочности и износостойкости. Вследствие этого быстрорежущие стали могут допускать обработку со скоростями резания  $v = 20...50 \text{ м/мин}$ . При работе же в режиме низких скоростей, свойственных легированным сталям, инструмент из быстрорежущей стали имеет стойкость в 4...8 раз большую стойкости инструментов из легированных сталей. Теплопроводность быстрорежущих сталей  $\lambda = 0,21 \text{ Дж/см} \cdot \text{с} \cdot \text{°С}$ .

Из быстрорежущей стали изготавливают фасонный и сложнопрофильный инструмент, сверла, зенкеры, развертки, плашки, метчики, всевозможные фрезы, протяжки, зуборезный инструмент.

## 2.5. Твёрдый сплав (металлокерамика)

**Твёрдым сплавом** называется продукт спекания при высокой температуре и давлении порошковых масс карбидов тугоплавких металлов (вольфрама, титана, тантала и др.) и кобальта. Кобальт в твердом сплаве содержится в небольших количествах и играет роль связующего материала. Вязкость и прочность твердого сплава во многом зависят от процентного содержания кобальта.

Твёрдый сплав на основе карбида вольфрама подразделяется на три группы:

1. Однокарбидный твердый сплав вольфрамокобальтового состава (группа ВК).
2. Двухкарбидный твердый сплав вольфрамотитанокобальтового состава (группа ТК).
3. Трехкарбидный твердый сплав титанотанталовольфрамокобальтового состава (группа ТТК).

Маркирование твердого сплава осуществляется следующим образом: после каждой буквы в обозначении группы ставится цифра, выражающая процентное содержание обозначенного элемента. Исключение из этого правила составляет трехкарбидный твердый сплав группы ТТК, в котором цифра, стоящая после второй буквы Т, выражает процентное содержание карбидов двух предыдущих металлов. Иногда в конце маркировки можно встретить буквы М или В, означающие соответственно мелкозернистую или крупнозернистую структуры.

Основные марки твердых сплавов:

1. Однокарбидный: ВК2, ВК3, ВК4, ВК6, ВК8, ВК10, ВК12, ВК15, ВК20, ВК30.
2. Двухкарбидный: Т5К10, Т14К8, Т15К6, Т30К4, Т5К12В, Т60К6.
3. Трехкарбидный: ТТ7К12, ТТ10К8А, ТТ10К8Б и ТТ20К9.

Твёрдый сплав по своим свойствам резко отличается от быстрорежущей стали. Его твердость составляет НРА 87...92, теплостойкость определяется температурой: для однокарбидных сплавов – 800 °С, для двух- и трехкарбидных – 900...1000 °С. Твердый сплав обладает очень хорошей износостойкостью. Прочность твердого сплава характеризуется следующими величинами:  $\sigma_{и} = 100...130 \text{ кгс/мм}^2$  (981...1275 МПа),  $\sigma_{сж} = 400 \text{ кгс/мм}^2$  (3924 МПа).

Теплопроводность твердого сплава составляет  $\lambda = 0,27...0,59 \text{ Дж/см} \cdot \text{с} \cdot ^\circ\text{С}$ . В связи с особой дефицитностью вольфрама

в последнее время были созданы и используются в промышленности так называемые безвольфрамовые твердые сплавы на основе карбида титана на никелево-молибденовой связке марок МНТ2, ТМ1, ТМ3 и ТН20. Состав, например, сплава МНТ2 следующий: карбида титана – 74...87 %, никеля – 10...18 %, молибдена – 1,2...7,6 %. Чистовая обработка такими сплавами углеродистой стали производится с более высокой стойкостью инструмента (в 1,5...1,7 раза). Твердый сплав применяется для изготовления любого по сложности режущего инструмента, работающего на повышенных скоростях резания. Скорость резания может быть установлена при обработке твердосплавным инструментом до 500 м/мин (Т15К6) и до 1000 м/мин (Т30К4).

Для создания сложнопрофильного режущего инструмента в последнее время выпускается мягкий полуспеченный так называемый **пластифицированный твердый сплав**, который подвергается механической обработке лезвийным инструментом. После обработки резанием и получения необходимых поверхностей и размеров производится окончательное спекание твердосплавных заготовок без нарушения ранее образованных поверхностей.

Заточка твердосплавных пластин осуществляется шлифовальными кругами из зеленого карбида кремния на керамической связке или алмазным кругом. После заточки рекомендуется доводка мелкозернистым алмазным кругом, алмазной пастой или пастой карбида бора на чугунных притирах.

## 2.6. Минералокерамика и керметы

**Минералокерамикой** называется новый инструментальный материал, получаемый прессованием, спеканием и последующей термообработкой технического глинозема (окиси алюминия  $Al_2O_3$ ) с небольшой добавкой окиси магния  $MgO$ . Этот материал называется также корундом. Он имеет белый цвет. В СССР минералокерамика разработана двух видов: микролит ЦМ332 (создатель ЦНИИТМАШ) и термкорунд ЦВ14 (создатель ВНИИАШ).

Минералокерамика имеет следующие показатели: твердость НРА 86...93, теплостойкость 1100...1200 °С и высокую износостойкость. Поэтому она используется при резании со скоростями 500...4000 м/мин (при чистовом и тонком точении твердых и закаленных сталей и чугуна). Минералокерамика ценна также химической инертностью по отношению к обрабатываемым материалам (отсутствие химического родства), в особенности к черным металлам, так как

в её состав не входит ни один химический элемент стали. Это не относится к обработке алюминия, так как в связи с наличием в минералокерамике алюминия, обработка алюминиевых сплавов минералокерамическим режущим инструментом затруднительна из-за сильного налипания стружки на передней поверхности инструмента. И, наконец, наиболее редким преимуществом минералокерамики по сравнению с другими инструментальными материалами является её исключительно малая стоимость (минералокерамика в десятки раз дешевле твёрдого сплава).

К существенным недостаткам минералокерамики относится низкая прочность, в особенности изгибная прочность, которая в 4...5 раз ниже, чем у твёрдого сплава, и в 10...12 раз уступает по прочности быстрорежущей стали. Показатели прочности минералокерамики следующие:  $\sigma_{и} = 30...40 \text{ кгс/мм}^2$  (294...3924 МПа),  $\sigma_{сж} = 250 \text{ кгс/мм}^2$  (2452 МПа). В связи с высокой хрупкостью режущий инструмент, выполненный из минералокерамики, не может работать при прерывистом резании, при неравномерном припуске, при вибрациях технологической системы, при использовании нежесткого оборудования, при низких скоростях резания.

Крепление пластин к державкам и к корпусам инструмента осуществляется либо механическим путем, либо путём приклеивания.

Высокая твердость и низкая теплопроводность  $\lambda = 0,021 \text{ Дж/см} \cdot \text{с} \cdot ^\circ\text{C}$  минералокерамики создают определенные трудности при её заточке. Во избежание неравномерного нагрева пластины и растрескивания в процессе заточки последнюю производят кругами из зеленого карбида кремния на пониженной скорости 4...6 м/с с применением 2–3%-ного раствора соды в воде в качестве охлаждающей жидкости. После заточки необходимо применять доводку по передней и задней поверхностям мелкозернистой пастой карбида бора на чугунных при-тирах.

В настоящее время развивается идея синтеза минералокерамики и металлокерамики, в результате чего появилась новая разновидность керамики, называемая **керметом**. Керметы состоят из окиси алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и сложных карбидов вольфрама и молибдена  $\text{WC}$  и  $\text{Mo}_2\text{C}$  (от 10 до 40 % карбидов металлов). При большем процентном содержании карбидов кермет носит название **карбидной керамики**. Керметы получают спеканием в атмосфере водорода в печах с угольным сопротивлением при температуре 1860...1880 °С.

Керметы (например, кермет HC20M) имеют средние показатели между минералокерамикой и твердым сплавом. В связи с большей прочностью  $\sigma_{\text{н}} = 50...60 \text{ кгс/мм}^2$  ( $490 \cdot 10^6...589 \cdot 10^6 \text{ Па}$ ) по сравнению с минералокерамикой керметы могут применяться не только для производительного чистого точения, но и для прерывистого резания и фрезерования.

## 2.7. Природный алмаз

**Алмаз** – это кристаллическая разновидность углерода. Кристаллы природного (естественного) алмаза имеют форму октаэдров, ромбододекаэдров, гексаэдров (кубов), кривогранных кристаллов. Применение алмаза в качестве инструментального режущего материала обусловлено целым рядом положительных свойств:

1. Алмаз имеет самую высокую твердость из всех известных в природе твердых тел. Его твердость в 4...5 раз выше твердости металлокерамических твердых сплавов, что в переводе на шкалу HRC составило бы HRC 300...400. Твердость по шкале Мооса – 10.

2. Алмаз обладает высокой (непревзойденной) износостойкостью, которая в десятки и сотни раз превосходит износостойкость других инструментальных материалов при обработке цветных металлов и пластмасс.

3. Алмазу свойственна высокая теплопроводность, равная  $\lambda = 1,47 \text{ Дж/см} \cdot \text{с} \cdot ^\circ\text{C}$ , что в 7 раз больше теплопроводности быстрорежущей стали. Благодаря этому алмазное лезвие обладает способностью быстро отводить от режущей кромки в себя теплоту резания, не вызывая в поверхностном слое детали прижогов, структурно-фазовых превращений и других дефектов.

4. Алмаз является химически нейтральным материалом по отношению к любому обрабатываемому материалу, отличается в связи с этим низкой адгезионной способностью, малыми коэффициентами трения, более низкими значениями сил резания и меньшим нагревом инструмента.

5. Алмаз обладает большой анизотропией, способствующей получению на алмазе режущих кромок. Поэтому обработка алмазным инструментом позволяет снизить шероховатость обработанных поверхностей по сравнению с инструментом из твердого сплава и быстрорежущей стали на 2...3 класса.

6. Алмаз имеет чрезвычайно низкий коэффициент линейного (температурного) расширения, который в 2 раза меньше, чем у

твердого сплава, и в 10 раз ниже соответствующего коэффициента у быстрорежущей стали. Это позволяет получать устойчивую точность обработки, в особенности длинных деталей.

Однако алмаз обладает такими существенными недостатками как высокая стоимость (в 50 раз дороже твердого сплава), большая хрупкость и низкая прочность  $\sigma_{и} = 20...40 \text{ кгс/мм}^2$  (200...400 МПа), сравнительно малая теплостойкость (при 750...800 °С алмаз превращается в графит).

Естественный алмаз в основном применяется для изготовления шлифовальных кругов, а также некоторых видов лезвийного инструмента.

## **2.8. Синтетические сверхтвёрдые материалы (СТМ)**

В последние десятилетия для изготовления лезвийного (а также и абразивного) режущего инструмента в качестве заменителей природного алмаза стали использовать ряд кристаллических материалов, которые по комплексу своих свойств не уступают природному алмазу. К таким материалам относятся синтетические (искусственные) алмазы (АС), рубин и лейкосапфир и новые сверхтвёрдые инструментальные материалы на основе нитрида бора (BN), т. е. химического соединения бора и азота.

Производство синтетических алмазов в СССР было начато в 1961 г. по разработкам Украинского научно-исследовательского института синтетических сверхтвёрдых материалов и инструментов (под руководством д-ра техн. наук проф. Бакуля В. Н.) и Института физики высоких давлений АН СССР (под руководством акад. Верещагина Л. Ф.).

**Синтетические алмазы** получают по специальной технологии из графита при высоком давлении (1 млн МПа) и температуре (2500 °С). Полученные таким образом алмазы имеют одинаковые с природными алмазами химический состав, структуру, физические и другие свойства. Они выпускаются как в виде зерен (для абразивной обработки), так и в виде отдельных лезвий (для лезвийной обработки).

В настоящее время искусственные алмазы для абразивной обработки выпускаются в основном трех марок:

1. АСО – алмаз синтетический обычной прочности для изготовления инструментов на органической связке, а также для паст и порошков.

2. АСП – алмаз синтетический повышенной прочности для изготовления инструмента на металлической и керамической связках.



3. АСВ – алмаз синтетический высокой прочности для изготовления инструментов на металлической связке, работающих при больших удельных нагрузках.

Синтетические алмазы подразделяются на балласы (крупнозернистые с размерами зерен 40...50 мкм и более мягкие) и карбонадо (мелкозернистые с размерами зерен до 5 мкм и твердые). **Балласы** имеют округлую форму с мягкой сердцевинкой при более твердой оболочке. Такая особенность повышает их прочность при достаточно высокой режущей способности зерен.

Баллас показывает высокую эффективность при точении цветных сплавов с добавками кремния, стеклопластиков и пластмасс. При этом износостойкость балласовых резцов превышает износостойкость резцов, оснащенных твердым сплавом ВК2 и ВК3М, в 70...80 раз и в 1,5...2,0 раза превышает износостойкость резцов из естественных алмазов. **Карбонадо** представляют собой мелкозернистые округлые агрегаты, состоящие из большого количества мельчайших кристаллов. Они характеризуются высокой твердостью и большой хрупкостью.

К заменителям алмаза можно отнести также такие инструментальные материалы, как **рубин** и **лейкосапфир (сапфир)**, представляющие собой разновидности корунда, т. е. глинозема  $Al_2O_3$ . **Корунд** – кристаллический минерал, имеющий внешний стеклянный блеск и способный до некоторой степени пропускать через себя свет. В зависимости от входящих в его состав дополнительных компонентов корунд получает различные цветные оттенки: от хрома – красный, от вольфрама – серовато-зеленый, от марганца – желтовато-розовый, от никеля – желтый, от титана – розово-фиолетовый и т. д. Такие известные минералы, носящие названия восточный топаз, alexandrit, изумруд, аметист, кунцит, рубин (красный), сапфир (синий), широко используются в ювелирной промышленности. Рубин и лейкосапфир (беловато-синий, бесцветный) нашли применение в технике, в частности в металлообработке в качестве инструментального материала.

В СССР было налажено промышленное производство искусственного корунда путём плавления боксита в электропечах с восстановителем (железными опилками). Из мелкокристаллического корунда методом порошковой металлургии изготавливают режущие вставки для резцов. Рубины и лейкосапфиры применяются при точении, шлифовании и доводке цветных металлов, стекла, минералов, а также при выглаживании. Они обладают высокой твердостью и теплостойкостью.

В 60-х годах в стране учеными Института физики высоких давлений АН СССР под руководством академика Верещагина Л. Ф. был создан и освоен принципиально новый инструментальный материал – так называемый **кубический нитрид бора**, представляющий собой кристаллическую разновидность химического соединения бора и азота (нитрида бора BN). В принципе кубический нитрид бора в природе не обнаружен, а соединение бора и азота (нитрид бора BN) известно более ста лет и представляет собой вещество с химическим составом 43,6 % бора и 56,4 % азота. Нитрид бора имеет гексагональную кристаллическую решетку, как у графита, обладает такими же внешними физическими свойствами, как графит, и имеет в связи с этим название «белый графит». Это обстоятельство после освоения технологии получения синтетического алмаза с кубической решеткой из графита с гексагональной решеткой привело к идее синтеза кубического нитрида бора из гексагонального (белого графита). Эта идея увенчалась большим успехом – была создана новая подотрасль инструментальной металлургии.

Сверхтвердые инструментальные материалы на основе нитрида бора делятся на собственно **кубический нитрид бора (КНБ)**, т. е. монокристалл, и **поликристаллический кубический нитрид бора (ПКНБ)**, т. е. поликристалл. Последний носит следующие названия: **эльбор, боразон, кубонит, гексанит** и др. Различие в названиях определяется разнообразием технологических процессов получения этих материалов. Торговые марки кубического нитрида бора – **композит 01, 05 и 10**, что соответствует названиям: эльбор, композит и гексанит. Эти материалы превосходят по твердости все инструментальные материалы кроме алмаза. Сверхтвердые материалы на основе BN имеют также непревзойденную теплостойкость: КНБ – 1200 °С, ПКНБ – 1500 °С. Недостаток этих материалов – низкая теплопроводность и невысокая прочность  $\sigma_{и} = 100 \text{ кгс/мм}^2 (980 \cdot 10^6 \text{ Па})$ . Применяются они для шлифовальных работ (шлифпорошки и микропорошки), а также благодаря созданию в последнее время в институте физики высоких давлений крупнообъемных поликристаллов при точении, сверлении, фрезеровании и других видах лезвийной обработки. Такой лезвийный инструмент из ПКНБ используется при обработке закаленных сталей, что недоступно алмазу.

## 2.9. Абразивные материалы

**Абразивным материалом** называется твердый неметаллический материал кристаллической структуры, подготавливаемый для использования в абразивном режущем инструменте путем измельчения в виде зерен, которые в зависимости от размеров подразделяются на шлифзерно (размером свыше 160 мкм), шлифпорошки (размером от 30 до 120 мкм) и микропорошки (размером от 5 до 40 мкм). Абразивные материалы делятся на естественные и искусственные. К **естественным абразивным материалам** относятся следующие минералы: природный алмаз, корунд, гранат, кварц и кремень.

Основные характеристики природного алмаза, а также сведения о корунде (рубине, лейкосапфире), были приведены ранее. Рассмотрим остальные естественные абразивные материалы.

**Гранат** – это минерал, представляющий собой сложное изоморфное химическое соединение двух различных металлов с кремнеземом (окисью кремния), называемое **силикатом**. В этих соединениях участвуют металлы: с одной стороны – алюминий, железо, хром, титан, с другой – магний, кальций, марганец, железо. Они носят название соответственно алюмо-, ферро-, хромо-, титаносиликатов магния, кальция, марганца, железа и имеют химические формулы типа  $\text{Ca}_3\text{Fe}_2(\text{SiO}_4)_3$  (андрадит, т. е. ферросиликат кальция),  $\text{Mn}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$  (спессартин, т. е. алюмосиликат марганца) и т. д. Гранаты обладают твердостью 6,5...7,5 по шкале Мооса (минералогическая шкала) при удельном весе 3,4...3,6 г/см<sup>3</sup>, имеют различную окраску в зависимости от состава. Основное применение гранатов – изготовление абразивных шкурок (наждачной бумаги), используемых для обработки дерева, пластмассы, кожи, резины и других мягких материалов.

**Кварц** представляет собой одну из кристаллических разновидностей кремнезёма (диоксида кремния  $\text{SiO}_2$ ). Он обладает твердостью 7 по шкале Мооса, имеет удельный вес 2,65 г/см<sup>3</sup>, обычно бесцветен. Бывают и другие его разновидности по цвету: прозрачный (горный хрусталь), дымчатый до черного (морион), желтый (цитрин), фиолетовый (аметист) и др.

Кварц в качестве материала для абразивного инструмента в настоящее время используется редко вследствие малой твердости, низкой прочности и хрупкости.

Применяется кварц в виде песка при шлифовании и полировании стекла, а также для изготовления шлифовальных шкурок.

**Кремень** представляет собой минеральное образование из различных форм кремнезема: в аморфном кремнеземе ( $\text{SiO}_2$ ) размещены микроскопические зерна кварца, глинистых и других веществ. Он имеет цвет от светло-серого до черного, иногда с буроватым оттенком. Твердость его равна твердости кварца (по шкале Мооса 7), однако его зерна имеют более острые кромки, что определяет его преимущества перед кварцем.

Кремень с содержанием кремнезёма не менее 95 % используется для изготовления шлифовальных шкур.

К **искусственным абразивным материалам** относятся следующие материалы: синтетический алмаз, кубический нитрид бора, электрокорунд, карбид кремния, карбид бора, окись алюминия (глинозем) и другие абразивные материалы частного назначения (здесь не рассмотренные). Основные характеристики синтетического алмаза и кубического нитрида бора были описаны ранее.

Рассмотрим основные искусственные абразивные материалы.

**Электрокорунд (Э)** представляет собой кристаллическую окись алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (глинозём), являющуюся очищенным продуктом плавки в электрических печах глиноземных руд (бокситов). Различают несколько видов электрокорунда: нормальный, белый, хромистый, титанистый и монокорунд.

**Электрокорунд нормальный (Э)** содержит 91...96 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и имеет цвет от розового до темно-коричневого. С увеличением содержания  $\text{Al}_2\text{O}_3$  его рабочие свойства улучшаются. В СССР электрокорунд выпускался нескольких марок с содержанием  $\text{Al}_2\text{O}_3$  соответственно 95, 94, 93 и 92 %. Применяются эти марки для изготовления как шлифзерен, так и шлифпорошков и микропорошков.

**Электрокорунд белый (ЭБ)** содержит 97...99 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Благодаря высокой твердости, прочности и острым кромкам зерна белого электрокорунда легко внедряются в твердые прочные металлы. Наличие острых кромок у зёрен этого электрокорунда способствует также увеличению количества режущих зерен в общем количестве зерен круга, участвующих в контакте с заготовкой при шлифовании, что уменьшает температуру резания, уменьшает нагрев заготовки при обработке, повышает тем самым её точность.

Белый электрокорунд используется для изготовления абразивных инструментов и для обработки несвязанным абразивом. Выпускается он в виде шлифзерен, шлифпорошков и микропорошков.

**Электрокорунд хромистый (ЭХ)** содержит до 97 %  $Al_2O_3$  и 2 %  $CrO$ . Окись хрома в составе электрокорунда, введенная при плавке в шихту в виде хромистой руды, придает ему розовую окраску и постоянство физико-механических свойств.

Хромистый электрокорунд применяется для изготовления всевозможных абразивных инструментов на всех связках, используется при обработке различных сталей на операциях круглого шлифования с интенсивными режимами.

**Электрокорунд титанистый (ЭТ)** содержит 97 %  $Al_2O_3$  и 2 %  $TiO_2$ . Присадка окиси титана увеличивает вязкость электрокорунда, а, следовательно, и его прочность, что позволяет ему вести обработку на тяжелых режимах. В то же время большее постоянство физико-механических свойств титанистого электрокорунда позволяет с успехом использовать его в абразивных инструментах для прецизионной (сверхточной) обработки.

**Монокорунд (М)** представляет собой разновидность электрокорунда, главной особенностью которой является получение в процессе производства электрокорунда готовых образований в виде зёрен без последующего дробления из технической породы (массы), как это имеет место при изготовлении других видов электрокорунда. Зёрна монокорунда, имея в своём составе 97...98 %  $Al_2O_3$ , обладают высокой механической прочностью и самозатачиваемостью (возможностью скалывания по кристаллографическим плоскостям), что обеспечивает в процессе обработки абразивному инструменту из монокорунда повышенные режущие свойства, меньшую силу и мощность резания, меньшее тепловыделение и нагрев заготовки, большую точность обработки.

**Карбид кремния (карборунд)** представляет собой твёрдый кристаллический материал, состоящий из карбида кремния  $SiC$  и незначительного количества (2...5 %) примесей. Он производится путём плавления в электропечах кварцевого песка ( $SiO_2$ ) с углеродом в виде кокса при температуре 1800...1900 °С. Карбид кремния обладает высокой твёрдостью (до НВ 3100), превышающей твёрдость электрокорунда, и высокой механической прочностью, что определило его широкое применение в металлообработке при шлифовании различных материалов, в том числе твердых сплавов, чугуна, стекла, камня, и при заточке режущего инструмента.

В зависимости от процентного содержания чистого карбида кремния различают два основных вида этого материала: карбид кремния черный и карбид кремния зелёный.

**Карбид кремния чёрный (КЧ)** содержит 95...98 % SiC, имеет цвет от тёмно-синего до чёрного, маркируется двумя буквами КЧ с добавлением цифры, обозначающей последнюю цифру процентного содержания SiC, т. е. цифры: 5 при 95 % SiC, 6 при 96 % SiC, 7 при 97 % SiC и 8 при 98 % SiC. Карбид кремния чёрный имеет следующие марки: КЧ5, КЧ6, КЧ7 (в виде шлифпорошков) и КЧ7, КЧ8 (в виде шлифзёрен). Он хрупок по сравнению с зелёным карбидом кремния, обладает меньшей абразивной способностью и используется для обработки материалов с низким пределом прочности (чугуна, бронзы), вязких металлов и сплавов (цветных металлов), а также неметаллов (кожи, стекла, мрамора и т. д.).

**Карбид кремния зелёный (КЗ)** содержит 96...99 % SiC, имеет цвет от светло-зелёного до тёмно-зелёного, маркируется двумя буквами КЗ с добавлением цифры, обозначающей последнюю цифру процентного содержания SiC, т. е. цифры: 7 при 97 % SiC, 8 при 98 % SiC и 9 при 99 % SiC. Карбид кремния зелёный имеет следующие марки: КЗ6 (в виде микропорошков и шлифпорошков), КЗ7 (в виде шлифпорошков), КЗ8 и КЗ9 (в виде шлифзёрен). Этот материал имеет по сравнению с чёрным карбидом кремния более высокую твёрдость и более острые кромки зёрен. Поэтому карбид кремния зелёный применяется главным образом при заточке твердосплавного режущего инструмента.

**Карбид бора** представляет собой вещество в виде химического соединения бора с углеродом ( $B_4C$ ), получаемое плавлением борной кислоты с нефтяным коксом. Карбид бора по твёрдости превосходит все другие абразивные материалы кроме алмаза, однако обладает большой хрупкостью. Он имеет серовато-чёрный цвет и представляет собой плотную массу с раковистым изломом. Применяется в виде шлифпорошков и микропорошков для доводки твердосплавного инструмента, т. к. обеспечивает минимальный радиус округления режущей кромки (6...10 мкм), для резки драгоценных пород, притирочных и других работ, для отделки минералов (рубина, корунда, кварца).

**Окись алюминия (глинозём)** представляет собой мелкозернистый абразивный материал в виде микропорошка, предназначенный для изготовления притирочных и доводочных паст. Из прокалённого глинозёма изготавливают доводочные бруски для обработки деталей с предельно малой шероховатостью обработанной поверхности.

Перечисленные абразивные материалы могут участвовать в процессе резания в свободном или связанном видах.

Абразивные материалы в свободном (несвязанном) виде производят обработку с помощью направленного на обрабатываемую поверхность потока жидкости, газа (воздуха) или магнитных силовых линий, внутренняя физическая энергетика которых (кинематика, магнетизм и др.) приводит зёрна во взвешенное состояние и сообщает им такой импульс количества движения, который достаточен для выполнения работы микрорезания (шлифования). При обработке свободным абразивом режущие свойства абразивных зёрен используются наиболее эффективно, т. к. каждое зерно имеет возможность поворачиваться в процессе резания относительно обрабатываемой поверхности и производить обработку почти всеми своими режущими кромками. Кроме того, применение свободного (несвязанного) абразива позволяет зёрнам проникать в любые труднодоступные места заготовки и производить обработку сложных поверхностей. Однако свободные зёрна не исправляют форму обрабатываемой поверхности и не обладают достаточной производительностью.

Абразивные материалы, зёрна которых связаны друг с другом специальным материалом, называемым связкой, формируются и спекаются в виде тел, максимально удобных для того или иного вида абразивной обработки. Тела, в структуре которых содержатся абразивные зёрна, называются абразивными инструментами (к ним относятся шлифовальные круги, шлифовальные бруски, хонголовки, зубчатые хоны и др.). Зёрна в абразивных инструментах расположены беспорядочно (хаотично), а связка заполняет не всё пространство между зёрнами, вследствие чего в абразивном инструменте имеются поры. Они оказывают положительное влияние на режущую способность абразивного инструмента: обнажают острые кромки зёрен, являются ёмкостями для размещения отходов абразивной обработки (шлама) и смазочно-охлаждающей жидкости. В отдельных случаях в массу, из которой получают абразивные инструменты, замешивают зёрна более дешёвого абразивного материала, который называется наполнителем.

### **Глава 3. КИНЕМАТИКА РЕЗАНИЯ**

Рассматривая общую схему резания, приведённую на рис. 1.1, можно заметить, что при произвольных очертаниях инструмента и заготовки характер процесса резания, интенсивность его протекания, форма и содержание получаемой поверхности, внутренняя физическая картина зоны резания зависят в основном от относительного

движения инструмента и заготовки. Это движение определяет также многообразие видов обработки и технологических операций резания, конфигурацию, размеры и геометрические параметры инструмента, характер и степень его износа и т. д. Следовательно, относительное движение инструмента и заготовки является важнейшей характеристикой процесса резания.

**Кинематикой резания** называется раздел науки о резании, занимающийся рассмотрением теоретических вопросов, связанных с движением в процессе резания и его элементами, кинематическими схемами резания, влиянием элементов движения на процесс резания.

### 3.1. Движения резания

От формы заданной на детали поверхности (обработанной поверхности) зависит результирующее движение инструмента относительно заготовки. Это движение в конечном итоге определяет не только форму и размеры обработанной поверхности, но и её точность, шероховатость, ряд характеристик качества поверхностного слоя и т. д.

**Результирующим движением резания  $D_e$**  называется суммарное движение режущего инструмента относительно заготовки в процессе резания. Результирующее движение резания может быть простым и сложным. Сложное движение резания осуществить на металлорежущих станках за счёт перемещения только одного рабочего узла весьма затруднительно. Поэтому станки проектируются таким образом, чтобы требуемое результирующее движение резания в станке расчленилось на несколько простых (элементарных) движений, каждое из которых воспроизводилось бы отдельным механизмом станка. Такими элементарными движениями являются прямолинейное и вращательное.

Любое сложное результирующее движение резания, необходимое для изготовления заданной обработанной поверхности, может быть таким образом представлено пространственным сочетанием нескольких прямолинейных и вращательных движений. Эти элементарные движения не равноценны между собой. По характеру и значению они делятся на три вида (рис. 3.1):

1. Главное движение резания  $D_G$ .
2. Движение подачи  $D_S$ .
3. Касательное движение  $D_K$ .



**Главным движением резания**  $D_r$  называется элементарное движение с наибольшей скоростью (рис. 3.1). Без него процесс резания, как правило, невозможен. Главным может быть как прямолинейное, так и вращательное движение, причём оно может совершаться как инструментом, так и заготовкой. В совокупности элементарных движений, составляющих движение резания, главным может быть только одно движение.

За весь период обработки данной поверхности совершается, как правило, множество оборотов или двойных (возвратно-поступательных) ходов в главном движении. Один оборот или двойной (возвратно-поступательный) ход инструмента или заготовки в главном движении будем называть **циклом главного движения**. Следовательно, процесс резания с точки зрения главного движения является, как правило, многоцикловым процессом, т. е. периодически повторяющимся процессом. Исключения составляют лишь такие виды обработки как однопроходное строгание, протягивание и некоторые другие, крайне редко встречающиеся.

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

Весь период обработки данной поверхности может осуществляться как за счет только одного оборота или хода (двойного хода) в движении подачи (продольное точение, отрезание, торцовое фрезерование и т. д.), так и за счет нескольких или множества оборотов или ходов (круглое и плоское шлифование, зубофрезерование, зубодолбление). Один оборот или ход (двойной ход) инструмента или заготовки в движении подачи будем называть **циклом движения подачи**. Таким образом, процесс резания с точки зрения движения подачи является преимущественно одноцикловым процессом, в отдельных же более сложных случаях – многоцикловым. Последнее имеет место, как правило, в процессах резания, осуществляющихся за счет трех элементарных движений.

**Касательным движением**  $D_K$  называется движение режущей кромки инструмента вдоль самой себя (рис. 3.1). Это движение имеет место при обточке буртов широким осциллирующим резцом, при точении круглым вращающимся резцом и в некоторых других случаях резания. Касательное движение дает значительный эффект – оно выводит рабочий участок режущей кромки из зоны резания и тем самым существенно снижает температуру резания, сокращает время воздействия на лезвие силовой нагрузки, резко повышает стойкость инструмента, а следовательно, и производительность обработки.

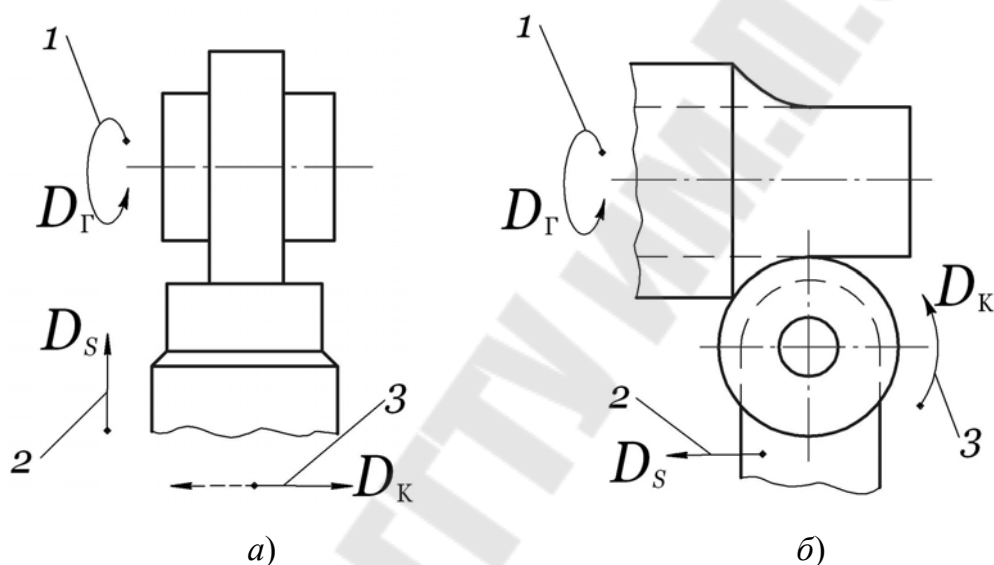


Рис. 3.1. Виды элементарных движений резания при врезном обтачивании осциллирующим резцом (а) и ротационном обтачивании (б):

1 – главное движение резания  $D_G$ ; 2 – движение подачи  $D_S$ ;

3 – касательное движение  $D_K$

Следует заметить, что существует еще одно движение, которое называется установочным. **Установочное движение** – это перемещение инструмента для установки на новый проход или на новую поверхность детали. Это движение не следует путать с движением подачи. Первое осуществляется в момент прерывания процесса резания, второе же – в процессе резания.

### 3.2. Количественные характеристики движений

Каждое из рассмотренных движений резания имеет свои количественные характеристики, определяющие его скорость и значение для процесса резания.

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

Под **скоростью главного движения резания**  $v$  понимается скорость рассматриваемой точки режущей кромки или заготовки в главном движении резания. Она измеряется теми же единицами, что и скорость результирующего движения резания, т. е. в м/мин – при лезвийной обработке, в м/с – при абразивной обработке. Скорость главного движения нередко бывает на несколько порядков больше скоростей других движений, составляющих результирующее движение резания.

Главное движение резания принято характеризовать также **частотой циклов**  $n$  этого движения, т. е. числом двойных ходов или числом оборотов в минуту. Эти характеристики удобны для установки требуемого скоростного режима на станке. При этом скорость главного движения  $v$  может быть легко определена через частоту циклов  $n$  по следующим соотношениям:

– для возвратно-поступательного движения

$$v = \frac{2Ln}{1000} \text{ м/мин}; \quad (3.1)$$

– для вращательного движения

$$v = \frac{\pi Dn}{1000} \text{ м/мин (при лезвийной обработке)} \quad (3.2)$$

и

$$v = \frac{\pi Dn}{1000 \cdot 60} \text{ м/с (при абразивной обработке)}, \quad (3.3)$$

где  $L$  – длина хода в главном движении, мм;  $D$  – диаметр рассматриваемой точки режущей кромки инструмента или заготовки, совершающих главное движение, мм; 1000, 60 – численные переводные множители.

Движение подачи характеризуется **скоростью движения подачи**  $v_s$  мм/мин, т. е. скоростью рассматриваемой точки режущей кромки или заготовки в движении подачи, и **подачей**  $S$ , т. е. перемещением рассматриваемой точки режущей кромки или заготовки в движении подачи за один цикл главного движения (или другого движения подачи) или за определенную долю одного из этих циклов. За долю цикла принимают обычно часть оборота, соответствующую угловому шагу лезвий режущего инструмента. В связи с этим различают **подачу на оборот**  $S_o$  мм/об, т. е. перемещение за один оборот, **подачу на ход**  $S_x$  мм/ход, т. е. перемещение за один ход, **подачу на двойной ход**  $S_{2x}$  мм/дв. ход, т. е. перемещение за один двойной ход и **подачу на зуб**  $S_z$  мм/зуб, т. е. перемещение за время поворота инструмента на один угловой шаг лезвий.

За скоростью движения подачи  $v_s$ , измеряемой в мм/мин, на практике закрепился неправильный термин «минутная подача»  $S_m$ . Главная его ошибочность состоит в том, что подача не является скоростью движения подачи – она выражает лишь относительную величину движения, т. е. перемещение за какую-то долю цикла. Следовательно, скорость движения подачи  $v_s$  называть минутной подачей  $S_m$  нельзя.

Между количественными характеристиками движения подачи  $v_s$ ,  $S_o$  и  $S_z$  существует очевидная связь:

$$v_s = S_o \cdot n = S_z \cdot z \cdot n, \quad (3.4)$$

где  $z$  – число зубьев инструмента.

Скорость касательного движения выражается (чаще всего) в долях скорости главного движения, т. е. соотношением  $v_k/v$ . Направления всех рассмотренных скоростей движений резания в различных разновидностях обработки резанием изображены на рис. 3.2.

### 3.3. Рабочая плоскость

Направления и значения скоростей всех рассмотренных движений резания кроме касательного определяют понятия рабочей плоскости и ряда связанных с ней кинематических характеристик процесса резания: угла подачи  $\mu$ , угла скорости резания  $\eta$  и кинематического коэффициента  $\xi$ .

**Рабочей плоскостью**  $P_s$  называется плоскость, в которой расположены направления скоростей главного движения резания и движения подачи. В этой же плоскости располагается направление скорости результирующего движения резания. Следовательно, рабочая плоскость является плоскостью всех движений резания, кроме касательного движения.

**Угол подачи**  $\mu$  есть угол в рабочей плоскости между направлениями скоростей движения подачи и главного движения резания.

**Углом скорости резания**  $\eta$  называется угол в рабочей плоскости между направлениями скоростей результирующего движения резания и главного движения резания.

**Кинематическим коэффициентом**  $\xi$  будем называть отношение скорости движения подачи к скорости главного движения резания, т. е.

$$\xi = \frac{v_s}{v}. \quad (3.5)$$

Рабочая плоскость  $P_s$ , угол подачи  $\mu$  и угол скорости резания  $\eta$  изображены на рис. 3.2.

Из приведенных на рис. 3.2 разновидностей обработки оба варианта фрезерования (*в* и *г*) отличаются менее благоприятным взаимным расположением направлений скоростей  $v$  и  $v_s$ : угол подачи  $\mu$  не равен  $90^\circ$  и постоянно изменяется от нуля до своего максимального значения.

На базе примера периферийного фрезерования (рис. 3.2, *в*) выведем единые расчётные кинематические соотношения, позволяющие определять скорость результирующего движения резания  $v_e$  и угол скорости резания  $\eta$  по заданным значениям скоростей  $v$  и  $v_s$  в любых разновидностях обработки резанием. Для этого из конца каждого вектора скоростей  $v_e$  и  $v$  опустим перпендикуляры на направление другого из этих же векторов в точках соответственно  $A$  (на направление вектора  $v$  – из конца вектора  $v_e$ ) и  $B$  (на направление вектора  $v_e$  – из конца вектора  $v$ ).

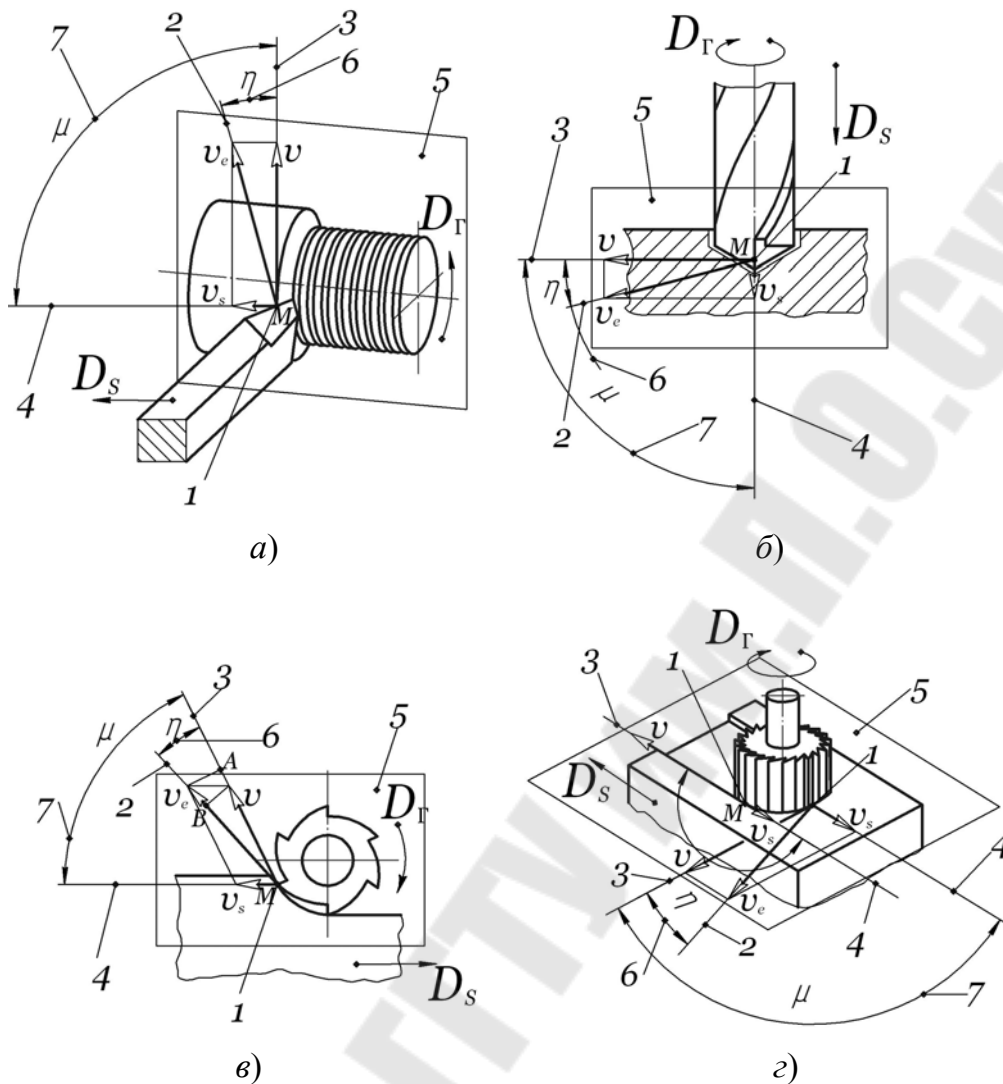


Рис. 3.2. Характеристики движений резания при обтачивании (а), сверлении (б), периферийном фрезеровании (в) и фрезеровании пазовой фрезой (г):  
 1 – рассматриваемая точка режущей кромки М; 2 – направление скорости результирующего движения резания  $v_e$ ; 3 – направление скорости главного движения резания  $v$ ; 4 – направление скорости движения подачи  $v_s$ ; 5 – рабочая плоскость  $P_s$ ; 6 – угол скорости резания  $\eta$ ; 7 – угол подачи  $\mu$

Принимая в дальнейшем обозначения векторов  $v_e$  и  $v$  за обозначения их конечных точек, выразим вектор скорости результирующего движения резания  $v_e$  из прямоугольного треугольника  $MAv_e$  через его катеты  $MA$  и  $Av_e$  (рис. 3.2, в):

$$\begin{aligned}
 v_e &= \sqrt{(MA)^2 + (Av_e)^2} = \sqrt{(Mv + vv_e \cos \mu)^2 + (vv_e \sin \mu)^2} = \\
 &= \sqrt{(v + v_s \cos \mu)^2 + (v_s \sin \mu)^2} = v \sqrt{(1 + v_s/v \cdot \cos \mu)^2 + (v_s/v \cdot \sin \mu)^2}
 \end{aligned}$$

После преобразований и введения кинематического коэффициента (3.5) будем иметь:

$$v_e = v \sqrt{1 + 2\xi \cos \mu + \xi^2}. \quad (3.6)$$

Угол скорости резания  $\eta$  можно определить из прямоугольного треугольника  $M B v$ :

$$\sin \eta = \frac{Bv}{Mv} = \frac{v v_e \sin(\mu - \eta)}{Mv} = \frac{v_s}{v} \sin(\mu - \eta).$$

Раскрыв синус разности в правой части и поделив равенство на  $\cos \eta$  с учетом (3.5) получим

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

и окончательно

$$\operatorname{tg} \eta = \frac{\xi \sin \mu}{1 + \xi \cos \mu}. \quad (3.7)$$

Полученные формулы (3.6) и (3.7) являются общими формулами для расчета скорости результирующего движения резания  $v_e$  и угла скорости резания  $\eta$  по известному значению скорости главного движения  $v$  с учетом кинематического коэффициента  $\xi$ , выражающего значимость скорости движения подачи  $v_s$  по сравнению со скоростью главного движения  $v$ . Эта формула устанавливает связь между скоростями в рабочей плоскости, она применима для кинематического анализа любых случаев обработки резанием.

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

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

т. е. близок к 0, что при расчете по формулам (3.6) и (3.7) приведет к следующим результатам:

$$v_e \cong v, \quad \eta \cong 0.$$

Это означает, что для условий обычного резания за скорость результирующего движения резания  $v_e$  (за скорость резания) вполне можно принимать скорость главного движения  $v$ . Следовательно, подача в данном случае почти никак не влияет на характер самого процесса резания.

### 3.4. Технологическая система координат

Для обеспечения единства понимания и графического изображения процесса резания независимо от конкретных отличительных особенностей его разновидностей вводится в рассмотрение специальная система координат  $XYZ$ . Эту систему, связанную с главным движением резания и наилучшим образом ориентирующую процесс резания в пространстве относительно технологической системы обработки, будем называть **технологической системой координат**.

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

Расположение осей технологической системы координат в некоторых разновидностях обработки резанием с вращательным главным движением приведено на рис. 3.3, где кроме основных их проекций с видом на передние поверхности инструментов для полноты представления даны также сечения плоскостями, перпендикулярными оси главного вращательного движения. В этих сечениях можно увидеть расположение и направление координатной оси  $OZ$ .



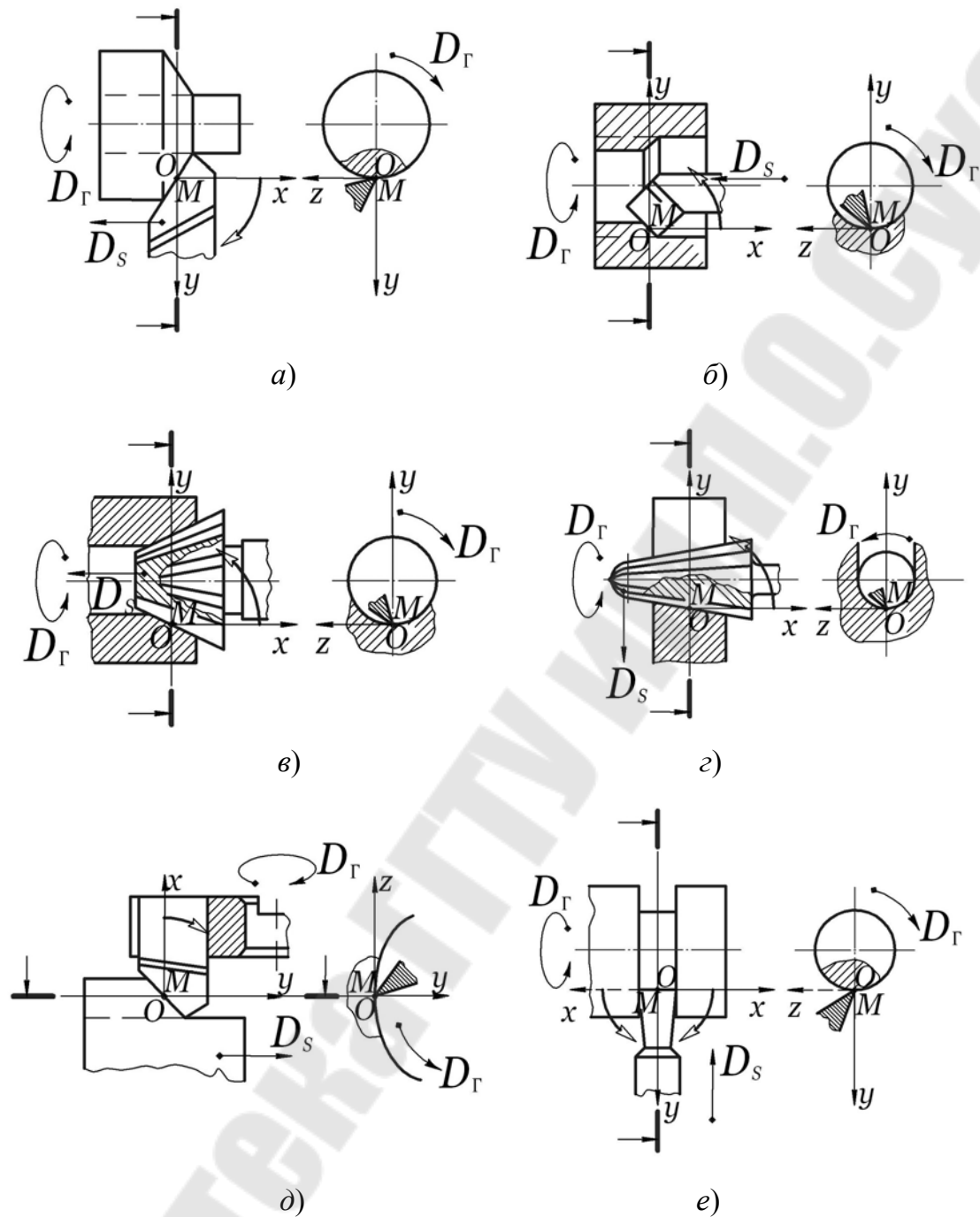


Рис. 3.3. Расположение осей технологической системы координат  $XYZ$  в разновидностях обработки с вращательным главным движением резания: при обтачивании (а), растачивании (б), зенковании (в), фрезеровании паза (г), торцовом фрезеровании (д) и отрезании на токарном станке (е)

В тех случаях, когда координатные оси  $Ox$  и  $Oy$  не пересекают лезвие, т. е. когда они проходят по касательной к проекции режущей кромки на плоскость  $XOY$ , за положительное направление этих осей следует принимать их направление от заготовки в сторону инструмента

(таких примеров на рис. 3.3 нет). При затруднениях в данном вопросе положительное направление координатных осей  $OX$  и  $OY$  выбирается произвольно (рис. 3.3, *e*). В этом случае наряду с произвольно выбранным положительным направлением штриховой линией изображается также (рис. 3.3, *e*) второе возможное положительное направление (противоположное первому). Это будет свидетельствовать о равновероятности положительного направления координатной оси.

При прямолинейном главном движении резания (строгание, долбление, протягивание) ось  $OY$  технологической системы координат проводится (рис. 3.4) в сторону лезвия инструмента перпендикулярно той базовой поверхности инструмента, которая передает силовое воздействие от заготовки на инструментальное приспособление (на рис. 3.4 – плоскость  $Q$ ), ось же  $OX$  – перпендикулярно осям  $OZ$  и  $OY$  с положительным её направлением также в сторону лезвия.

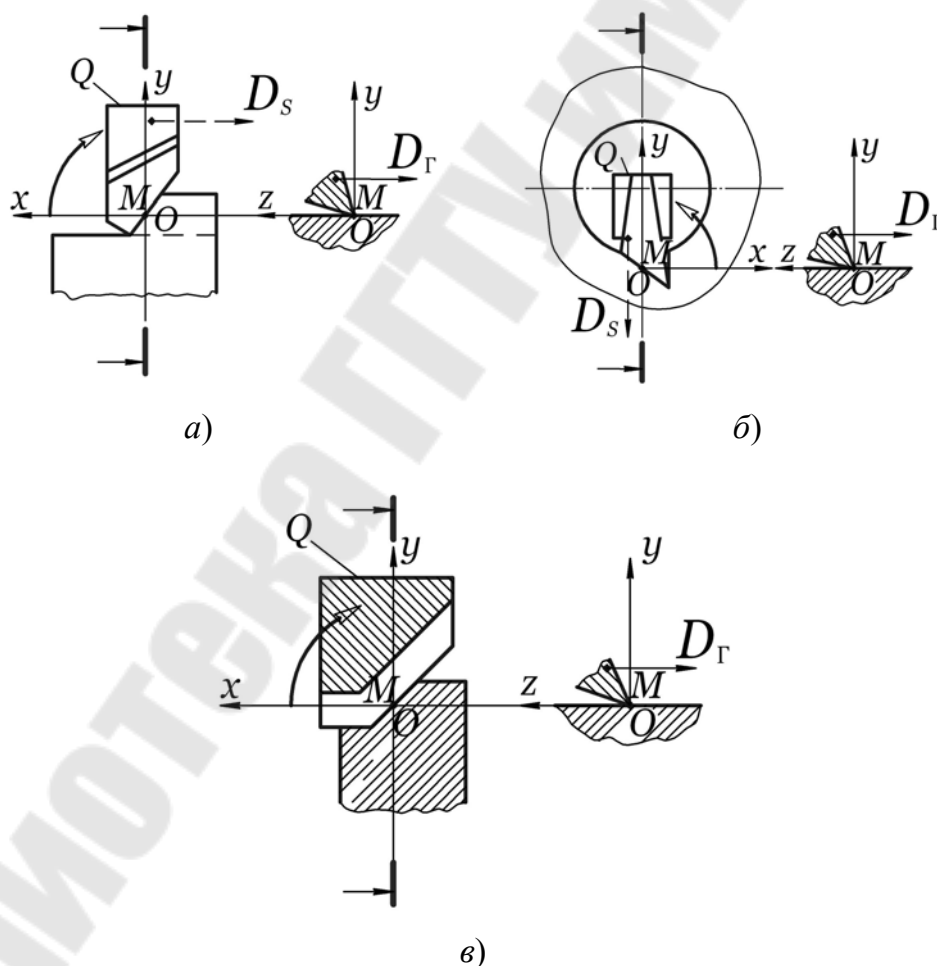


Рис. 3.4. Расположение осей технологической системы координат  $XYZ$  в разновидностях обработки с прямолинейным главным движением резания: при строгании (*a*), долблении (*б*) и протягивании (*в*)

Такой принцип проведения координатных осей  $OX$  и  $OY$  является существенным средством обобщения различных видов резания: с прямолинейным главным движением и вращательным главным движением. Это позволяет обработку с прямолинейным главным движением представить как частный случай обработки с вращательным главным движением при бесконечном радиусе траектории рассматриваемой точки режущей кромки в этом движении.

На рис. 3.5 приведена схема обработки круглой заготовки (на токарном станке) лезвием инструмента  $I$  при последовательном переходе от обработки наружной цилиндрической поверхности (заготовка  $Z_H$  с радиусом  $r_H$ ) через обработку прямолинейной поверхности (заготовка  $Z_P$  с бесконечным радиусом) к обработке внутренней поверхности (заготовка  $Z_B$  с радиусом  $r_B$ ). Веерообразные дуги окружностей, изображенные на рис. 3.5, выражают множество промежуточных заготовок в таком последовательном переходе. Это множество различных заготовок на рис. 3.5 отражает лишь количественное отличие приведенных вариантов с изменяющимся радиусом траектории рассматриваемой точки режущей кромки лезвия, никаких же принципиальных качественных различий здесь нет.

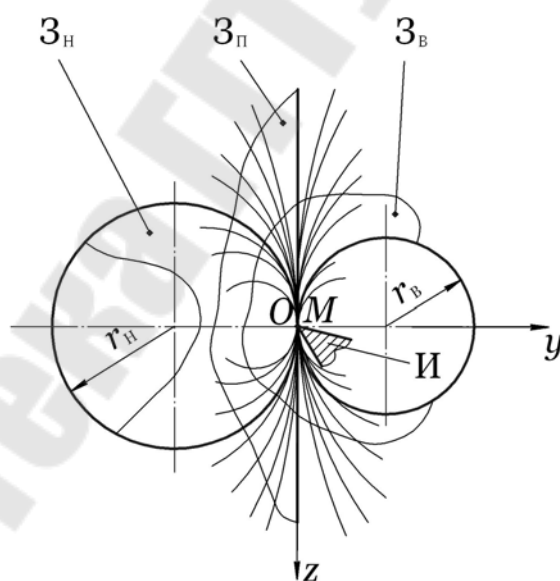


Рис. 3.5. Схема обработки круглой заготовки (на токарной станке) с последовательным переходом от наружной поверхности заготовки ( $Z_H$ ) к внутренней ( $Z_B$ )

На рис. 3.3 и 3.4 выявляется ещё один признак классификации общих видов обработки резанием. Если внимательно присмотреться

к технологическим системам координат на эскизах рис. 3.3 и 3.4, то можно заметить, что они отличаются взаимным расположением координатных осей  $OX$  и  $OY$ . Так на рис. 3.3, *а, д* и 3.4, *а, в* поворот от оси  $OX$  к оси  $OY$ , если смотреть с конца оси  $OZ$ , осуществляется против часовой стрелки, а на рис. 3.3, *б–г* и 3.4, *б* – по часовой (на эскизах этот поворот изображён двойными стрелками). В первом случае система координат, как это установлено в математике, называется правой, во втором – левой. В связи с этим и резание, в котором технологическая система координат, проведённая по принятым выше правилам, является правой, будем называть **правым резанием**, а резание, в котором эта система левая, – **левым резанием**.

Введённая технологическая система координат используется для оценки геометрии процесса резания, для анализа способов формообразования обработанной поверхности, для учёта и исследования сил резания, для исследования вибраций и т. д.

### 3.5. Кинематические схемы резания

Для упрощённого представления на чертеже кинематической основы той или иной разновидности обработки резанием без изображения подробностей, связанных с конфигурациями режущего инструмента и заготовки, введено понятие кинематической схемы резания.

Под **кинематической схемой резания** понимается условное графическое изображение элементарных движений в процессе резания с указанием их взаимного расположения, направления и места приложения.

Кинематические схемы резания в различных видах обработки резанием были подробно изучены доктором технических наук профессором Грановским Г. И. Им было установлено, что для трехсот без малого встречающихся на практике разновидностей обработки резанием можно изобразить лишь три-четыре десятка кинематических схем. Это означает, что кинематическая схема является существенным средством обобщения процесса резания: один вариант кинематической схемы может быть использован для целой группы разновидностей обработки.

Кинематическая схема изображается в координатных осях технологической системы координат. При изображении кинематической

схемы резания необходимо принять во внимание следующие дополнительные условия:

- технологическая система координат изображается на кинематической схеме в косоугольной диметрии с тем, чтобы вращательное главное движение резания представлялось в плоскости  $ZOY$  в виде окружности без всяких искажений (начало координат  $O$  располагается в точке  $M$  режущей кромки);

- построение кинематической схемы начинается с выбора на поле будущего изображения схемы положения рассматриваемой точки  $M$  режущей кромки (начала координат  $O$ );

- координатная ось  $OZ$  проводится строго вертикально сверху вниз;

- координатная ось  $OY$  проводится строго горизонтально слева направо;

- координатная ось  $OX$  проводится под углом  $45^\circ$  к оси  $OY$  с положительным направлением вверх – направо для правой системы координат (правое резание) и под углом  $45^\circ$  к оси  $OY$  с положительным направлением вниз – налево для левой системы координат (левое резание);

- лезвие инструмента изображается в виде заштрихованного плоского клина с волнистой линией произвольного обрыва, расположенного между положительными направлениями координатных осей  $OY$  и  $OZ$  (по ранее установленному принципу их проведения);

- элементарные движения резания представляются на кинематических схемах траекториями рассматриваемой точки режущей кромки и соответствующей ей точки поверхности резания заготовки в этих движениях;

- оси вращательных движений изображаются для большей чёткости и наглядности толстой линией;

- направления элементарных движений указываются на траекториях толстыми стрелками, исходящими из рассматриваемой точки режущей кромки в ту сторону, куда эти движения направлены;

- взаимное расположение элементарных движений, при отличии от параллельного или перпендикулярного расположений, показывается на кинематической схеме с указанием всех углов разворотов движений в каждой из координатных плоскостей;

- в случаях, когда то или иное элементарное движение резания не лежит в координатной плоскости, а составляет с ней некоторый

угол или не параллельно какой-нибудь координатной оси, на кинематической схеме изображаются реальные развороты этих движений с простановкой значений углов разворотов;

– обозначения всех элементарных движений для отражения места их приложения следует сопровождать верхними индексами в виде начальных букв слов «заготовка» и «инструмент», например:  $D_{Г}^И$ ,  $D_S^И$ ,  $D_S^З$ ,  $D_{Г}^З$ ,  $D_K^И$ .

По числу элементарных движений кинематические схемы резания можно разделить на четыре группы: одноэлементные, двухэлементные, трёхэлементные и четырёхэлементные. Схемы с пятью и более элементарными движениями практического применения, как правило, не имеют.

Рассмотрим кинематические схемы наиболее часто встречающихся разновидностей резания и некоторые общие принципы их классификации.

Одноэлементные и двухэлементные кинематические схемы с возможными их вариациями приведены на рис. 3.6. Одноэлементные схемы встречаются крайне редко и состоят из одного прямолинейного или одного вращательного движения (рис. 3.6, *а* и *б*). Кинематические схемы с одним прямолинейным движением (рис. 3.6, *а*) свойственны процессам однопроходного фасонного строгания без подачи и протягивания (рис. 3.4, *в*). Схема же с одним вращательным движением (рис. 3.6, *б*) имеет место лишь в случае кругового наружного протягивания сегментных пазов на неподвижной круглой заготовке (исключительно редкий случай обработки). Эту обработку можно представить себе по рис. 3.20, *з*, мысленно остановив заготовку.

Двухэлементные кинематические схемы имеют значительно большее распространение. Они представляют собой комбинации из двух элементарных движений. В зависимости от сочетаний этих движений рассматриваемую группу кинематических схем можно разбить на следующие три подгруппы:

1. Сочетание двух прямолинейных движений (рис. 3.6, *в*).
2. Сочетание вращательного и прямолинейного движений (рис. 3.6, *г–е*).
3. Сочетание двух вращательных движений (рис. 3.6, *ж–и*).

Первая подгруппа (рис. 3.6, *в*) встречается довольно редко, главным образом в процессе строгания и долбления по копиру. Расположение прямолинейных движений, как правило, перпендикулярное, а скорости их могут быть и переменными. Эти движения в станке мо-

гут занимать любое пространственное положение и в принципе могут быть приложены как к инструменту, так и к заготовке.

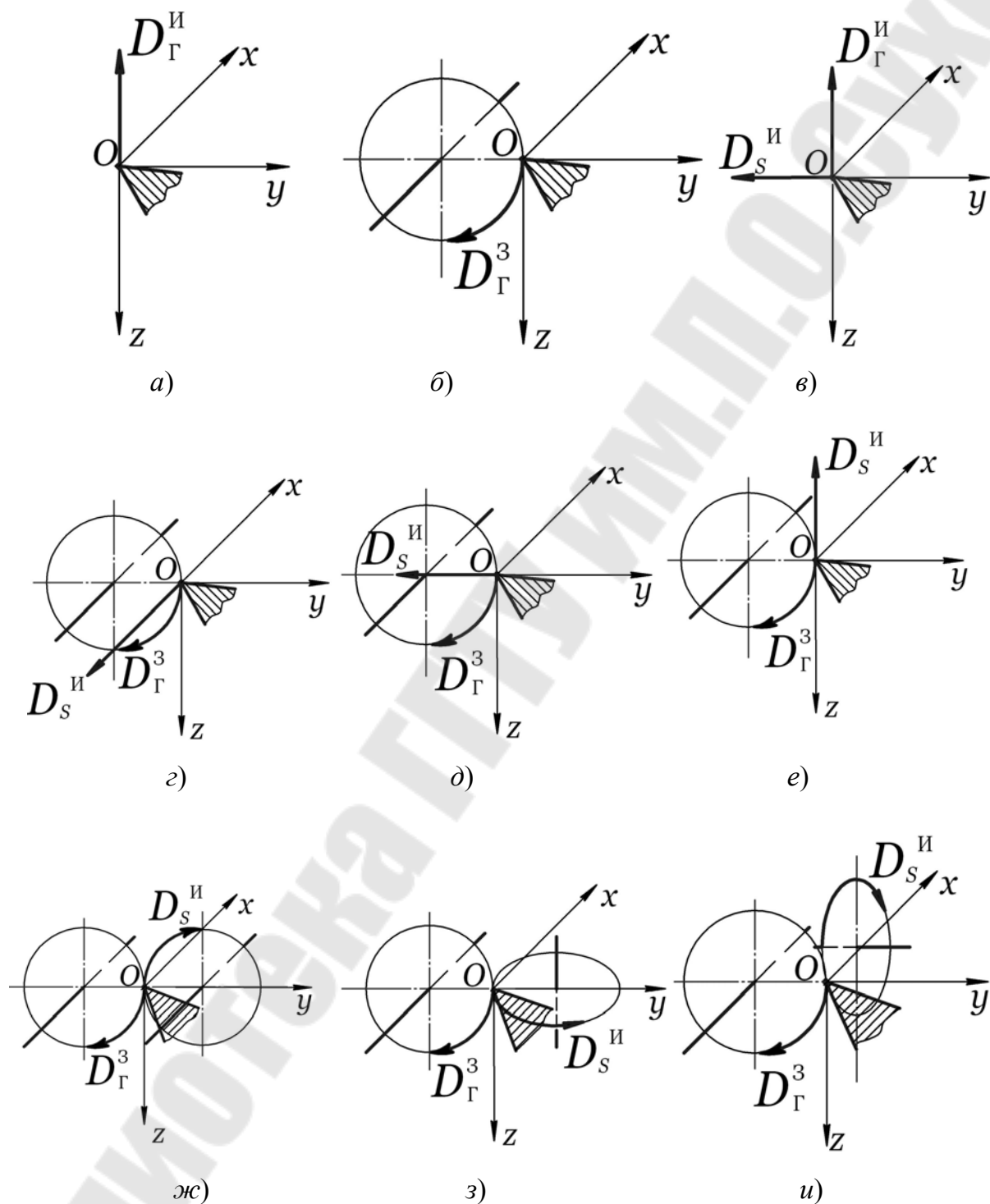


Рис. 3.6. Одно- и двухэлементные кинематические схемы с элементарными движениями: одним прямолинейным (а), одним вращательным (б), двумя прямолинейными (в), вращательным и прямолинейным (г–е), двумя вращательными (ж–и)

Вторая подгруппа (рис. 3.6, *г–е*), т. е. кинематические схемы с вращательным и прямолинейным движениями, встречается в основном в трёх вариантах, отличающихся расположением прямолинейного движения относительно вращательного движения, т. е. с направлением прямолинейного движения параллельно оси  $OX$  (рис. 3.6, *г*), оси  $OY$  (рис. 3.6, *д*) и оси  $OZ$  (рис. 3.6, *е*). Такое сочетание движений имеет наибольшее практическое применение и реализуется главным образом с использованием в качестве главного движения резания вращательного движения, как это показано на схемах (рис. 3.6, *г–е*).

Схема на рис. 3.6, *г* может быть использована для описания следующих разновидностей: продольного точения, сверления, зенкерования, развёртывания и других способов обработки отверстий, нарезания резьбы резцами, метчиками и плашками, хонингования и т. д. Схема, изображенная на рис. 3.6, *д*, описывает отрезные и прорезные работы на токарном станке, подрезание торцов, отрезание заготовок на механических пилах (фрезерно-отрезных станках), торцового фрезерования, плоского шлифования торцом круга и т. д. Последняя схема (рис. 3.6, *е*) отражает тангенциальное точение и т. д.

Третья подгруппа (рис. 3.6, *ж–и*), т. е. кинематические схемы с двумя вращательными движениями, имеют три основные разновидности, отличающиеся расположением движения подачи относительно главного движения резания, т. е. ось вращательного движения подачи параллельна оси  $OX$  (рис. 3.6, *ж*), оси  $OZ$  (рис. 3.6, *з*) и оси  $OY$  (рис. 3.6, *и*). Эти схемы без третьего прямолинейного движения подачи существуют лишь в последний момент обработки, когда после выключения этого третьего движения инструмент ещё некоторое время продолжает «доработку» обработанной поверхности, осуществляя так называемое «выхаживание» поверхности. Первая схема (рис. 3.6, *ж*) свойственна точению многолезвийным вращающимся инструментом, вторая (рис. 3.6, *з*) – ротационному точению чашечным резцом с вертикальной осью, третья (рис. 3.6, *и*) – ротационному точению чашечным резцом с горизонтальной осью и т. д.

Трёхэлементные кинематические схемы представляют собой более сложные композиции элементарных движений. Они отражают почти всё многообразие сложных видов обработки резанием. В зависимости от сочетания элементарных движений трёхэлементные кинематические схемы подразделяются на три подгруппы:

1. Сочетание одного вращательного и двух прямолинейных движений (рис. 3.7, *а–в*).



2. Сочетание двух вращательных и одного прямолинейного движений (рис. 3.7, *г–е*).

3. Сочетание трёх вращательных движений (здесь не иллюстрировано).

Первые две подгруппы (рис. 3.7) по своей сути и применению представляют собой вышерассмотренные двухэлементные схемы (рис. 3.6, *г–и*) с добавлением третьего (прямолинейного) движения, расположенного в координатной плоскости  $XOY$ .

Сочетание одного вращательного и двух прямолинейных движений (рис. 3.7, *а–в*) отличается той особенностью, что добавленное третье движение направлено вдоль координатной оси  $OY$ . Все три схемы на рисунке 3.7, *а–в* относятся главным образом к инструментальному производству: по схеме на рис. 3.7, *а* производится затылование червячных фрез, по схеме на рис. 3.7, *б* – затылование круговых протяжек, по схеме на рис. 3.7, *в* – возможная разновидность тангенциального точения.

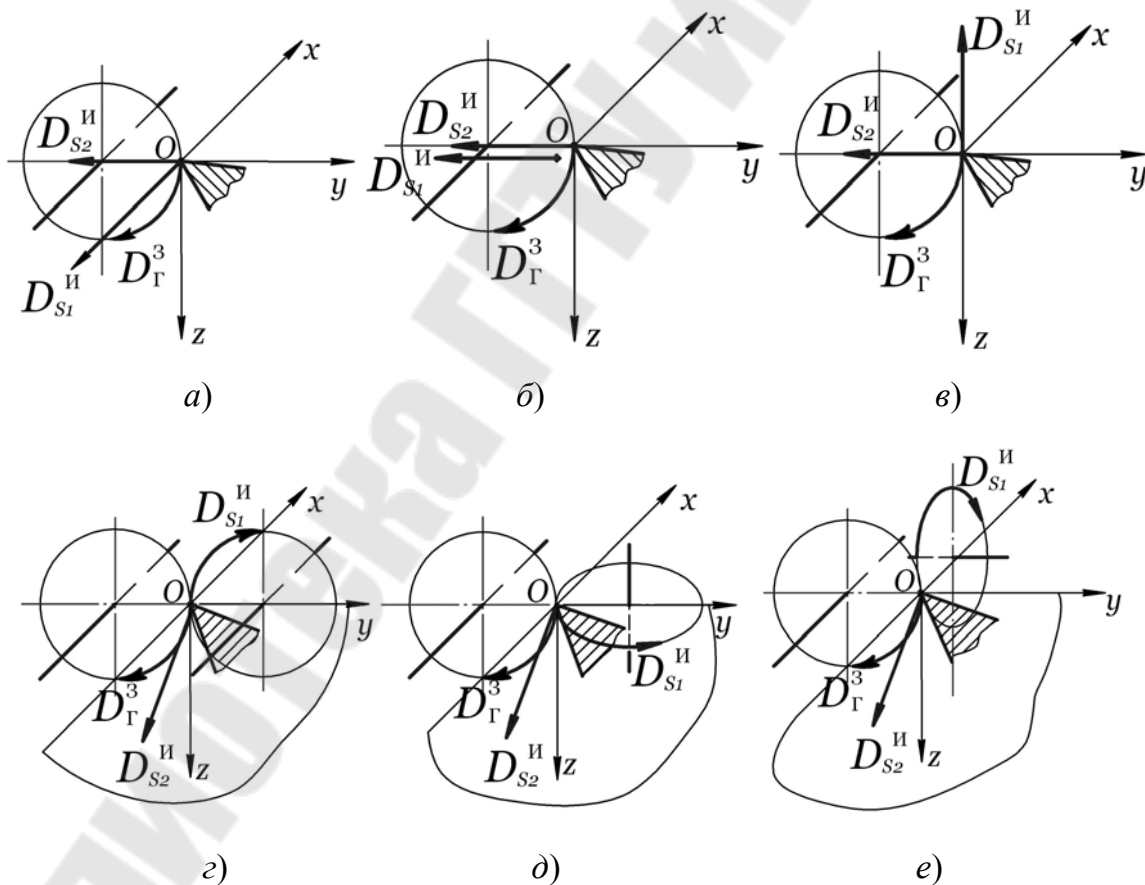


Рис. 3.7. Трёхэлементные кинематические схемы с элементарными движениями: одним вращательным и двумя прямолинейными (*а–в*), двумя вращательными и одним прямолинейным (*г–е*)

Сочетание двух вращательных и одного прямолинейного движений изображено на рис. 3.7, *г–е*, где третье (прямолинейное) движение  $D_{S2}^I$  во всех случаях располагается в координатной плоскости  $XOY$ . В зависимости от конкретного его положения в этой плоскости относительно координатных осей возможна реализация различных разновидностей резания: продольная обработка (движение подачи  $D_{S2}^I$  параллельно оси  $OX$ ), поперечная или врезная обработка (движение подачи  $D_{S2}^I$  параллельно оси  $OY$ ) и косая обработка (движение подачи в плоскости  $XOY$  произвольно, как это изображено на рис. 3.7, *г–е*).

Третья подгруппа, представляющая собой сочетание трёх вращательных движений, в практике встречается чрезвычайно редко: известен случай применения такой кинематической схемы при нарезании конических зубчатых колёс с круговым зубом на специальном зуборезном станке (эта схема здесь не рассматривается).

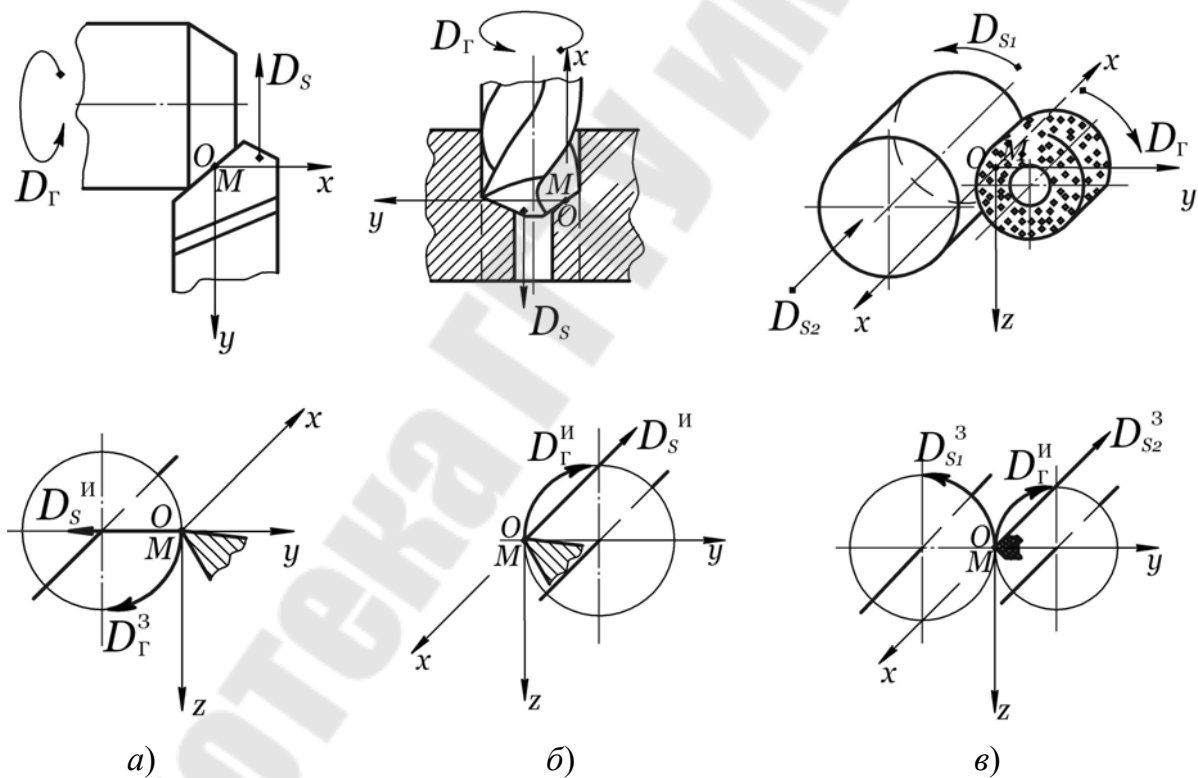


Рис. 3.8. Примеры изображения конкретных кинематических схем для снятия фаски на токарном станке (а), рассверливания на сверлильном станке (б) и круглого наружного продольного шлифования (в)

Четырёхэлементные кинематические схемы резания возникают, как правило, тогда, когда к трёхэлементной кинематической схеме добавляется ещё дополнительное элементарное движение для перио-

дического перемещения на новый проход (установочное движение) или для обеспечения взаимного отскока инструмента и заготовки при обратном ходе главного движения (при строгании, долблении, зубодолблении и т. д.). Поскольку это четвёртое движение осуществляется в перерывах процесса резания и влияния на него не оказывает, эти схемы отдельно здесь не рассматриваются.

Приведенные на рис. 3.6 и 3.7 кинематические схемы исполнены в некотором обобщённом виде. Для изображения вполне конкретного способа обработки эти схемы должны быть несколько уточнены и частично видоизменены. Примеры такой конкретизации приведены на рис. 3.8, где изображены кинематические схемы для следующих способов обработки резанием: снятия фаски на токарном станке (рис. 3.8, а), рассверливания отверстия (рис. 3.8, б) и круглого наружного продольного шлифования (рис. 3.8, в).

Как видно из изложенного материала, кинематические схемы резания имеют большое значение для изучения процесса резания. Они определяют траекторию рассматриваемой точки режущей кромки, способ обработки, форму обработанной поверхности и её шероховатость, ряд других кинематических, динамических и физических показателей процесса резания.

### 3.6. Траектория резания

Рассматриваемая точка режущей кромки, находясь в движении резания, описывает относительно заготовки линию, называемую **траекторией резания**. В самом общем случае траектория резания может быть достаточно сложной линией. Её форма всецело определяется обработанной поверхностью и кинематической схемой данной конкретной разновидности резания, т. е. она зависит от конфигурации обработанной поверхности, вида обработки, количества и взаимного расположения элементарных движений, от того, заготовкой или инструментом совершаются эти движения, и от других обстоятельств. Таким образом, количество возможных траекторий обусловлено многообразием кинематических схем резания и может быть в принципе достаточно большим.

Не ставя перед собой цели описать форму и особенности всех возможных траекторий резания, рассмотрим отдельные представители траекторий резания одно-, двух- и трёхэлементных кинематиче-

ских схем резания. Для установления большей чёткости в понимании траекторий резания и логической связи рассматриваемого материала с предыдущим траектории резания на рис. 3.9 и 3.10 представлены для конкретных разновидностей ранее рассмотренных обобщённых кинематических схем резания, изображённых на рис. 3.6 и 3.7, а именно:

– на рис. 3.9 – для одно- и двухэлементных кинематических схем (по рис. 3.6);

– на рис. 3.10 – для трёхэлементных кинематических схем (по рис. 3.7).

Все приведённые на рис. 3.9 и 3.10 траектории для большей наглядности представлены с некоторым искажением их фактической формы, т. е. изменены соотношения размеров для увеличения расстояний между повторяющимися элементами (витками) траекторий.

Траектории резания одноэлементных кинематических схем (рис. 3.9, *a* и *б*) представляют собой простейшие линии: прямую линию и окружность. Они соответствуют обычному протягиванию с прямолинейным главным движением резания (рис. 3.9, *a*) и так называемому круговому протягиванию (рис. 3.9, *б*). Двухэлементная кинематическая схема с двумя прямолинейными движениями (строгание по копиру) формирует волнистую линию (рис. 3.9, *в*). Двухэлементные кинематические схемы в сочетании вращательного движения с прямолинейным и двух вращательных дают следующие формы траекторий резания:

– при нарезании резьбы резцом, метчиком или плашкой, а также при обточке и всех видах обработки отверстий (по рис. 3.6, *з*) – винтовую линию (рис. 3.9, *з*);

– при отрезании на токарном станке и подрезке торца (по рис. 3.6, *д*) – спираль Архимеда (рис. 3.9, *д*);

– при фрезеровании – циклоиду (рис. 3.9, *е*);

– при круглом наружном шлифовании без прямолинейной подачи – циклоиду на окружности, т. е. эпициклоиду (рис. 3.9, *ж*);

– при ротационном точении без прямолинейной подачи (по рис. 3.6, *з*) – винтовую линию на торе (рис. 3.9, *з*);

– при шлифовании круглой детали торцом круга без прямолинейной подачи – замкнутую по окружности циклоиду, формируемую в плоскости, касательной к цилиндру (рис. 3.9, *и*).

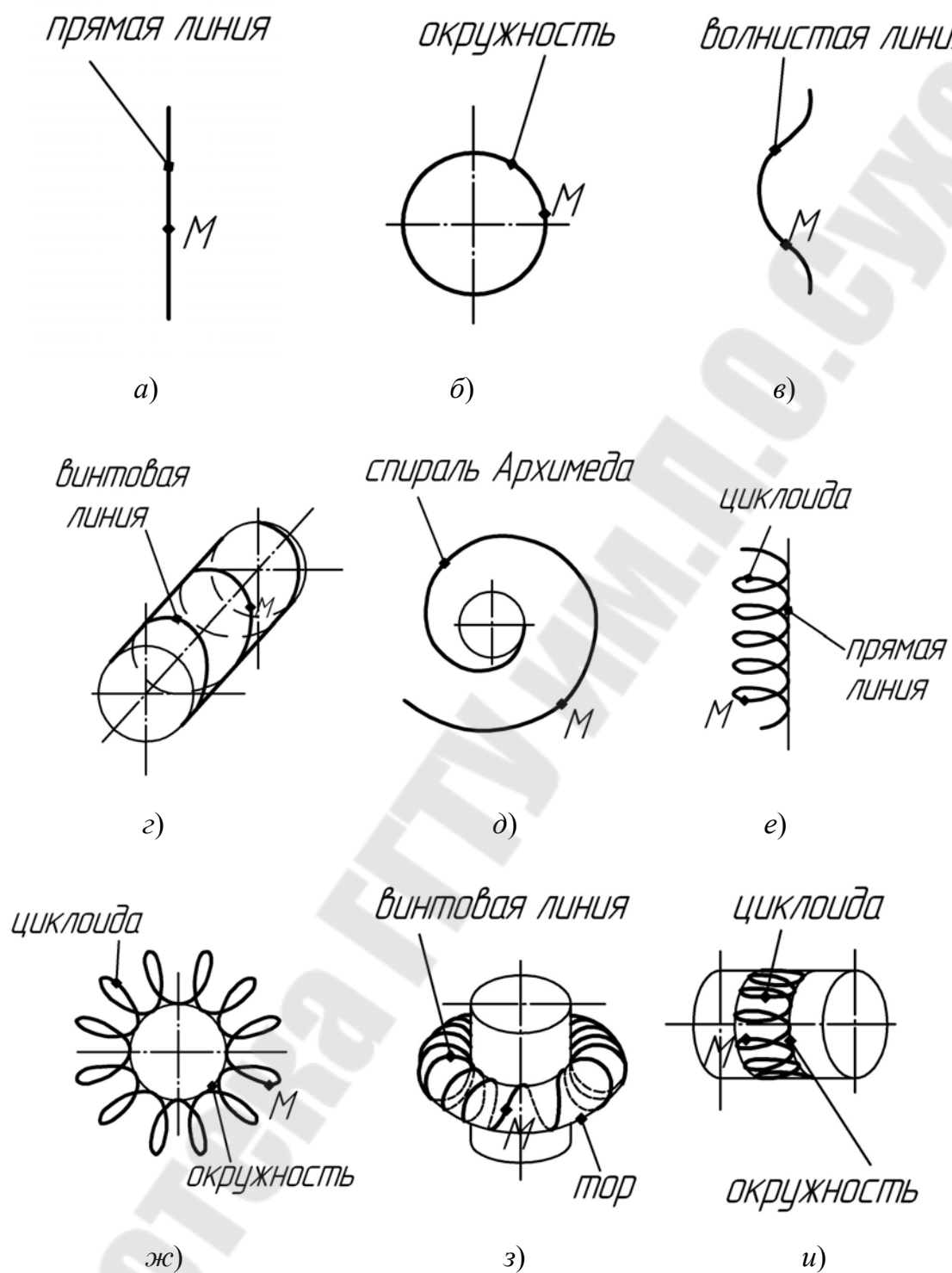


Рис. 3.9. Траектории резания одно- и двухэлементных кинематических схем (по рис. 3.6) при протягивании (а), круговом протягивании (б), строгании по копиру (в), нарезании резьбы (г), отрезании на токарном станке (д), фрезеровании (е), круглом наружном шлифовании без подачи (ж), зубошлифовании (з) и шлифовании круглой детали торцом круга (и) без прямолинейной подачи

Трёхэлементные кинематические схемы (рис. 3.10) образуют более сложные траектории.

Сочетание вращательного и двух прямолинейных движений дают:

- при затыловании червячных фрез (по рис. 3.7, *а*) – зубчатую спираль Архимеда на винтовой линии (рис. 3.10, *а*);
- при затыловании круговых протяжек (по рис. 3.7, *б*) – зубчатую спираль Архимеда на спирали Архимеда (рис. 3.10, *б*);
- при копировальном фрезеровании – циклоиду на волнистой линии (рис. 3.10, *в*).

Сочетание двух вращательных движений с прямолинейным при условии, что прямолинейное движение направлено параллельно координатной оси  $OY$ , формирует следующие траектории резания:

- при фрезеровании винтовой тороидальной канавки – винтовую линию, закрученную по винтовой линии (рис. 3.10, *г*);
- при фрезеровании тел вращения – циклоиду на спирали Архимеда (рис. 3.10, *д*);
- при точении червяка долбяком – винтовую линию с переменным радиусом, расположенную на теле вращения, выполненном по кривой, близкой к окружности (рис. 3.10, *е*);
- при шлифовании круглой детали торцом чашечного круга – циклоиду, сформированную на периферии цилиндра по винтовой линии (рис. 3.10, *ж*);
- при врезном шлифовании цилиндрической детали торцом чашечного круга – циклоиду на полосе, завитой по спирали Архимеда (рис. 3.10, *з*).

Кроме перечисленных траекторий резания, свойственных лишь отдельным частным случаям приведённых на рис. 3.6 и 3.7 кинематических схем, возможны траектории в виде следующих сочетаний кривых линий:

- циклоида на винтовой линии с радиальным расположением витков;
- винтовая линия на круглом стержне, завитом по спирали Архимеда;
- винтовая линия на круглом стержне, завитом по конической винтовой;
- другие сочетания.

При внимательном рассмотрении и анализе всех траекторий резания можно сделать следующие заключения.

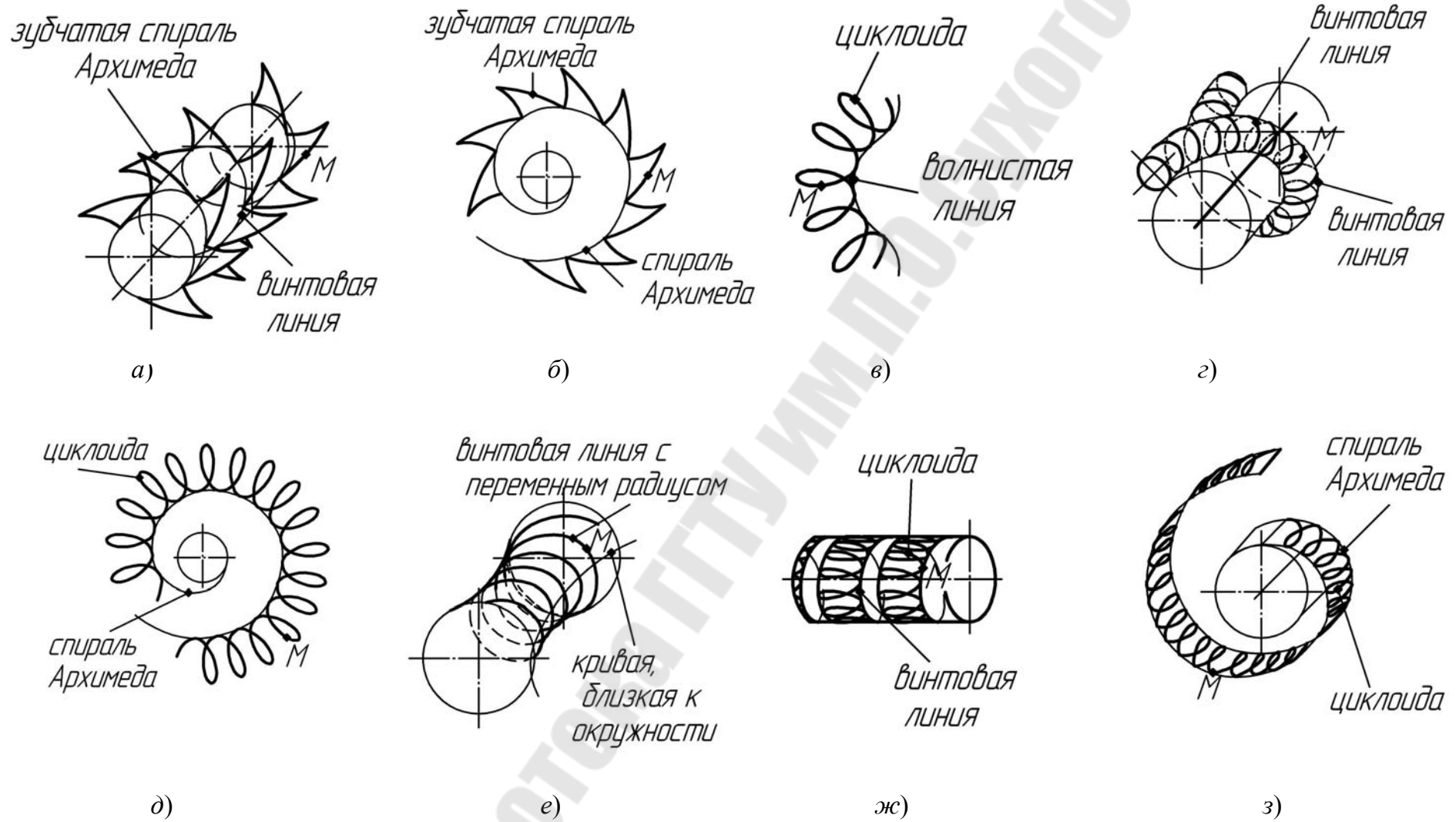


Рис. 3.10. Траектория резания трехэлементных кинематических схем (по рис. 3.7) при затыловании червячных фрез (а) и круговых протяжек (б), копировальном фрезеровании (в), фрезеровании винтовой тороидальной канавки (г), фрезеровании тел вращения (д), нарезании червяка долбяком (е), шлифовании круглой детали торцом круга (ж), врезное шлифование торцом круга (з)

Во всех кинематических схемах резания независимо от их сложности траектории резания представляют собой простую комбинацию нескольких широко известных из математики линий: прямой линии, окружности, волнистой линии, спирали Архимеда, циклоиды. Это значительно упрощает исследование процесса резания. Траектории резания подразделяются на плоские (рис. 3.9, *a–в*, *д–ж*; рис. 3.10, *б*, *в*, *д*) и пространственные (рис. 3.9, *г*, *з*, *и*; рис. 3.10, *а*, *г*, *е–з*). Степень сложности их общей формы определяется главным образом количеством элементарных движений, составляющих кинематическую схему резания. В связи с тем, что подавляющее большинство разновидностей обработки резанием – многоцикловые процессы, траектории резания большей частью состоят из периодически повторяющихся элементов – витков. Форма основной части траектории, т. е. части, формирующейся в пределах одного её витка, при любом числе элементарных движений в кинематической схеме зависит только от двух движений: главного движения резания ( $D_r$ ) и того движения подачи ( $D_s$ ), которое обладает по сравнению с другими наибольшей скоростью. В связи с этим можно сделать также обобщающие утверждения, которые помогут с первого взгляда на траекторию резания оценить её принадлежность к одной из крупных групп разновидностей резания, а именно:

– если траектория включает вытянутые прямолинейные участки, то она принадлежит протягиванию, различным видам строгания и долбления;

– если траектория имеет форму спирали Архимеда, то она отражает токарную обработку с радиальной подачей (отрезание, подрезание торца, нарезание торцовых спиралей и т. д.);

– если траектория представляет собой винтовую линию, то она относится к разновидностям с вращательным главным движением и осевой подачей (обтачивание, резьбонарезание, зубофрезерование, все виды обработки отверстий и т. д.);

– если траектория является циклоидой, то она выражает фрезерование (почти все его разновидности).

Таким образом, можно отметить, что траектория резания обуславливает форму обработанной поверхности заготовки, её шероховатость, геометрию режущего инструмента, другие понятия процесса резания и в связи с этим имеет важное значение для изучения процесса резания.



Нередко для упрощённого изучения и исследования процесса резания вместо понятия траектории резания используют понятие **траектории главного движения**, т. е. линии, описываемой рассматриваемой точкой режущей кромки в главном движении резания. Такими линиями являются прямая линия и окружность как траектории одноэлементных кинематических схем (рис. 3.9, *a* и *б*). Степень погрешности при такой замене понятий траекторий (а также допустимость этой замены) может быть оценена значениями кинематического коэффициента  $\xi$  (см. параграф 3.3 данной главы).

### 3.7. Поверхность резания и направляющие векторы

На траектории резания  $L$ , по которой со скоростью  $v$  перемещается рассматриваемая точка  $M$  режущей кромки  $K$ , выделим (рис. 3.11) один её виток. Крайние точки  $A$  и  $B$  режущей кромки описывают в результирующем движении резания траектории, являющиеся эквидистантами по отношению к траектории  $L$ . Следовательно, каждая точка режущей кромки в движении резания описывает свою траекторию резания, а вся совокупность траекторий её точек от  $A$  до  $B$  формирует в движении резания некоторую поверхность  $R$  (рис. 3.11, *a*). Эту поверхность можно также представить как геометрическое место мгновенных положений режущей кромки в результирующем движении резания.

Поверхность, описываемая режущей кромкой инструмента в результирующем движении резания, называется **поверхностью резания  $R$** . Поверхность резания является важнейшим понятием теории резания, непосредственной и основной «продукцией» процесса резания. Она обеспечивает контакт и взаимодействие лезвия режущего инструмента с заготовкой, обуславливает и определяет все механические, физические, химические и другие явления процесса резания, вызывает износ инструмента, формирует на заготовке требуемые поверхности с определённым качеством.

Поверхность резания считается заданной, если известны форма режущей кромки (линия  $AB$ ) и траектория движения резания (линия  $L$ ) одной из её точек (точки  $M$ ). В этом весьма наглядно проявляется действие важнейших категорий диалектического материализма: материи и движения. Взаимодействие в данном случае материи (режущей кромки) и движения (траектории резания) создаёт материальный объект некоторого нового качества – поверхность резания. Режущая кромка и траектория резания являются определяющими

линиями поверхности резания в любой её точке. Будем называть эти две линии **характеристическими линиями поверхности резания**.

С поверхностью резания в рассматриваемой точке режущей кромки связана специальная система направляющих векторов, предназначенная для наблюдения за зоной резания в пространстве и обеспечения возможности исследования процесса резания в любой момент обработки. В эту систему входят вектор, касательный к режущей кромке  $\vec{\tau}_K$ , и трёхгранник (сопровождающий трёхгранник поверхности резания) взаимно перпендикулярных векторов: скорости результирующего движения резания  $\vec{v}_e$ , нормали к поверхности резания  $\vec{n}$  и касательной (бинормали) к поверхности резания  $\vec{\tau}$ . Положительным направлением вектора  $\vec{\tau}_K$ , касательного к режущей кромке, будем считать такое его направление, которое обеспечивает поворот рассматриваемой точки режущей кромки относительно любой точки передней поверхности, не лежащей на режущей кромке, по часовой стрелке (рис. 3.11, *a*) для леворежущего инструмента и против часовой стрелки – для праворежущего. **Праворежущим** называется такой инструмент, вектор скорости резания в рассматриваемой точке режущей кромки которого, если смотреть со стороны осевого базового элемента крепежной части, может осуществлять вращение (поворот) инструмента по часовой стрелке, **леворежущим** же – наоборот. **Осевым базовым элементом** является базовая поверхность, плоскость или линия на крепёжной части инструмента, воспринимающая осевое (вдоль оси  $OX$ ) воздействие заготовки на инструмент.

За положительное направление векторов  $\vec{v}_e$  и  $\vec{n}$  следует принимать их направление от лезвия в сторону заготовки, как это показано на рис. 3.11, *a*. Положительное направление вектора  $\vec{\tau}$  должно совпадать с ранее установленным положительным направлением вектора  $\vec{\tau}_K$ .

При отсутствии движений подачи, при их малости по сравнению со скоростью главного движения, а также с целью упрощения рассмотрения процесса резания вместо понятия поверхности резания используется понятие **поверхности главного движения**  $R_\Gamma$ , под которой понимается поверхность, описываемая режущей кромкой инструмента в главном движении резания (рис. 3.11, *б*). С поверхностью главного движения связан сопровождающий трёхгранник несколько иных направляющих векторов: скорости главного движения резания (скорости резания)  $\vec{v}$ , нормали к поверхности главного движения  $\vec{n}_\Gamma$  и касательной (бинормали) к поверхности главного движения  $\vec{\tau}_\Gamma$

(рис. 3.11, б). Степень отклонения этих векторов от векторов, определяющих поверхность резания ( $\vec{v}_e$ ,  $\vec{n}$  и  $\vec{\tau}$ ), может быть оценена кинематическим коэффициентом  $\xi$  и определена с использованием угла скорости резания  $\eta$ .

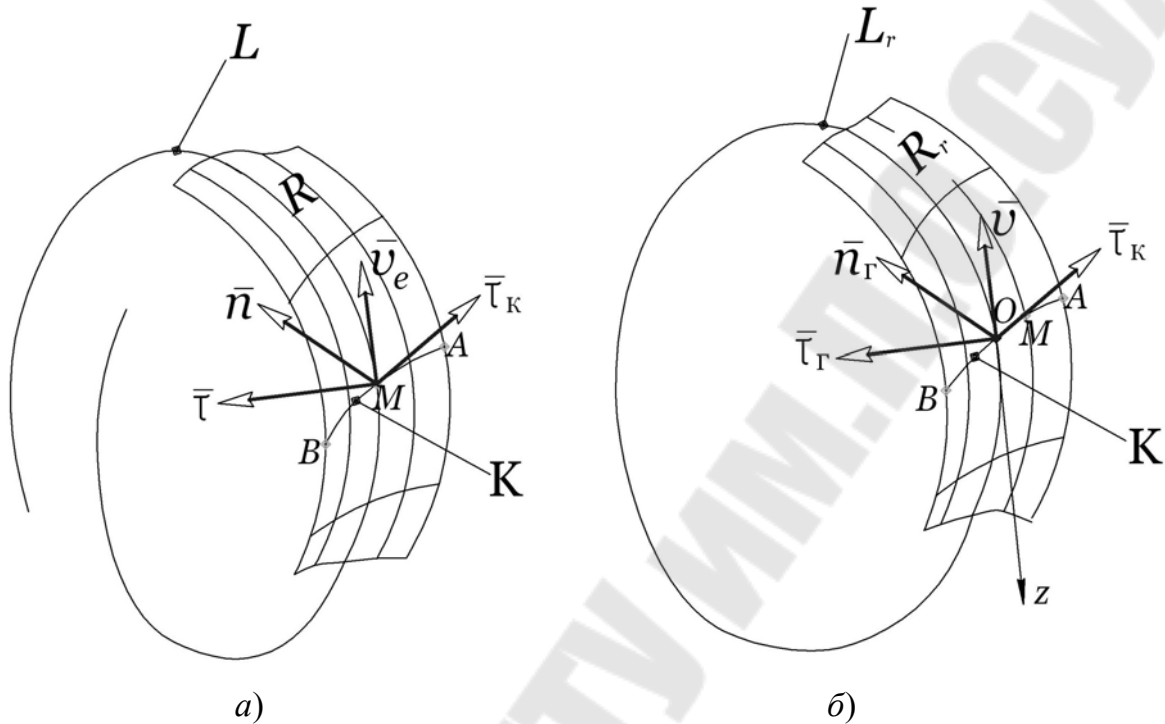


Рис. 3.11. Схема формирования поверхности резания (а) и поверхности главного движения (б), а также расположения связанных с ними направляющих векторов

Как видно из рис. 3.11, б, положительное направление вектора  $\vec{v}$  противоположно положительному направлению координатной оси  $OZ$ .

Поверхность резания  $R$  и поверхность главного движения  $R_\Gamma$  являются безусловно реальными, но вместе с тем не всегда явно видимыми поверхностями. Видимыми они становятся лишь тогда, когда некоторой своей частью пересекут контур заготовки. Таким образом, поверхность резания и поверхность главного движения, которые можно увидеть на заготовке, являются лишь частичным проявлением общего понятия поверхности резания.

Формы поверхности резания и поверхности главного движения, а также их некоторое различие в конкретных разновидностях обработки резанием (обтачивание, сверление и периферийное фрезерование) приведены на рис. 3.12. Поверхность резания при продольном

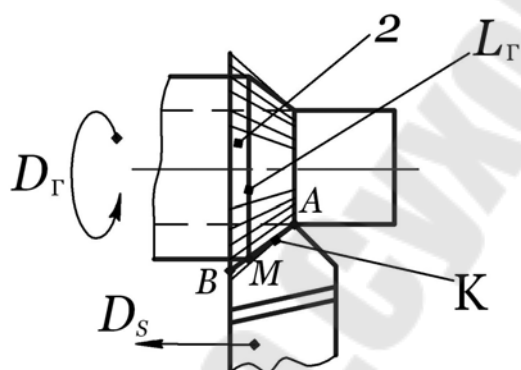
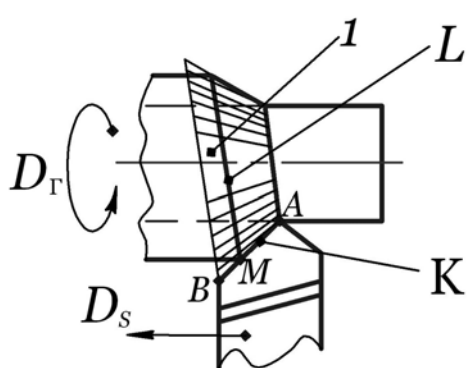
обтачивании (рис. 3.12, *а*) представляет собой винтовую поверхность, ось которой совпадает с осью заготовки. Поверхность резания при сверлении (рис. 3.12, *б*) есть также винтовая поверхность с той лишь разницей, что она тесно связана с осью сверла. При периферийном же фрезеровании (рис. 3.12, *в*) поверхностью резания является поверхность, созданная режущей кромкой при движении рассматриваемой её точки по циклоиде.

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

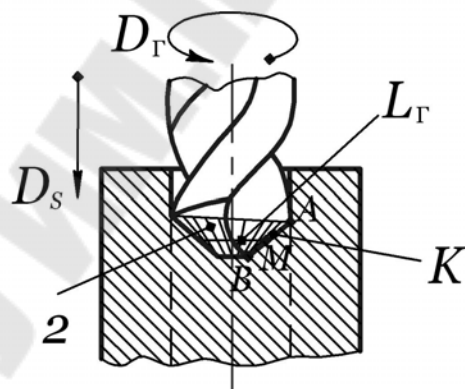
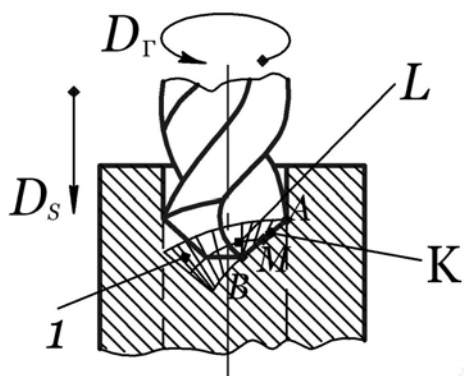
- инструмент располагается на чертеже в двух проекциях;
- главный вид на инструмент совпадает с рабочей плоскостью;
- рассматриваемое лезвие инструмента располагается слева передней поверхностью вверх;
- вектор скорости главного движения резания в рассматриваемой точке режущей кромки проходит вертикально;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

Примеры изображения направляющих векторов с соблюдением всех перечисленных требований представлены на рис. 3.13 для токарного проходного резца и периферийной цилиндрической фрезы со спиральным зубом.

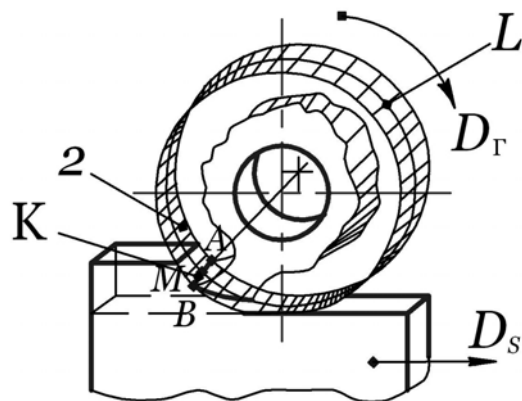
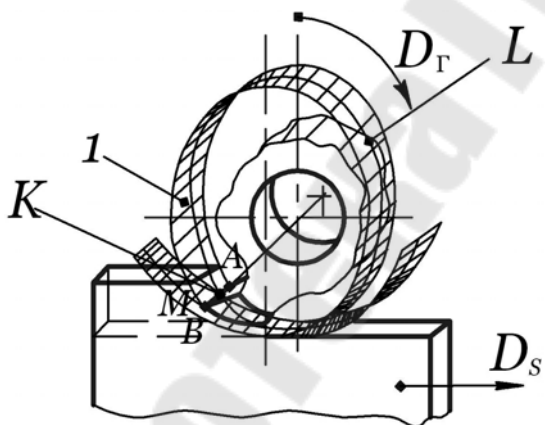
Как видно из приведенных на рис. 3.13 примеров, совокупность направляющих векторов поверхности резания и поверхности главного движения на всех эскизах является своеобразным векторным отображением как самого инструмента (даже при его отсутствии), так и процесса резания им, которого нет на эскизах.



a)



б)



в)

Рис. 3.12. Поверхность резания и поверхность главного движения при продольном обтачивании (а), сверлении (б) и периферийном фрезеровании (в): 1 – поверхность резания  $R$ ; 2 – поверхность главного движения  $R_{\Gamma}$

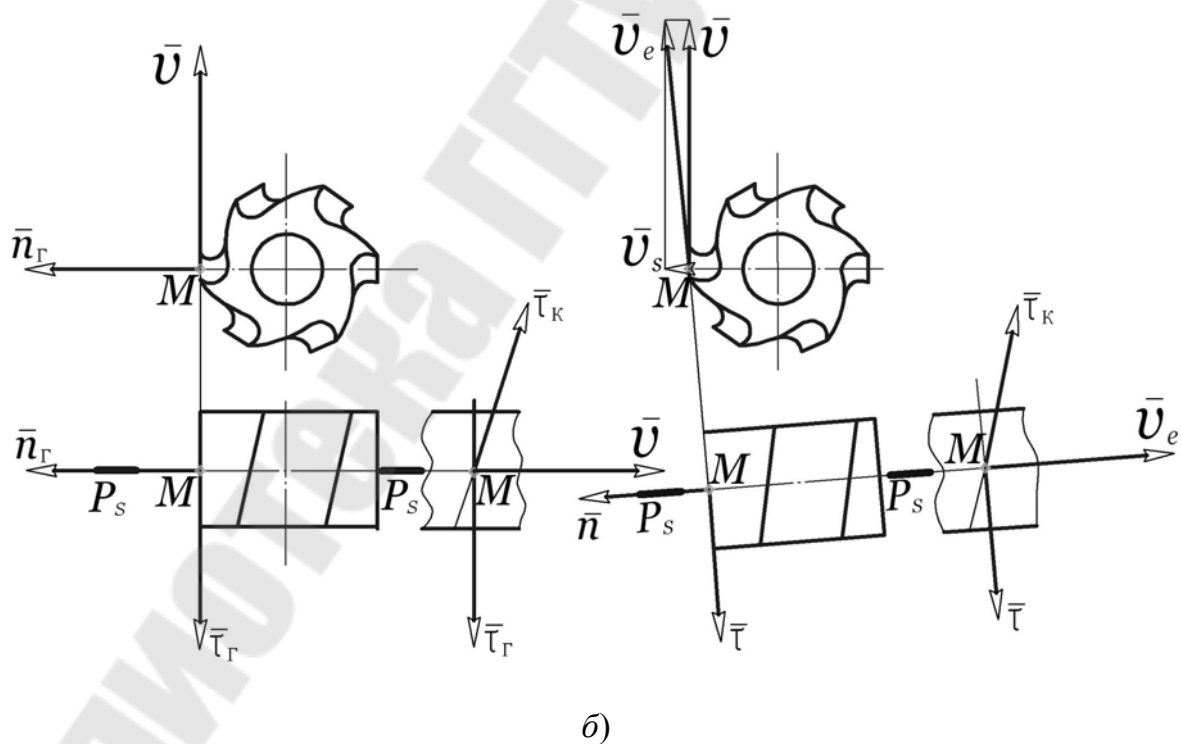
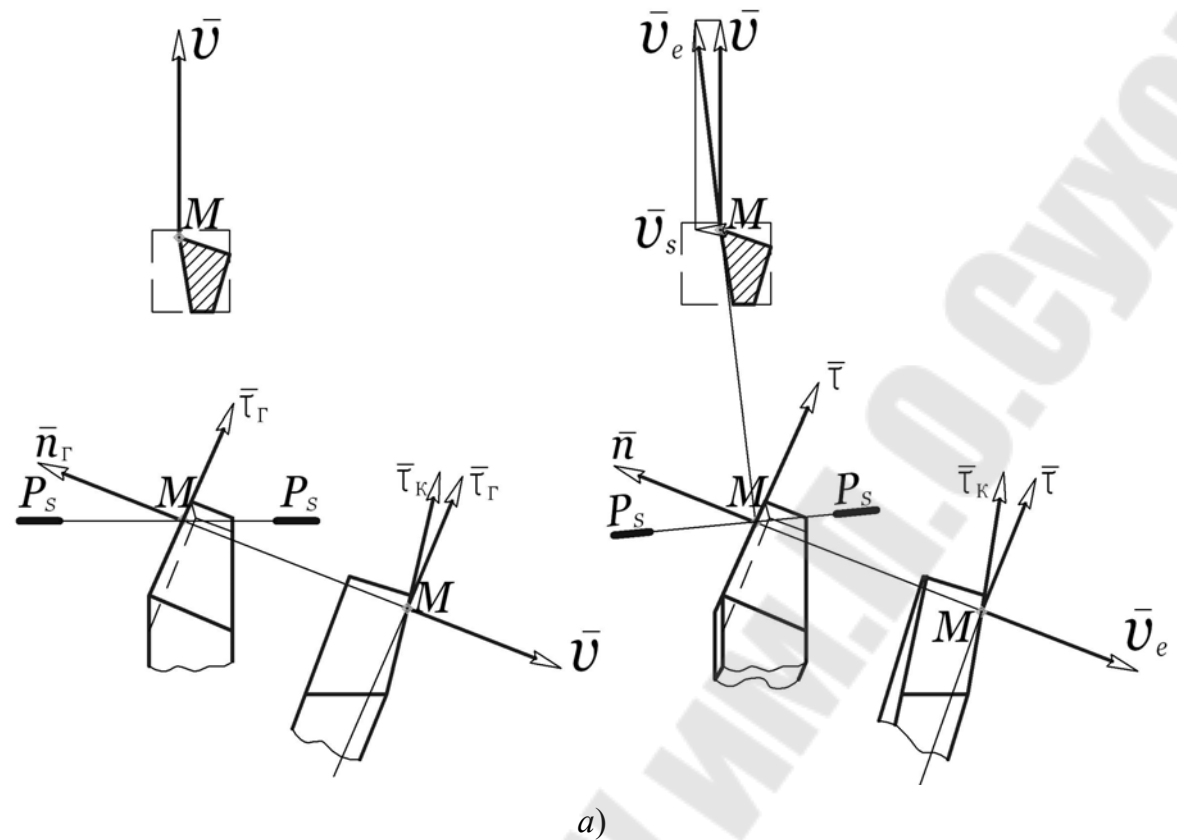


Рис. 3.13. Расположение направляющих векторов относительно поверхности главного движения и поверхности резания для токарного проходного резца (а) и периферийной цилиндрической фрезы (б)

### 3.8. Координатные плоскости и системы

С направляющими векторами поверхности резания (поверхности главного движения) связана система взаимно перпендикулярных плоскостей (рис. 3.14), называемых **координатными плоскостями**. Каждая из этих плоскостей, проходящая через два из трех векторов сопровождающего трехгранника поверхности резания (поверхности главного движения), имеет определенное название, наилучшим образом отражающее её главный смысл, своё буквенное обозначение и особую роль в изучении процесса резания. К координатным плоскостям относятся: основная плоскость  $P_0$ , плоскость резания  $P_n$  и главная секущая плоскость  $P_\tau$ . Индексы в их буквенных обозначениях проставляются по обозначениям тех направляющих векторов, к которым плоскости перпендикулярны (например, обозначение координатной плоскости  $P_0$  свидетельствует о том, что эта плоскость перпендикулярна направлению скорости  $\vec{v}$ ). Это облегчает процесс исследования зоны резания с использованием математических методов.

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

**Основной плоскостью**  $P_0$  называется координатная плоскость, проходящая через рассматриваемую точку режущей кромки перпендикулярно направлению скорости результирующего движения резания. Изображение лезвия инструмента и заготовки в основной плоскости является основным видом на зону резания, своеобразным планом процесса резания (видом сверху), в котором можно изобразить наибольшее количество важнейших характеристик и элементов процесса резания. Эта плоскость пересекает поверхность резания (поверхность главного движения) по кривой  $A_0B_0$ , называемой **основным профилем поверхности резания (поверхности главного движения)**.

**Плоскостью резания**  $P_n$  называется координатная плоскость, касательная к режущей кромке в рассматриваемой точке и содержащая направление скорости результирующего движения резания. Можно представлять плоскость резания также как плоскость, каса-

тельную к поверхности резания в рассматриваемой точке режущей кромки. Эта плоскость даёт вид на лезвие инструмента с задней его стороны (по стороны задней поверхности), т. е. образует как бы вид с тыла. Плоскость резания является пограничной плоскостью между инструментом и заготовкой, плоскостью всякого рода взаимодействия лезвия с поверхностью резания в рассматриваемой точке режущей кромки.

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

На рис. 3.14 с целью лучшего восприятия объёмности лезвия кривыми линиями со штриховкой между ними изображено сечение лезвия главной секущей плоскостью.

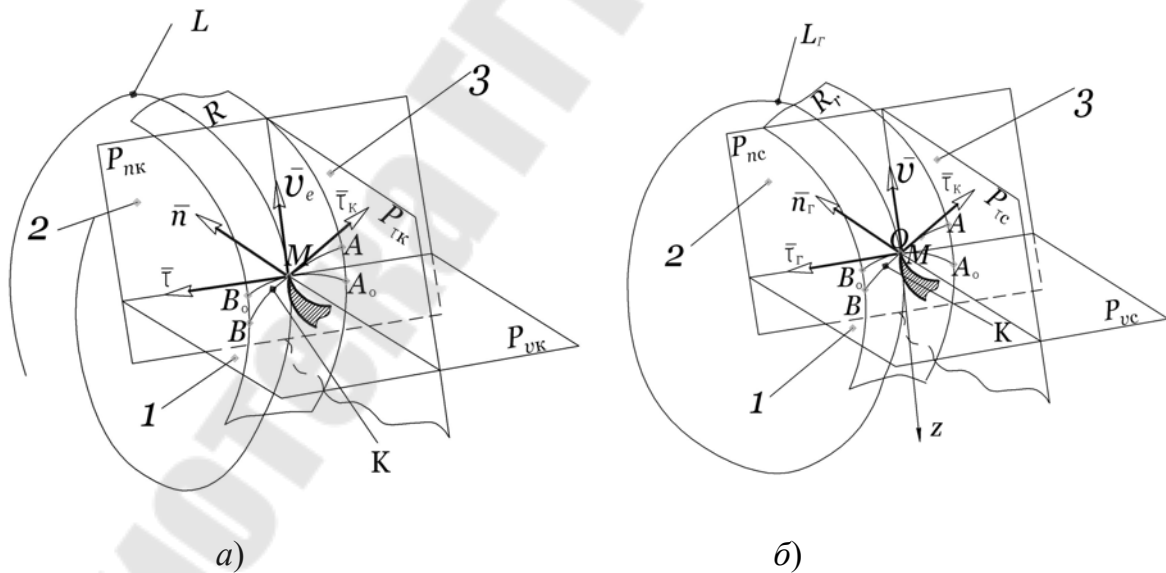


Рис. 3.14. Расположение координатных плоскостей кинематической (а) и статической (б) систем координат:

- 1 – основная плоскость  $P_v$  (т. е.  $P_{vk}$  и  $P_{vc}$ );
- 2 – плоскость резания  $P_n$  (т. е.  $P_{nk}$  и  $P_{nc}$ );
- 3 – главная секущая плоскость  $P_\tau$  (т. е.  $P_{\tau k}$  и  $P_{\tau c}$ )



Рассмотренная на рис. 3.14, *a* система координатных плоскостей носит название кинематической системы. Кроме кинематической системы в теории и практике резания используются статическая и инструментальная координатные системы.

Для отличия координатных плоскостей в различных системах координат к их установленным названиям (терминам) добавляются определяющие слова из названий системы (т. е. одно из слов: инструментальная, статическая, кинематическая), а к буквенным обозначениям плоскостей приписываются индексы в виде начальных букв этих определяющих слов из названий систем, например, инструментальная основная плоскость  $P_{он}$ , статическая плоскость резания  $P_{нс}$ , кинематическая главная секущая плоскость  $P_{тк}$ .

**Кинематической системой координат (КСК)** называется система координатных плоскостей, привязанная к траектории резания и поверхности резания (рис. 3.14, *a*).

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

**Статической (установочной) системой координат (ССК)** называется система координатных плоскостей, привязанная к траектории главного движения резания и поверхности главного движения (рис. 3.14, *б*). Эта система является как бы упрощенным вариантом кинематической, она учитывает только главное движение резания. Зачастую статическую систему координатных плоскостей привязывают к вершине лезвия.

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

Статическая система координат применяется для оценки параметров резания в состоянии взаимной установки инструмента и заготовки на станке с учетом направления скорости главного движения

резания, а также для упрощенного анализа процесса резания без учета движений подачи и касательного движения.

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

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

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

**Инструментальной плоскостью резания  $P_{\text{н.и}}$**  называется плоскость, касательная к режущей кромке в рассматриваемой её точке и перпендикулярная инструментальной основной плоскости. Эта плоскость оказывается параллельной вероятному направлению скорости главного движения резания в предположении, что инструмент относительно заготовки будет установлен на станке так же, как он расположен на чертеже.

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

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

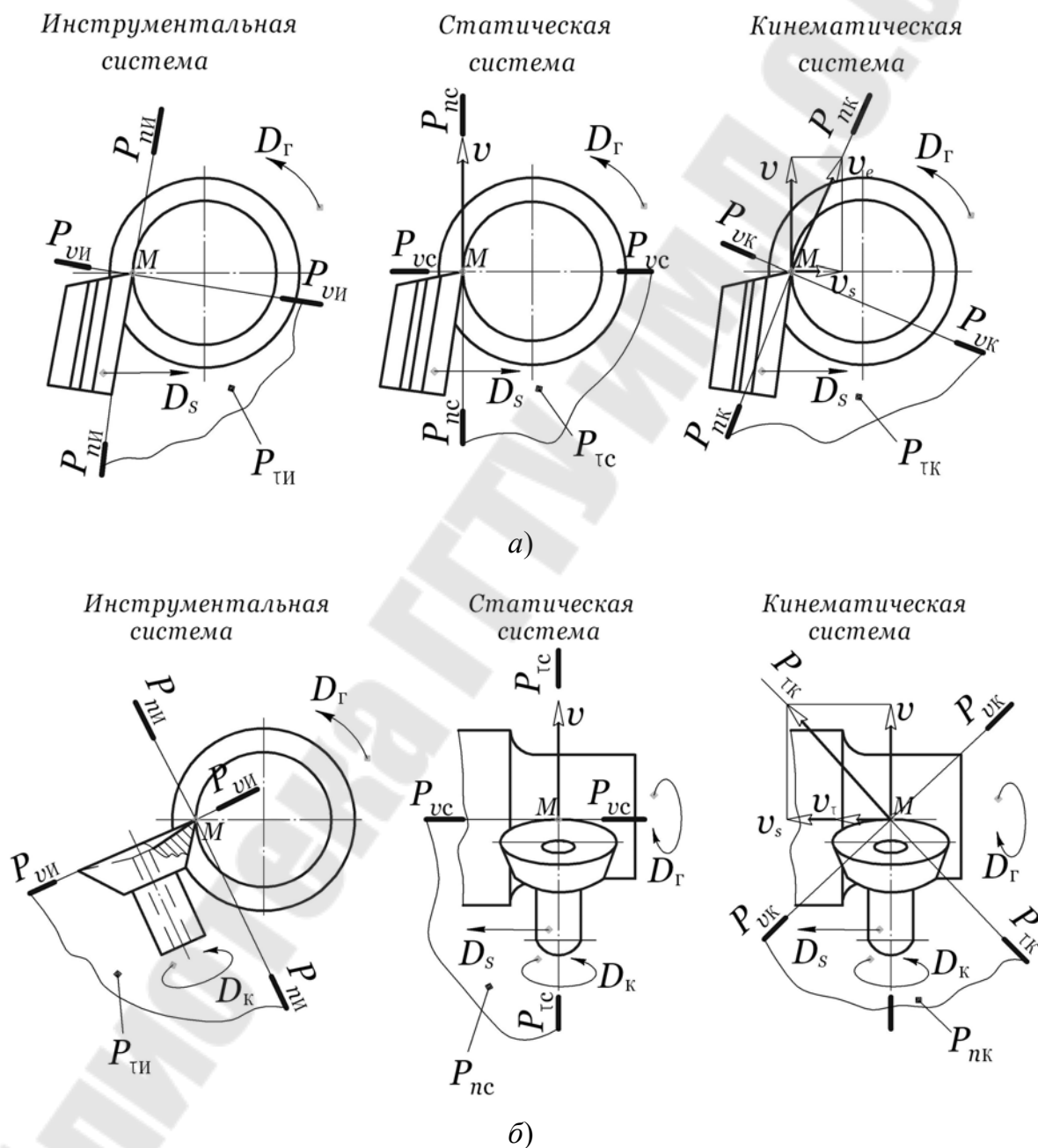


Рис. 3.15. Координатные плоскости инструментальной, статической и кинематической систем координат при врезном точении призматическим фасонным резцом (а) и ротационном обтачивании (б)

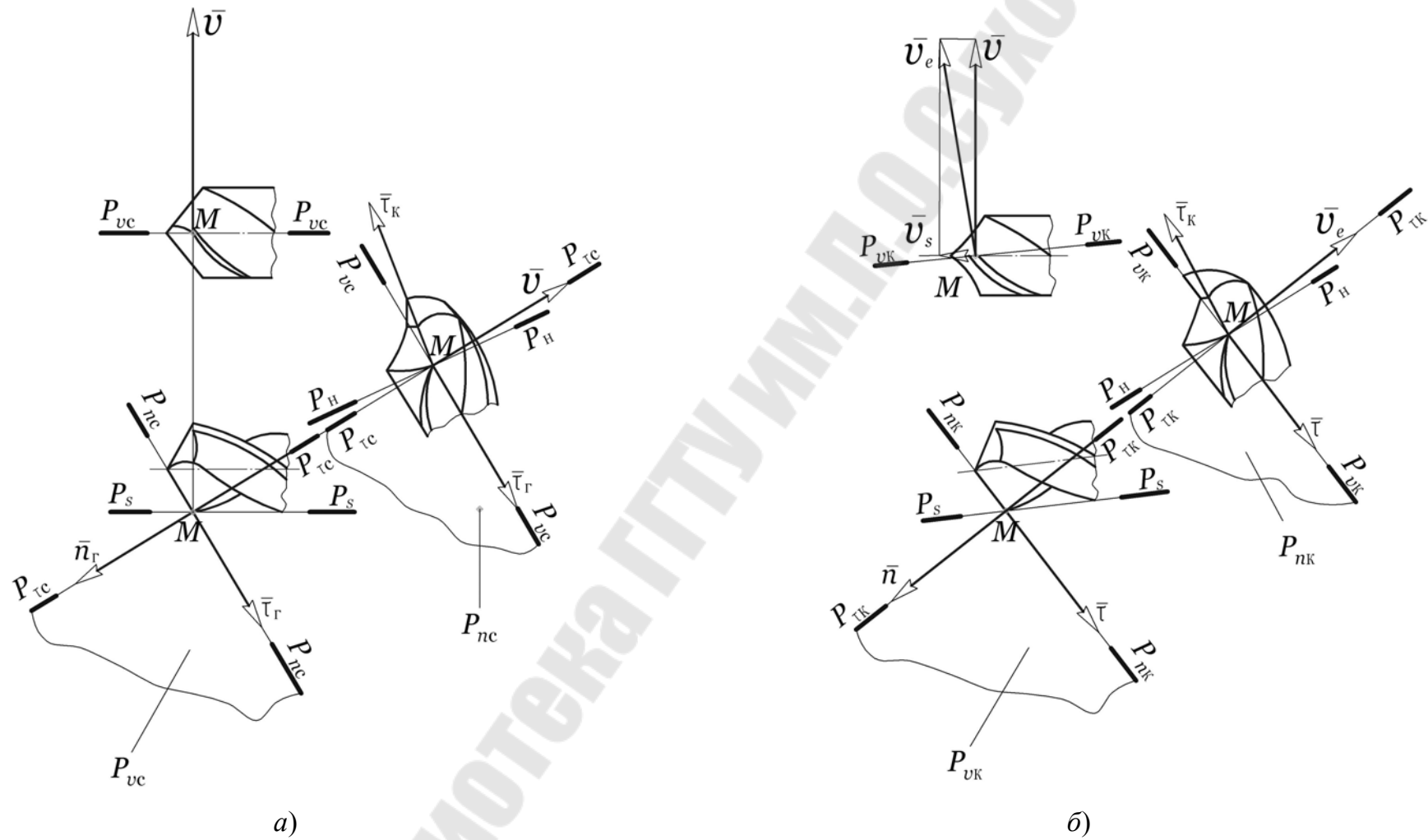


Рис. 3.16. Расположение направляющих векторов и координатных плоскостей у винтового сверла в статической (а) и кинематической (б) системах координат

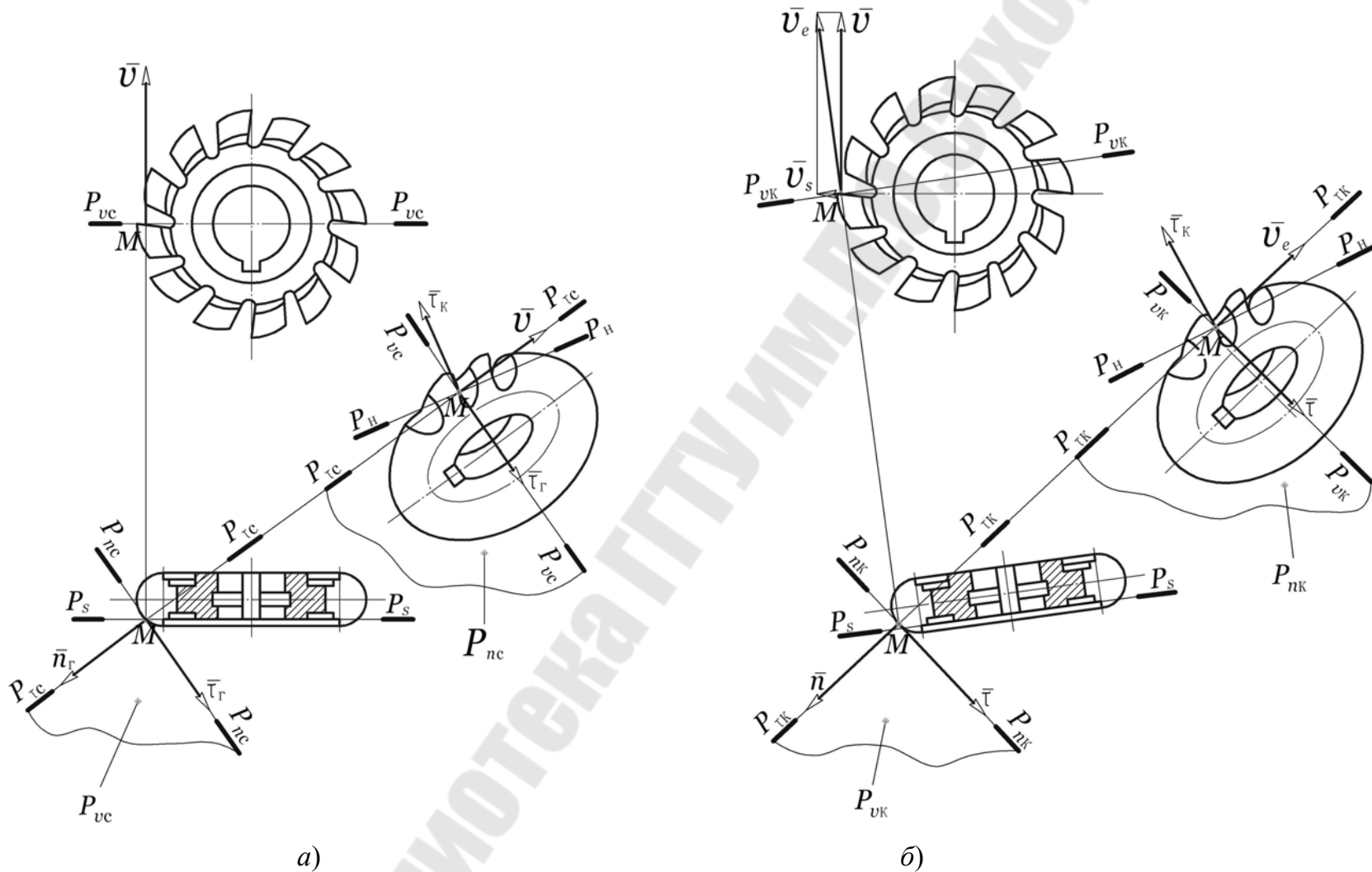


Рис. 3.17. Расположение направляющих векторов и координатных плоскостей у дисковой фасонной фрезы в статической (а) и кинематической (б) системах координат

Расположение координатных плоскостей инструментальной, статической и кинематической систем для двух наиболее характерных видов обработки (врезного точения призматическим фасонным резцом и ротационного обтачивания) приведены на рис. 3.15. Заметим, что координатные плоскости на схемах изображаются лишь в том случае, когда они либо перпендикулярны плоскости чертежа, либо ей параллельны. В первом случае координатные плоскости изображаются следами, во втором – тонкой обрывистой линией, соединяющей следы других плоскостей, перпендикулярных данной (рис. 3.15–3.17).

Кроме трёх координатных плоскостей ( $P_v$ ,  $P_n$  и  $P_\tau$ ) введено также понятие **нормальной секущей плоскости**, т. е. плоскости, перпендикулярной к режущей кромке в рассматриваемой её точке (перпендикулярной вектору  $\vec{\tau}_k$ ). Все эти четыре плоскости дают полное представление о процессе резания и геометрии лезвия инструмента. Описанные в предыдущем параграфе единые правила изображения на чертеже направляющих векторов полностью определяют и положение координатных плоскостей статической и кинематической систем координат. Единый характер изображения эскизов различных инструментов с координатными плоскостями хорошо иллюстрируется примерами эскизов винтового сверла и дисковой фасонной фрезы в статической и кинематической системах координат, приведенными на рис. 3.16 и 3.17.

### 3.9. Классификация разновидностей резания

Для получения чётких представлений о назначении и рациональном использовании возможных разновидностей обработки резанием необходимо знать основные принципы их классификации. Несмотря на важность данного вопроса до выхода в свет государственных терминологических стандартов по обработке резанием [10]–[12], единых и правильных принципов классификации разновидностей резания, можно сказать, не существовало.

В основу классификации разновидностей резания был положен кинематический принцип, основанный на анализе кинематических схем резания. При рассмотрении кинематических схем в параграфе 3.5 данной главы напрашивался вывод о том, что все кинематические схемы резания можно свести к некоторой обобщённой (единой) кинематической схеме, состоящей из пяти элементарных движений, из которой путем наложения соответствующих дополнительных условий можно получить кинематическую схему для любой разновид-

ности обработки. Такая обобщенная кинематическая схема приведена на рис. 3.18. Она включает в себя два вращательных движения вокруг осей соответственно инструмента и заготовки с расположением осей этих движений на схеме вдоль координатной оси  $OX$  ( $D_{ox}^I$  и  $D_{ox}^3$ ) и трех прямолинейных движений, например, инструмента, вдоль каждой из координатных осей ( $D_x$ ,  $D_y$  и  $D_z$ ). Для единообразия на этой схеме лезвию  $L$  инструмента  $I$  придано определенное неизменное положение в правой нижней четверти пространства (плоскости  $YZ$ ), а всем движениям, кроме вращательного движения вокруг оси заготовки  $3$  ( $D_{ox}^3$ ), сообщено направление от инструмента в сторону заготовки. При этом подразумевается также, что каждое из этих пяти движений может иметь обратное направление, т. е. может быть приложено к другому компоненту зоны резания, например, не к инструменту, а к заготовке. Такое изменение направления движения (применение обращенного движения) принципиальных изменений в характер процесса резания не вносит.

Упомянутыми выше дополнительными условиями, с использованием которых можно обобщенную кинематическую схему резания привести к любой конкретной схеме той или иной разновидности обработки, являются:

1. Принятие любого из трёх движений, направления скоростей которых параллельны координатной оси  $OZ$ , главным движением резания.

2. Исключение из обобщенной кинематической схемы тех движений, которые не реализуются в данной разновидности резания.

3. Изменение расположения схемы (окружности) неглавного вращательного движения путем её поворота относительно точки  $M$  до установки оси этого движения в положение, параллельное той координатной оси, относительно которой задан угол взаимной установки инструмента и заготовки.

4. Придание оси неглавного вращательного движения дополнительного поворота относительно точки  $M$  на требуемый угол взаимной установки инструмента и заготовки (при необходимости).

5. Корректировка направлений элементарных движений с учётом места их приложения в конкретной разновидности резания.

6. Простановка на схеме правильных буквенных обозначений движений и углов взаимной установки инструмента и заготовки.

Анализ обобщенной кинематической схемы по элементарным движениям с учётом перечисленных дополнительных условий, обеспечивающих её переход в конкретную схему, позволил автору установить основные классификационные признаки разновидностей резания. С этой целью в рассмотрение были введены два понятия: метод и способ обработки резанием.

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

- видом главного движения резания;
- местом приложения главного движения резания (к заготовке или к инструменту);
- спецификой движения подачи;
- особенностью радиуса траектории резания рассматриваемой точки режущей кромки.

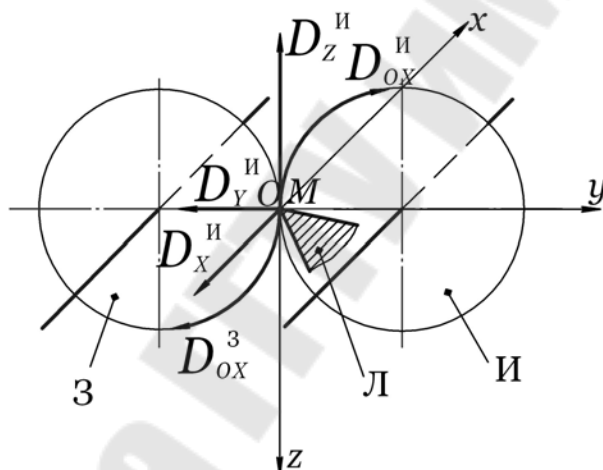


Рис. 3.18. Обобщённая кинематическая схема резания для всех разновидностей обработки

**Способом обработки резанием** назовем более частную разновидность резания, отличающуюся прочими признаками, к которым можно, например, отнести:

- вид движения подачи;
- количество движений подачи;
- направления движений подачи;
- наличие касательного движения;
- значения элементов режима резания;
- конструкцию режущего инструмента;
- способ крепления режущей части;
- конструктивный вариант крепежной части;
- количество лезвий и т. д.



Введение понятий метода и способа обработки резанием позволило всё многообразие разновидностей резания разбить по основным кинематическим признакам на 6 крупных групп (методов) с последующим подразделением этих групп на более мелкие подгруппы (способы) по разнообразным мелким отличительным признакам. Такой подход обеспечивает определенную четкость и простоту классификационного деления разновидностей обработки резанием.

К методам обработки резанием относятся:

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

Кинематические схемы перечисленных шести методов обработки, полученные из обобщенной кинематической схемы резания путем введения в неё соответствующих дополнительных условий, приведены на рис. 3.19. При этом метод абразивной обработки выделен не по кинематическому принципу, а по виду инструментального материала и форме лезвия, как это традиционно сложилось. На рис. 3.19 во всех приведенных схемах для большей наглядности главное движение резания обозначено светлыми стрелками, буквенные обозначения движений имеют сложные индексы, состоящие из обозначения вида движения (главное движение, движение подачи с порядковым его номером) и обозначения направленности движений по рис. 3.18. На рис. 3.19, *а* и *б* тонкими эллиптическими дугами изображены также другие возможные расположения окружностей неглавного вращательного движения (инструмента на рис. 3.19, *а*, *г* и заготовки на рис. 3.19, *б*).

**Токарной обработкой**, или **точением** (рис. 3.19, *а*) называется обработка с вращательным главным движением резания относительно оси заготовки и движениями подачи в любом необходимом направлении. Точение чаще всего реализуется за счет вращения заготовки, однако нередко используется токарная обработка, в которой вращательное движение вокруг оси заготовки совершает инструмент (обращенное движение). Принципиальной разницы в процессе резания здесь нет, отличаются лишь станки, на которых эти способы осуществляются. Изменением расположения оси вращения инструмента (тонкие эллиптические дуги) создаются различные способы токарной обработки.

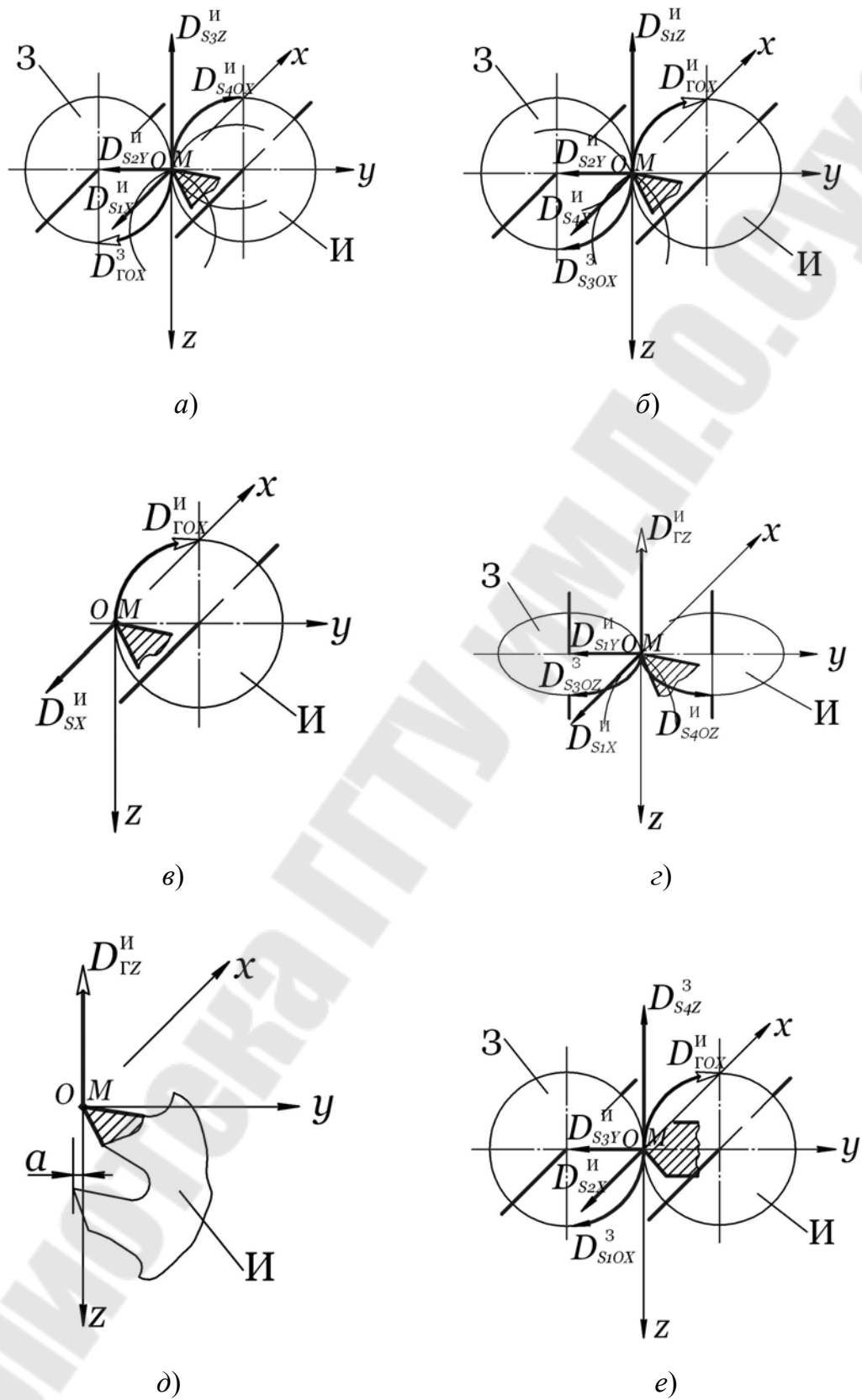


Рис. 3.19. Общие кинематические схемы методов обработки резанием: точения (а), фрезерования (б), осевой обработки (в), строгания (г), протягивания (д) и абразивной обработки (е)

**Фрезерной обработкой**, или **фрезерованием** (рис. 3.19, б) называется обработка с вращательным главным движением резания относительно оси инструмента и движениями подачи в любом необходимом направлении, включая и вращательное движение заготовки вокруг любой оси, кроме движения подачи вдоль оси инструмента, если оно единственное. В составе же нескольких движений подачи при фрезеровании одно из них (прямолинейное) может иметь направление вдоль оси вращательного главного движения резания. Изменение положения оси вращения заготовки при этом даёт различные способы фрезерования.

**Осевой обработкой** (рис. 3.19, в) называется обработка с вращательным главным движением резания относительно оси инструмента и одним движением подачи вдоль оси инструмента. Осевая обработка чаще всего осуществляется за счет вращения инструмента (на сверлильных и агрегатных станках), однако нередко она обеспечивается также и за счет вращения заготовки (на станках токарной группы).

**Строгально-долбёжной обработкой** (рис. 3.19, г) называется обработка с прямолинейным главным движением резания и движениями подачи в любом необходимом направлении. Главное движение может быть с равным успехом приложено как к инструменту, так и к заготовке, что обуславливается конструкцией применяемого станка. Использование остальных движений в любом их сочетании и количестве определяет различные способы строгания (долбления).

**Протяжной обработкой**, или **протягиванием** (рис. 3.19, д) называется обработка с прямолинейным главным движением резания за один ход этого движения без движения подачи с распространением зоны резания на всю протяженность обработки за счет выступания последующего лезвия инструмента над предыдущим. Это единственное движение может быть приложено как к инструменту, так и к заготовке. Выступание  $a$  одного лезвия над другим обеспечивается конструкцией инструмента.

**Абразивная обработка**, определение которой дано в параграфе 1.3, выделена, как это было отмечено выше, по принципу формы и материала острия инструмента. Тем не менее кинематическая схема этого метода приведена на рис. 3.19, е, где вместо лезвия изображено абразивное зерно.

Конкретные разновидности обработки и их использование будут рассмотрены в следующих параграфах.

### 3.10. Способы токарной и фрезерной обработки

Рассмотрим разнообразие и варианты практического использования возможных способов обработки при точении и фрезеровании.

Токарная обработка имеет наибольшее практическое применение и составляет 60–70 % всего объема обработки резанием. Она используется для получения всевозможных поверхностей вращения: цилиндрических, конических, сферических, фасонных, плоско-кольцевых (торцовых), винтовых и резьбовых. Точением обеспечивается наружная и внутренняя обработки, обработка торцов, отрезание заготовок, нарезание резьбы резцом, прорезание канавок и другие работы.

Токарная обработка может осуществляться за счёт использования одного из приведенных на рис. 3.19, *а* четырех движений подачи или определенных их сочетаний. В связи с этим возможны следующие разновидности точения (рис. 3.20):

– продольное точение (с движением  $D_{S1x}$ ): продольное обтачивание (см. рис. 3.2, *а*; рис. 3.3, *а*; рис. 3.12, *а*), растачивание (рис. 3.3, *б*), нарезание резьбы резцом (рис. 3.20, *а*), протачивание торцовых канавок (рис. 3.20, *б*) и т. д.;

– поперечное точение (с движением  $D_{S2y}$ ): подрезание торца (рис. 1.2, *а*), отрезание (рис. 3.3, *е*), фасонное обтачивание (рис. 3.20, *в*), прорезание канавок (рис. 3.20, *з*), снятие фасок (рис. 3.8, *а*) и врезное обтачивание (осциллирующим резцом) (рис. 3.1, *а*) и т. д.;

– тангенциальное точение (с движением  $D_{S3z}$ ): тангенциальное фасонное обтачивание (рис. 3.20, *д*) и т. д.;

– сложное точение (одновременно с несколькими движениями подачи, включая и вращательное): обтачивание конусов и длинных продольно-фасонных поверхностей (на рис. 3.20 не показано), ротационное обтачивание с вертикальной (рис. 3.1, *б*) и с горизонтальной (рис. 3.20, *е*) осями чашки, точение вращающейся фрезой (рис. 3.20, *ж*), круговой протяжкой (рис. 3.20, *з*), фрезеточение (рис. 3.20, *и*), обкаточное точение и т. д.

Назначение и использование способов продольного и поперечного точения вполне определяются их названиями и в объяснениях не нуждаются.

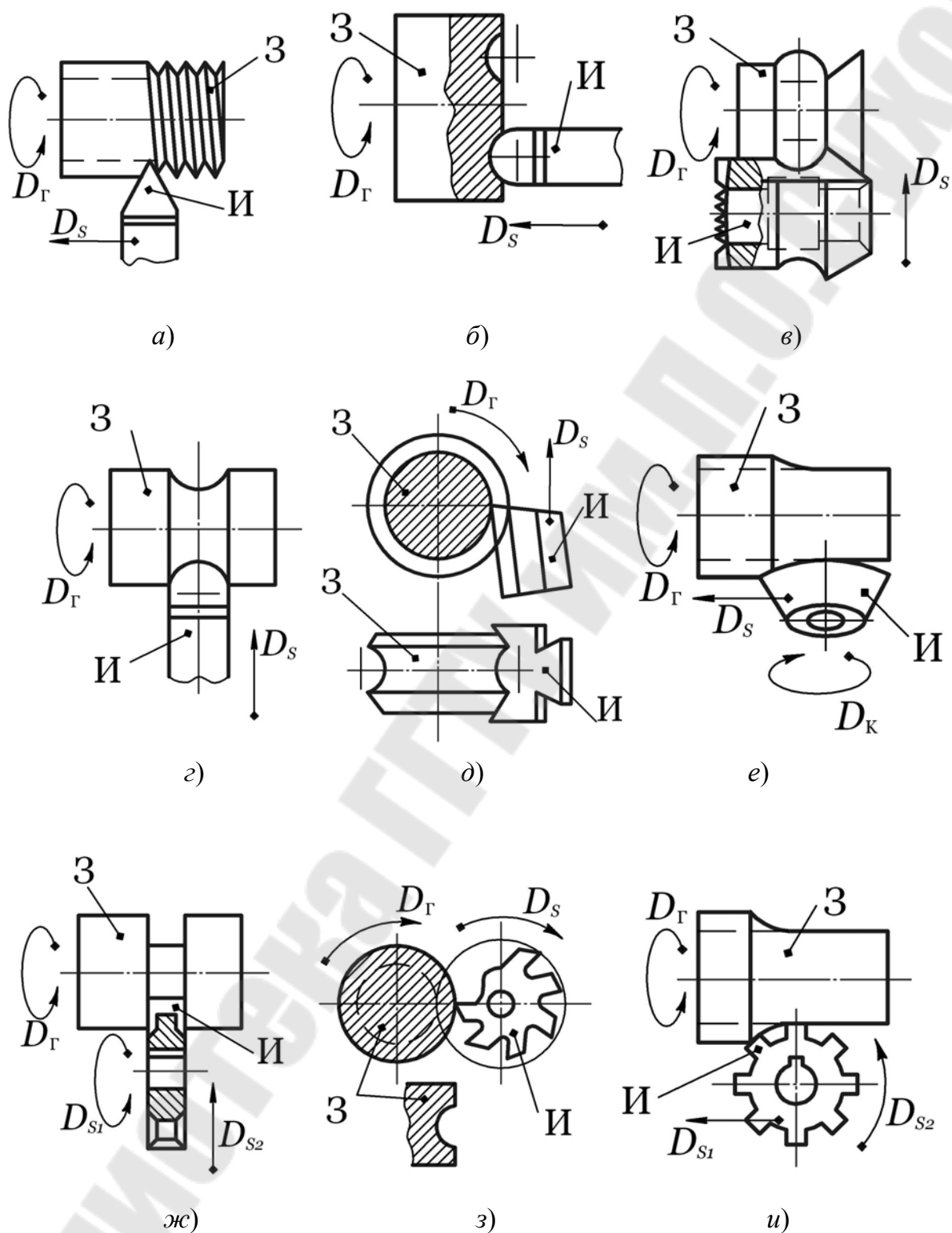


Рис. 3.20. Способы токарной обработки: нарезание резьбы резцом (а), протачивание торцовых канавок (б), фасонное обтачивание (в), прорезание канавок (г), тангенциальное фасонное обтачивание (д), ротационное обтачивание с горизонтальной осью чашки (е), точение вращающейся фрезой (ж), точение круговой протяжкой (з) и фрезеточение (и)

Тангенциальное фасонное обтачивание (рис. 3.20, *д*), при котором направление движения подачи  $D_S$  совпадает с направлением скорости главного движения резания, используется крайне редко в связи с тем, что, во-первых, совмещение движения подачи с главным движением резания даёт малую эффективность, во-вторых, в процессе обработки происходит изменение условий резания (углов лезвия и т. д.).

Сложное точение на основе сочетаний нескольких движений подачи (включая вращательное движение подачи и касательное движение) имеет пока не столь широкое практическое применение, как продольное и поперечное точение, главным образом в связи с тем, что оно требует введения в технологическую систему обработки кроме металлорежущего станка дополнительных приводных устройств для инструмента (копирных устройств, редукторов, шпиндельных узлов и т. д.). Тем не менее оно обладает рядом индивидуальных положительных особенностей, дающих значительные технологические и технико-экономические преимущества.

Обтачивание конусов и длинных продольно-фасонных поверхностей из всех способов сложного точения имеет наибольшее распространение и осуществляется, как правило, на токарно-копировальных станках с использованием копировальных суппортов. Ротационное обтачивание (рис. 3.1, *б* и 3.20, *е*) за счёт непрерывного вывода рабочего участка режущей кромки из зоны резания даёт, как это уже было отмечено в параграфе 1.1, значительное снижение температуры резания, сокращение времени воздействия на лезвие силовой нагрузки, уменьшение шероховатости обработанной поверхности, резкое увеличение стойкости инструмента и производительности резания. Оно используется для чистовой обработки сравнительно жестких заготовок «напроход», т. е. поверхностей, не имеющих уступов.

Точение вращающейся фрезой (рис. 3.20, *ж*), скорость которой значительно меньше скорости заготовки, в какой-то степени сходно с тангенциальным фасонным обтачиванием (рис. 3.20, *д*). Оно встречается крайне редко и используется для обработки «врезанием» достаточно глубоких канавок и других участков поверхностей вращения. Точение круговой протяжкой (рис. 3.20, *з*) предназначено для обработки коротких поверхностей фасонного профиля (за счёт двух вращательных движений) дисковым инструментом, фасонные лезвия которого расположены по спирали Архимеда, что обеспечивает выступание каждого последующего лезвия над предыдущим (круговая протяжка).

**Фрезеточением** (рис. 3.20, *и*) назван способ токарной обработки специальным принудительно вращающимся инструментом в виде зубчатого диска, предложенный автором (авторское свидетельство № 228463 от 23.07.68). Преимущества фрезеточения по сравнению с обычным продольным обтачиванием состоят в следующем: устойчивое кинематическое стружкодробление, прерывистость резания и переменность сечения срезаемого слоя (как при фрезеровании), отсутствие связи ширины срезаемого слоя с глубиной резания, возможность снимать большие припуски за один проход, меньшая температура резания, обработка поверхности «из-под корки», большие стойкость инструмента и производительность обработки.

В связи с зубчатостью лезвия и большой шероховатостью обработанной поверхности этот способ пригоден для черновой обработки.

Фрезерная обработка по распространенности занимает второе место после токарной обработки. Фрезерованием получают различные плоские и прямолинейно-фасонные поверхности, поверхности вращения, сложные фасонные поверхности. Фрезерование используется для обработки плоских элементов деталей, различных площадок, канавок, уступов, пазов, углублений, резьб, зубчатых колёс, шлицевых участков валов, наружных цилиндрических поверхностей, для разрезки заготовок на части и т. д.

Фрезерная обработка, как и точение, может осуществляться за счёт использования одного из приведённых на рис. 3.19, *б* четырёх движений подачи, кроме движения вдоль оси инструмента  $D_{S4x}$ , а также определенных сочетаний любых из этих четырёх движений. При этом возможны следующие разновидности фрезерования:

– тангенциальное фрезерование (с движением  $D_{S1z}$ ): периферийное фрезерование плоскостей (см. рис. 3.2, *в* и 3.12, *в*), фрезерование фасонных канавок (рис. 3.21, *а*) и т. д.;

– поперечное фрезерование (с движением  $D_{S2y}$ ): фрезерование концевой угловой фрезой (рис. 3.2, *з*), торцовое фрезерование (рис. 3.3, *д*), фрезерование паза концевой конической фрезой (рис. 3.3, *з*), отрезание (рис. 3.21, *б*), фрезерование пазов концевой фрезой (рис. 3.21, *в*) и т. д.;

– сложное фрезерование (одновременно с несколькими движениями подачи, включая и вращательное): резьбофрезерование гребенчатой фрезой (рис. 3.21, *з*), врезное круговое фрезерование (рис. 3.21, *д*), круговое фрезерование торцовой фрезой (рис. 3.21, *е*), круговое фрезерование дисковой фрезой (рис. 3.21, *ж*), вихревое нарезание резьбы (рис. 3.21, *з*), зубофрезерование червячной фрезой (рис. 3.21, *и*) и т. д.

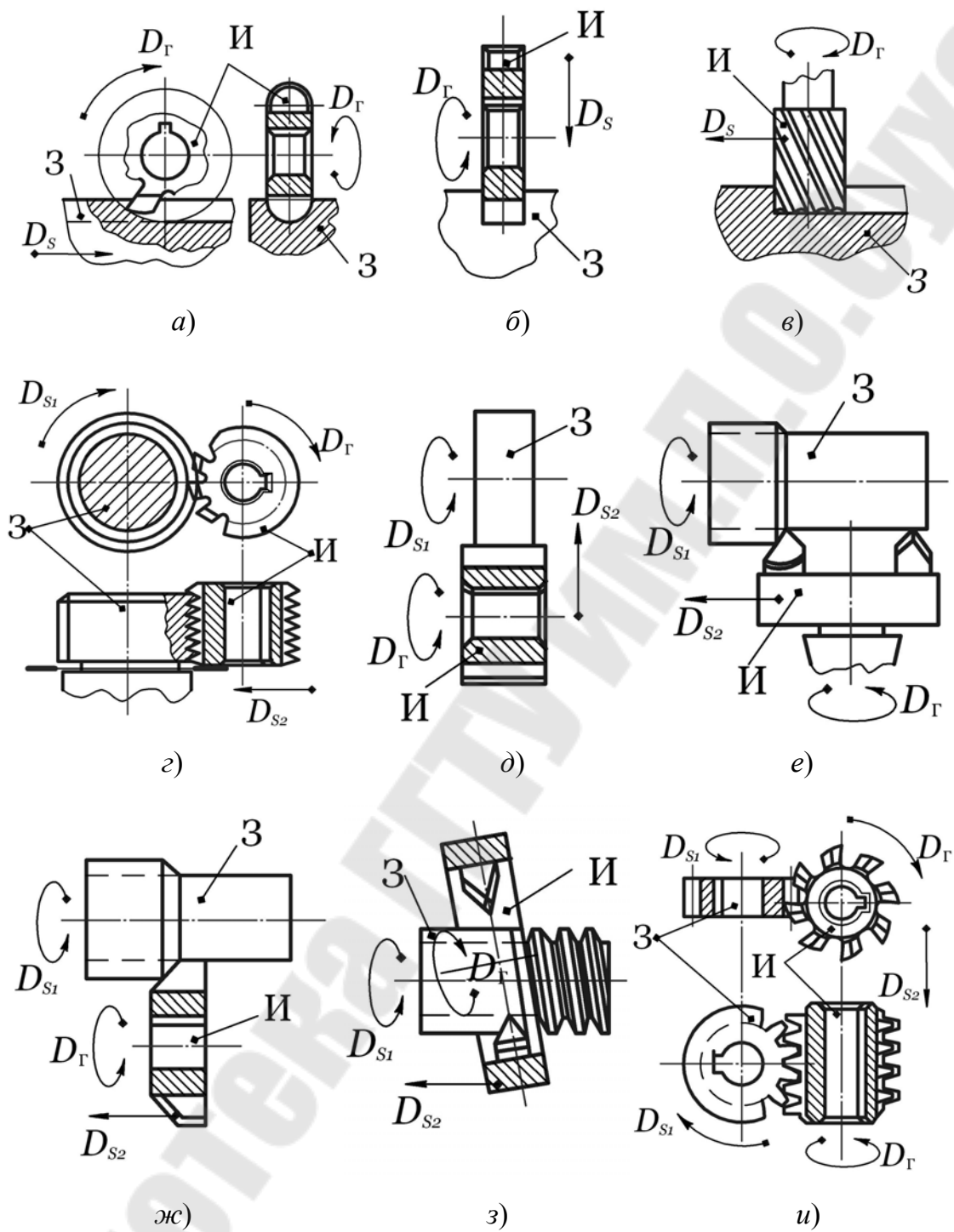


Рис. 3.21. Способы фрезерной обработки: фрезерование канавок (а), отрезание (б), фрезерование пазов концевой фрезой (в), резьбофрезерование гребенчатой фрезой (г), врезное фрезерование (д), круговое фрезерование торцевой фрезой (е), круговое фрезерование дисковой фрезой (ж), вихревое нарезание резьбы (з) и зубофрезерование (и)



Из приведенного перечня способов фрезерования, который далеко не исчерпывает всё их возможное количество, ясно, что по разнообразию способов резания фрезерование значительно преобладает над методом токарной обработки резанием в связи с большим количеством различных его отличительных признаков. Так, по расположению лезвий относительно корпуса инструмента фрезерование может быть **периферийным** (см. рис. 3.2, в и 3.12, в), т. е. когда лезвия расположены на периферии корпуса инструмента, **торцовым**, когда они выступают из корпуса в осевом направлении (см. рис. 1.2, в и 3.3, д) и **периферийно-торцовым** при расположении лезвий как на периферии, так и на торце корпуса (см. рис. 3.2, г и 3.3, г).

По направлению движения подачи, приложенного к заготовке, различают **встречное фрезерование**, при котором в месте контакта инструмента и заготовки направления скоростей главного движения резания и движения подачи заготовки относительно инструмента направлены в противоположные стороны (см. рис. 3.2, в и 3.12, в), и **попутное фрезерование**, когда эти направления совпадают. Фрезерование может быть **круговым**, при котором обрабатываются поверхности вращения (рис. 3.21, г–ж), **охватывающим**, в котором обработка ведётся лезвиями, расположенными на внутренней поверхности корпуса инструмента (рис. 3.21, з), **отрезным**, осуществляющим отрезку заготовок. По форме обрабатываемых элементов (участков) деталей различают **зубофрезерование** (рис. 3.21, и), **резьбофрезерование** (фрезерование резьбы) (рис. 3.21, г), **шлицефрезерование** (фрезерование шлицев), **копировальное фрезерование** (фрезерование сложных поверхностей по копиру), **шпоночное фрезерование** (фрезерование шпоночных пазов) и т. д.

Всем способам фрезерования присущи прерывистость процесса резания и образование стружки в форме коротких завитков переменного сечения.

### **3.11. Способы осевой и строгально-долбёжной обработки**

Осевая обработка имеет меньшее практическое распространение по сравнению с точением и фрезерованием. Вместе с тем она является основным методом получения и обработки отверстий и других различных поверхностей, примыкающих к ним.

В зависимости от вида обработанной поверхности и её качества используется ряд способов осевой обработки (рис. 3.22).

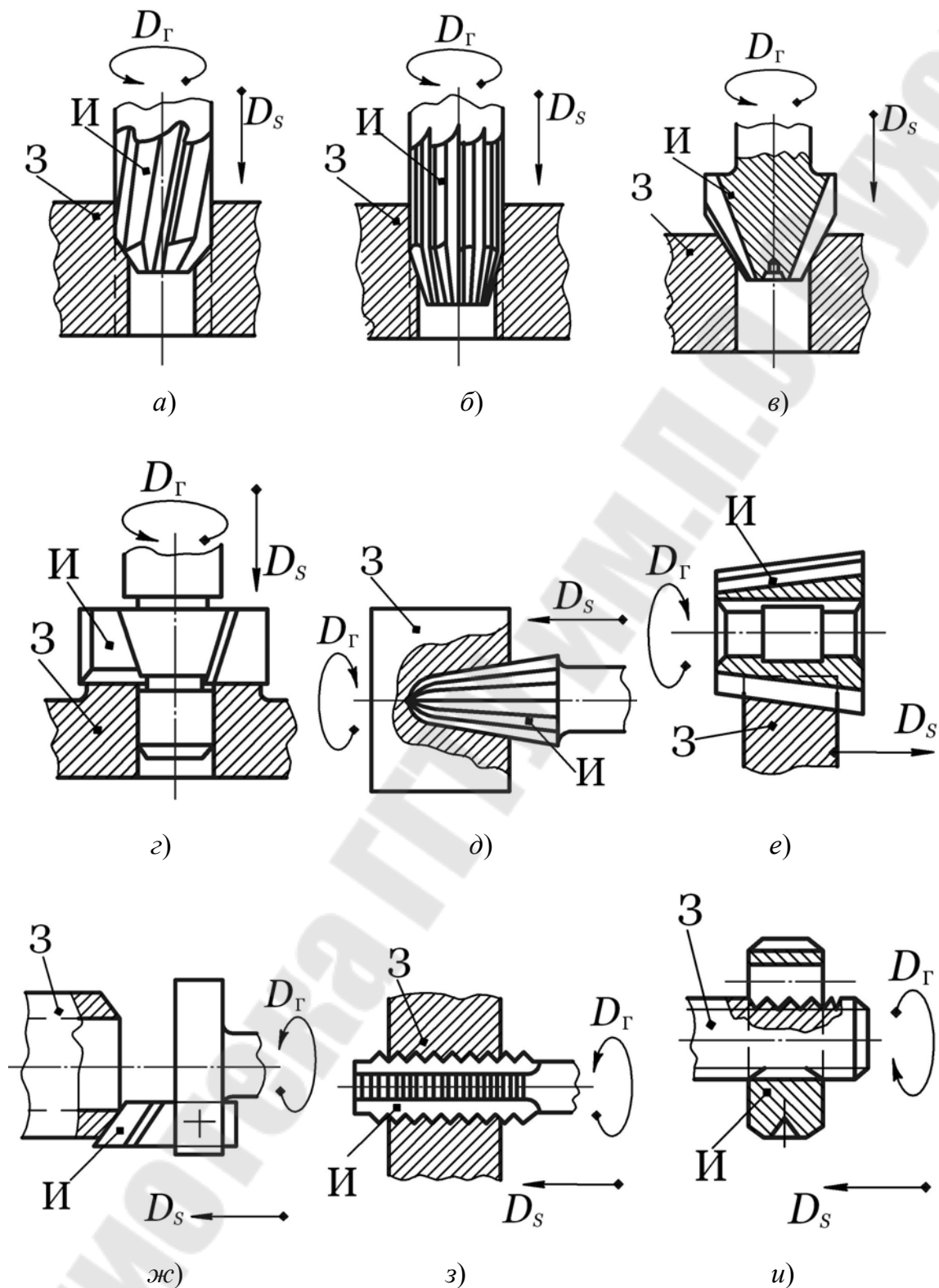


Рис. 3.22. Способы осевой обработки: зенкерование (а), развертывание (б), зенкование (в), цекование (г), обработка фасонного отверстия концевой фрезой (д), растачивание углубления конической фрезой (е), обработка фаски резцом (ж), нарезание резьбы метчиком (з) и плашкой (и)

К основным способам обработки можно отнести: **сверление** (см. рис. 1.2, б; 3.2, б; 3.12, б), т. е. образование отверстий в сплошном материале, **рассверливание** (см. рис. 3.8, б), т. е. увеличение диаметра ранее полученного отверстия, **зенкерование** (рис. 3.22, а), т. е. увеличение диаметра и улучшение точности отверстия, **развертывание** (рис. 3.22, б), т. е. исправление формы и увеличение точности отверстия, **зенкование** (рис. 3.3, в и 3.22, в), т. е. получение и обработка коротких конических поверхностей и фасок, **цекование** (рис. 3.22, г), т. е. обработка торцовых, преимущественно плоских, участков отверстий, **обработка фасонного отверстия** концевой копировальной фрезой (рис. 3.22, д), например обработка на токарном станке с вращением заготовки, **расточивание** углубления конической фрезой (рис. 3.22, е), т. е. обработка на фрезерном или расточном станках при неподвижной заготовке, **обработка фаски «летучим» резцом** (рис. 3.22, ж), т. е. обработка фаски на расточном станке вращающимся жестко закрепленным на оправке резцом, **нарезание резьбы метчиками** (рис. 3.22, з) и **плашками** (рис. 3.22, и).

Строгально-долбежная обработка имеет, пожалуй, наименьшее распространение в связи с наличием возвратного (холостого) хода в главном движении резания после каждого рабочего хода, что резко снижает производительность процесса. Она используется в настоящее время только тогда, когда заданные требования к обработанной поверхности не могут быть выполнены другими методами обработки или когда на данном производственном участке отсутствует оборудование для реализации более производительных методов резания.

Строганием (долблением) получают плоские, прямолинейно-фасонные и сложно-фасонные поверхности (с использованием копиров), а также нарезают зубья шестерен.

Строгально-долбежная обработка в зависимости от кинематических особенностей и формы обработанной поверхности может подразделяться на **строгание плоскостей** (см. рис. 3.4, а), **фасонное строгание** (рис. 3.23, а), **строгание продольно-фасонных поверхностей** (рис. 3.23, б), **строгание сложных поверхностей** (рис. 3.23, в), **долбление пазов** (рис. 3.4, б), **нарезание зубьев зуборезной гребенкой** (рис. 3.23, г), **зубодолбление** (рис. 3.23, д), **зубострогание** (рис. 3.23, е) и т. д.

Основное различие приведённых способов строгально-долбежной обработки состоит в направлении, виде и количестве используемых движений подачи. Все способы строгания характерны прерывистым или возвратно-поступательным прямолинейным дви-

жением подачи. Способы нарезания зубьев в данном методе обработки (рис. 3.23, *г–е*) отличаются непрерывностью движений подачи. Они обеспечивают нарезание зубьев путем взаимного обката инструмента и заготовки в движении подачи.

Непрерывное нарезание зубьев зуборезной гребенкой (рис. 3.23, *г*) происходит до тех пор, пока гребенка в движении подачи  $D_{S1}$  не пройдет в пределах заготовки свою длину, после чего она выводится в радиальном направлении из контакта с заготовкой, возвращается в движении подачи  $D_{S1}$  в обратном направлении и, вернувшись в радиальном направлении в своё исходное положение, продолжает непрерывную обработку до следующей переустановки и т. д., пока не будут нарезаны все зубья.

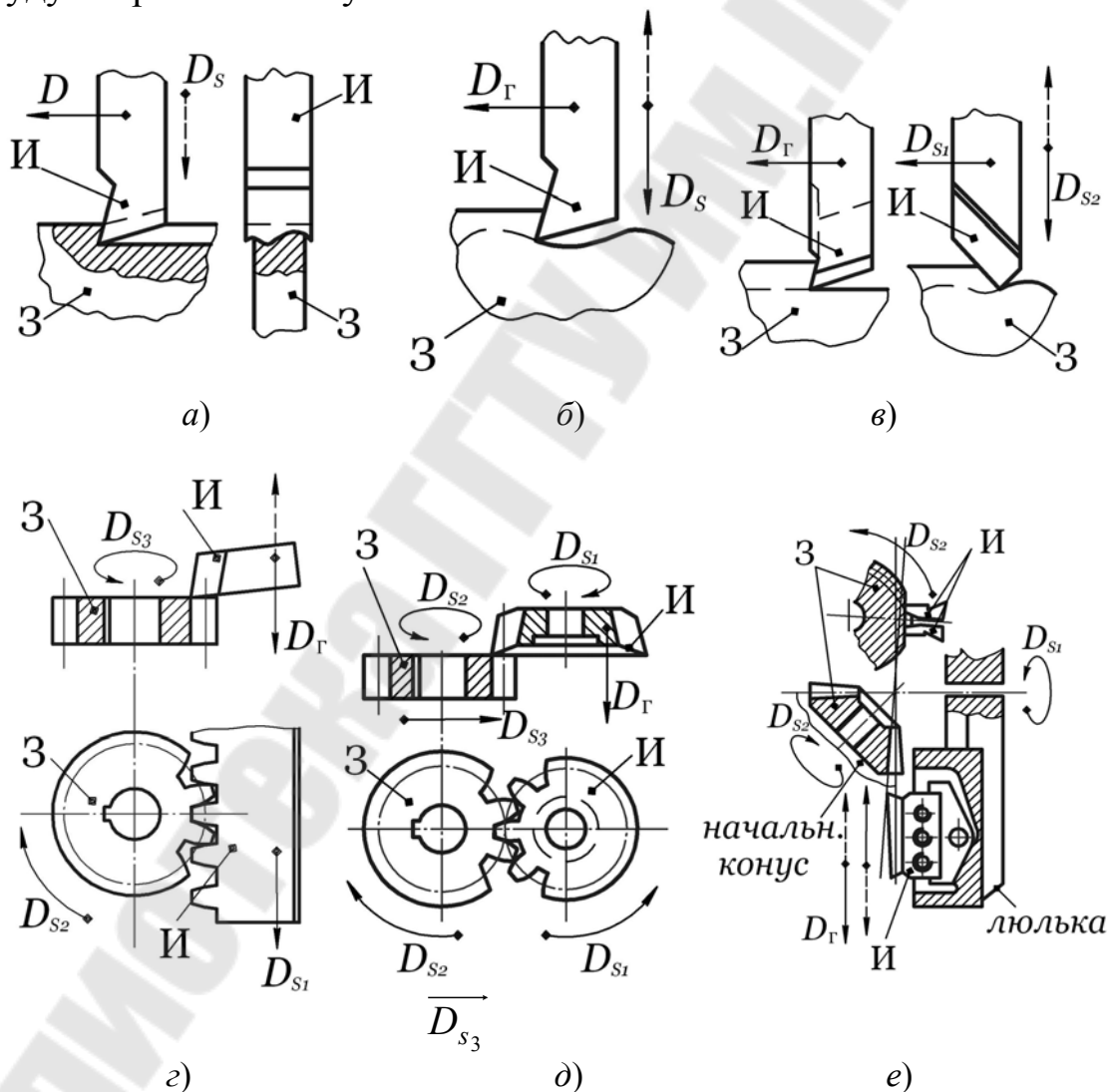


Рис. 3.23. Способы строгально-долбежной обработки: фасонное строгание (*а*), строгание продольно-фасонных поверхностей (*б*), строгание сложных поверхностей (*в*), нарезание зубьев зуборезной гребенкой (*г*), зубодолбление (*д*) и зубострогание (*е*)

Зубодолбление (рис. 3.23, *д*) осуществляется за счёт непрерывных двух вращательных движений инструмента  $D_{S1}$  и заготовки  $D_{S2}$  и прямолинейного радиального движения  $D_{S3}$  (для врезания инструмента на всю глубину впадины зуба). Во избежание трения долбняка о заготовку при возвратном (холостом) его перемещении в главном движении заготовке специальным устройством станка сообщается незначительный отскок от инструмента (на рис. 3.23, *д* это движение не показано).

Зубострогание (рис. 3.23, *е*) служит для нарезания зубьев на конических шестернях специальным инструментом, который называется зубострогальным резцом. Кинематику этого процесса можно считать наиболее сложной по сравнению с другими способами резания. Обрабатываются одновременно две боковые стороны одного зуба двумя резцами, движущимися возвратно-поступательно вдоль своей длины (один – вперед, другой – назад), причём резцы имеют такую геометрию, что они могут вести обработку в прямом и обратном направлениях. Подвижная часть станка (люлька), относительно которой совершают своё возвратно-поступательное прямолинейное движение резцы, получает вращательное движение подачи  $D_{S1}$  вокруг оси, перпендикулярной той образующей начального конуса, которая обращена в сторону инструмента. Заготовке же сообщается вращательное движение подачи  $D_{S2}$  вокруг её оси, скорость которого в каждой точке образующей начального конуса равна скорости другого вращательного движения  $D_{S1}$  (взаимный обкат без скольжения по начальному конусу). После обработки одного зуба шестерни происходит автоматическая переустановка инструмента и заготовки на новый зуб и обработка продолжается.

### 3.12. Способы протяжной и абразивной обработки

Протяжная обработка (рис. 3.4, *в* и 3.19, *д*) является современным высокопроизводительным и точным методом обработки резанием, дающим высокое качество обработанной поверхности. Она экономически целесообразна в массовом и крупносерийном производствах, а также в мелкосерийном производстве. Протягивание иногда используется и в единичном производстве при исключительно высокой сложности и точности обработанной поверхности.

Протягивание осуществляется (рис. 3.24) специальным стержневым многолезвийным режущим инструментом (с выступанием последующего лезвия над предыдущим), называемым **протяжкой**. Разли-

чают **протягивание** и **прошивание**. В первом случае (рис. 3.24, *а*) инструмент (протяжка) в процессе обработки «протаскивается» через отверстие за хвостовик, во втором (рис. 3.24, *б*) – проталкивается через отверстие путём приложения силы  $P$  к противоположному концу инструмента, называемого **прошивкой**. Протягивание может быть **внутренним** (рис. 3.24, *а* и *б*), т. е. когда обработанная поверхность (при виде на основную плоскость) имеет замкнутый профиль, и **наружным** (рис. 3.24, *в*), т. е. когда профиль обработанной поверхности незамкнутый.

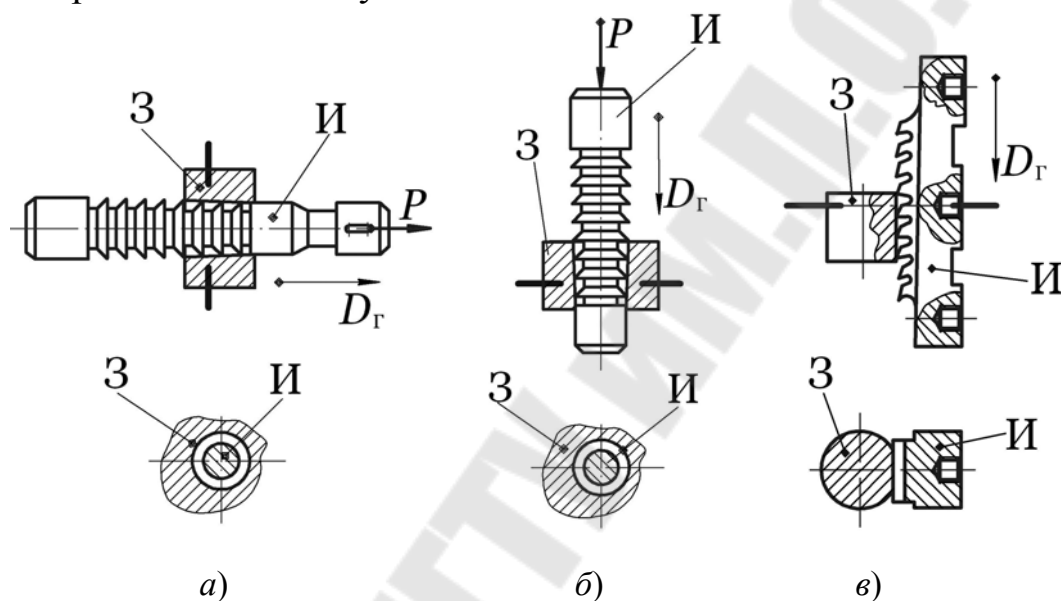


Рис. 3.24. Способы протяжной обработки:  
круглое внутренне протягивание (*а*), прошивание (*б*)  
и наружное протягивание (*в*)

Абразивная обработка в современном машиностроении играет исключительно важную роль. Она является окончательной (финишной) обработкой любой поверхности с высокими требованиями точности и шероховатости, а в отдельных случаях и единственно возможным методом обработки (обработка высокотвердых материалов: твердых сплавов, керамики, стекла, ситаллов, ферритов, германия, кремния, минералов и т. д., а также обработка в труднодоступных местах). Поэтому из всех методов обработки резанием абразивная обработка в настоящее время является самой распространенной и максимально ответственной за точность и надежность выпускаемых машин. Вместе с тем она является, пожалуй, самой сложной и проблематичной обработкой.

Общее понятие абразивной обработки было рассмотрено ранее. В связи с неопределенностью (округлостью) режущих элементов (зёрен) процесс резания при абразивной обработке носит также неопределенный (вероятностный) характер. В процессе обработки притуплённые зёрна производят не только обычное резание с образованием стружки, доля которого при абразивной обработке предельно мала, но и так называемое «**царапание**» поверхности (оставление рисок без образования стружки), повышенное истирание поверхности и интенсивное пластическое деформирование (наклёп) поверхностного слоя заготовки. Всё это придаёт абразивной обработке особую специфику по сравнению с другими методами обработки. Каких-нибудь отличительных кинематических особенностей абразивная обработка по сравнению с другими методами не имеет.

Абразивный режущий инструмент может быть выполнен из **связанного абразива**, т. е. из соединённых между собой (связкой) зёрен, и **несвязанного абразива**, т. е. из свободных (несвязанных) зёрен. Инструмент из связанного абразива выпускается в виде шлифовальных кругов, головок, сегментов, брусков, шкурок, а из несвязанного – в виде шлифовальных порошков, микропорошков, паст и суспензий. Абразивная обработка из всех методов резания имеет наибольшее число разновидностей обработки. По принципу резания их можно разделить на **шлифование**, т. е. обработку шлифовальными кругами, осуществляемую в значительной мере за счёт резания и царапания, **хонингование**, т. е. обработку шлифовальными брусками, при которой производится притирка преимущественно цилиндрических обработанных поверхностей по внешней поверхности инструмента за счёт их «царапания» и истирания, **суперфиниш**, т. е. обработку шлифовальными брусками, в ходе которой обеспечивается отделка обработанной поверхности преимущественно за счёт её истирания, **доводку**, т. е. обработку шлифовальными порошками и пастами, при которой обработанная поверхность за счёт микроистирания о поверхность – аналог специального инструмента, называемого **притиром**, достигает наивысшей точности и предельно малой шероховатости, и **полирование**, т. е. обработку абразивной пастой или суспензией, в результате которой обработанная поверхность за счёт тончайшего микроистирания о поверхность быстровращающегося мягкого (войлок, фетр, сукно и т. д.) круга, покрытую абразивным материалом, получает зеркальный блеск без изменения размера и наведённой предшествующей обработкой шероховатости.

Существует множество способов абразивной обработки, отдельные наиболее часто используемые на практике представители которых приведены на рис. 3.25: плоское периферийное (*а*) и торцовое (*б*) шлифование, затачивание и доводка режущего инструмента (*в*), круглое продольное наружное периферийное (*г*) и торцовое (*е*) шлифование, круглое поперечное (врезное) наружное шлифование (*д*), фасонное шлифование, например (*д*), круглое продольное внутреннее шлифование (*ж*), бесцентровое шлифование (*з*), резьбошлифование (*и*), желобошлифование, например (*д*), и сферошлифование (в шарикоподшипниковой промышленности), зубошлифование, шлищешлифование, ленточное шлифование (*к*), хонингование (*л*), суперфиниш (*м*), доводка, притирка, полирование.

Как видно из схем на рис. 3.25, способы абразивной обработки отличаются формой обработанной поверхности, кинематикой процесса, конфигурацией и материалом инструмента, режимными параметрами обработки. Общим в них является лишь то, что инструмент выполнен из абразивного материала, а главное движение резания всегда приложено к инструменту.

Рассмотрим некоторые наиболее сложные и отличающиеся (особенные) способы абразивной обработки.

Бесцентровое шлифование (рис. 3.25, *з*) осуществляется с использованием вращательного движения подачи  $D_{S1}$ , приложенного к заготовке. Оно обеспечивается посредством принудительного вращения ведущего абразивного круга, от соприкосновения с которым получает вращение и заготовка. Последняя устанавливается так, что её ось располагается выше горизонтальной линии центра режущего круга, благодаря чему происходит устойчивая кинематика процесса резания при бесцентровом шлифовании. Ведущий круг имеет небольшой наклон к горизонтальной плоскости (на рис. 3.25, *з* ведущий круг показан наклоненным), благодаря которому заготовка вместе с вращательным движением  $D_{S1}$  получает и движение подачи  $D_{S2}$  вдоль своей оси. Такая особенность способа бесцентрового шлифования даёт возможность достаточно простыми техническими средствами (бункер, магазин, лотки и т. д.) обеспечить полную автоматизацию процесса обработки гладких (без уступов) деталей.

Резьбошлифование осуществляется с использованием дискового резьбового (рис. 3.25, *и*) или широкого многоконического круга. При этом ось шлифовального круга, как это видно из рис. 3.25, *и*, должна быть развернута по отношению к оси заготовки на угол, равный углу подъема резьбы.



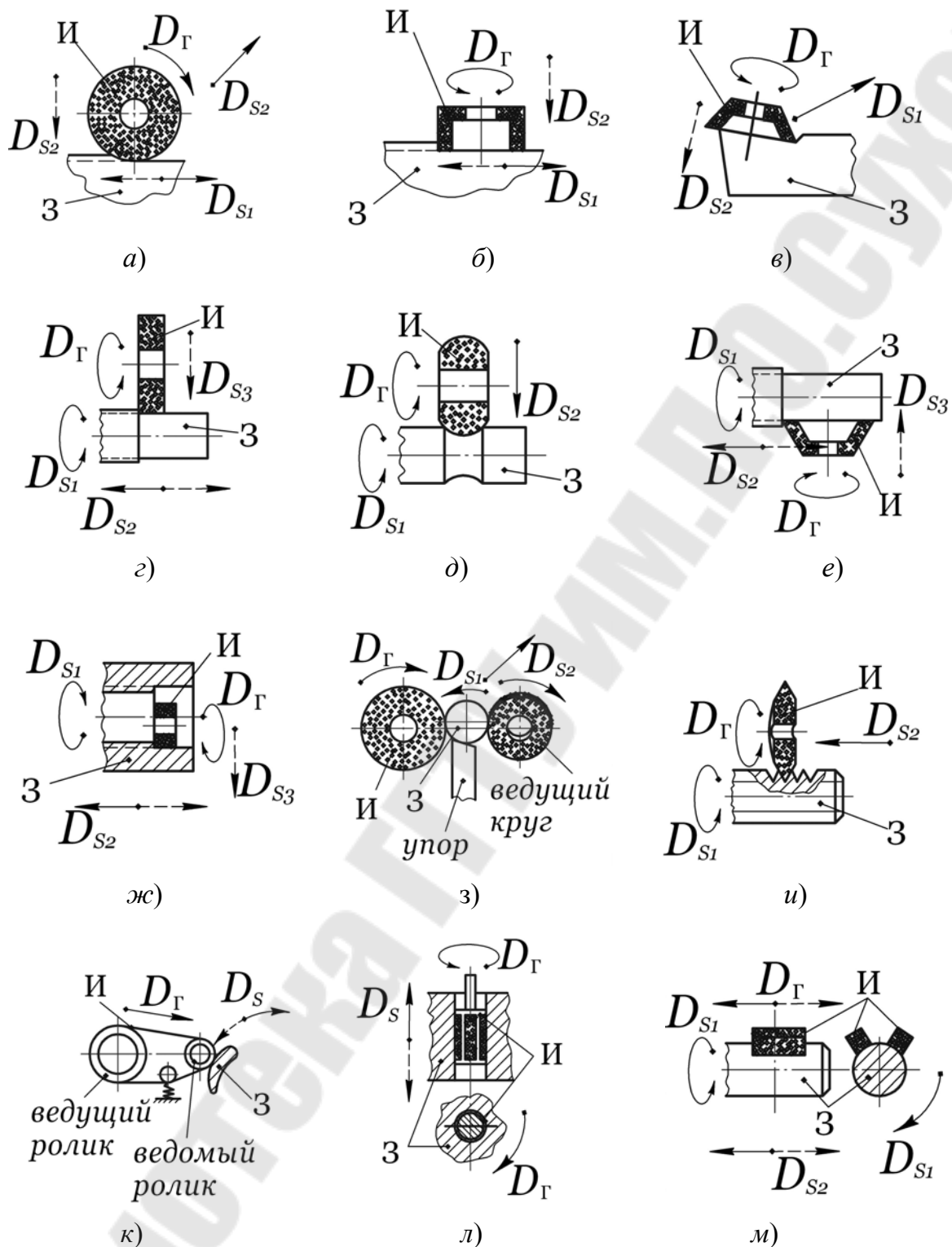


Рис. 3.25. Способы абразивной обработки: плоское периферийное шлифование (а) и торцовое шлифование (б), затачивание и доводка режущего инструмента (в), круглое продольное наружное периферийное шлифование (г), круглое поперечное (врезное) наружное шлифование (д), круглое продольное наружное торцовое шлифование (е), круглое продольное внутреннее шлифование (ж), бесцентровое шлифование (з), резбошлифование (и), ленточное шлифование (к), хонингование (л) и суперфиниш (м)

Ленточное шлифование (рис. 3.25, *к*) осуществляется непрерывной абразивной лентой, изготавливаемой из широкой шлифовальной шкурки на тканевой основе, за счет поступательного её движения между вращающимися ведущим и ведомым роликами. Последний одновременно является и жесткой основой шлифовальной шкурки в зоне обработки. Возвратно-поступательное движение подачи  $D_S$  вдоль обработанной поверхности (по копиру) обеспечивает непрерывную обработку сложнопрофильной поверхности. Ленточное шлифование является высокоэффективным и перспективным способом абразивной обработки, позволяющим вести точную обработку достаточно сложных поверхностей простым и дешевым инструментом с возможностью полной автоматизации процесса шлифования.

Хонингование (рис. 3.25, *л*) осуществляется за счет вращательного движения резания, сообщаемого инструменту, который представляет собой хонинговальную головку с регулируемым в процессе резания радиальным её размером. Возвратно-поступательное движение подачи вдоль оси обрабатываемого отверстия совершает также хонголовка, шлифовальные бруски которой (4–6 штук) обеспечивают в движении резания как бы притирку поверхности отверстия по рабочей поверхности хонголовки. Траектория резания при хонинговании представляет собой крутую винтовую линию, обуславливающую минимальную шероховатость обработанной поверхности. Обработка ведется с обильным поливом смазывающе-охлаждающей жидкости, например, в составе 80–90 % керосина и 10–20 % веретенного масла. Хонингование используется для обработки рабочей поверхности цилиндров при их изготовлении и ремонте.

Суперфиниш (рис. 3.25, *м*) производится за счет осциллирующего вдоль оси заготовки главного движения резания при вращательном движении подачи  $D_{S1}$ , приложенном к заготовке, и прямолинейном возвратно-поступательном движении вдоль оси детали. Такое сочетание движений с выбранной зернистостью шлифовальных брусков обеспечивает отделку обработанной поверхности практически без изменения её размеров, формы и расположения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бобров, В. Ф. Основы теории резания металлов / В. Ф. Бобров. – Москва : Машиностроение, 1975.
2. Филоненко, С. Н. Резание металлов / С. Н. Филоненко. – Киев : Вища школа, 1969.
3. Вульф, А. М. Резание металлов / А. М. Вульф. – Москва : Машиностроение, 1973.
4. Подураев, В. Н. Резание труднообрабатываемых материалов / В. Н. Подураев. – Москва : Высш. шк., 1974.
5. Ящерицын, П. И. Основы резания материалов и режущий инструмент / П. И. Ящерицын, М. Л. Еременко, Н. И. Жигалко. – Минск : Выш. шк. 1981.
6. Грановский, Г. И. Резание металлов : учеб. для машиностр. и приборостр. специальных вузов / Г. И. Грановский, В. Г. Грановский. – Москва : Высш. шк., 1985.
7. Аршинов, В. А. Резание металлов и режущий инструмент / В. А. Аршинов, Г. А. Алексеев. – Москва : Машиностроение, 1976.
8. Суворов, А. А. Металлорежущие инструменты (атлас конструкций) / А. А. Суворов, Г. С. Зайдлин, Г. М. Стискин. – Москва : Машиностроение, 1979.
9. Справочник технолога-машиностроителя : в 2 т. / под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : Машиностроение, 1986.
10. ГОСТ 25762–83. Обработка резанием. Термины, определения и обозначения общих понятий.
11. ГОСТ 25761–83. Виды обработки резанием. Термины и определения общих понятий.
12. ГОСТ 25751–83. Инструменты режущие. Термины и определения общих понятий.
13. Новоселов, Ю. А. Геометрия резания и деформация срезаемого слоя : практ. пособие к учеб.-исслед. лаб. практикуму / Ю. А. Новоселов. – Гомель : ГПИ, 1997.
14. Новоселов, Ю. А. Силы и температура резания : практ. пособие к учеб.-исслед. лаб. практикуму / Ю. А. Новоселов. – Гомель : ГПИ, 1997.
15. Новоселов, Ю. А. Математическая обработка результатов эксперимента : метод. указания по анализу результатов УИРС и НИРС / Ю. А. Новоселов. – Гомель : ГПИ, 1982.

16. Новоселов, Ю. А. Анализ разновидностей обработки : метод. указания по выполнению одноим. задания № 1 контр. работы по дисциплине «Теория резания» для студентов заоч. фак. / Ю. А. Новоселов. – Гомель : ГПИ, 1991.

17. Новоселов, Ю. А. Определение наивыгоднейшего режима резания : метод. указания по выполнению одноим. задания № 2 контр. работы по дисциплине «Теория резания» для студентов заоч. фак. / Ю. А. Новоселов. – Гомель : ГПИ, 1991.

18. Новоселов, Ю. А. Унификация системы понятий процесса резания / Ю. А. Новоселов // СТИН. – 2006. – № 6. – С. 22–26.

19. Новоселов, Ю. А. О методах исследования, познания и обучения теории резания // Вестн. машиностроения. – 2006. – № 10. – С. 53–57.

Учебное электронное издание комбинированного распространения

Учебное издание

**Новоселов Юрий Агафьевич**

## **ТЕОРИЯ РЕЗАНИЯ**

**Пособие**

**для студентов**

**машиностроительных специальностей**

Редактор

*Н. Г. Мансурова*

Компьютерная верстка

*Н. В. Широглазова*

Подписано в печать 15.02.07.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.

Ризография. Усл. печ. л. 5,81. Уч. - изд. л. 5,8.

Изд. № 108.

E-mail: [ic@gstu.gomel.by](mailto:ic@gstu.gomel.by)

<http://www.gstu.gomel.by>

Издатель и полиграфическое исполнение:

Издательский центр

Учреждения образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого».

ЛИ № 02330/0133207 от 30.04.2004 г.

246746, г. Гомель, пр. Октября, 48, т. 47-71-64.