

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Полоцкий государственный университет»

Н.Н. ПОПОК

ТЕОРИЯ РЕЗАНИЯ

Допущено Министерством образования Республики Беларусь в качестве учебного пособия для студентов машиностроительных специальностей учреждений, обеспечивающих получение высшего образования

Новополоцк 2006

УДК 621.91.01(075.8)
ББК 34.63-1я73
П 58

РЕЦЕНЗЕНТЫ:

А. И. КОЧЕРГИН, канд. техн. наук, профессор кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» Белорусского национального технического университета;
М. И. МИХАЙЛОВ, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Металлорежущие станки и инструменты» Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого

Попок, Н. Н.

П 58 Теория резания : учеб. пособие для студ. машиностроительных спец. / Н. Н. Попок. – Новополоцк : ПГУ, 2006. – 228 с.
ISBN 985-418-439-0

Изложена методика обучения и контроля знаний, представлены рабочая программа и основные разделы дисциплины «Теория резания». Приведены понятия и положения теории резания материалов, даны в кратком изложении их пояснения. Рассмотрены историческое развитие теории и практики резания; кинематика процесса резания; геометрические параметры режущего инструмента и заготовки; механика деформирования и стружкообразования; физические и химические явления процесса резания, связанные с теплообразованием, изнашиванием лезвия инструмента, формированием обработанной поверхности, а также комбинированные виды обработки и оптимизация функционирования системы резания.

Предназначено для студентов, магистрантов, аспирантов и специалистов в области машиностроения.

УДК 621.91.01(075.8)
ББК 34.63-1я73

ISBN 985-418-439-0

© Попок Н. Н., 2006
© УО «ПГУ», 2006

ПРЕДИСЛОВИЕ

Дисциплина «Теория резания» является одной из первых в цикле специальных, которыми начинается подготовка инженеров-механиков, и служит основой для изучения других специальных дисциплин. Без знания основных положений теории резания, физических и химических закономерностей процессов, происходящих при обработке резанием, невозможны грамотное конструирование режущих инструментов, приспособлений и станков, выбор режимов обработки, построение технологических процессов, техническое нормирование труда и расчет себестоимости получения изделий.

Преподавание дисциплины «Теория резания» базируется на ранее полученных студентами знаниях по естественнонаучным и общетехническим дисциплинам, таким как «Высшая математика», «Физика», «Сопротивление материалов», «Теоретическая механика», «Материаловедение», «Технология конструкционных материалов» и другим. «Теория резания» учитывает современное развитие фундаментальной науки, например, в областях теорий пластических деформаций, трения и изнашивания, самоорганизации и системологии, моделирования.

Курс лекций, лабораторные и практические занятия по дисциплине направлены на усвоение студентами терминов, определений и понятий, составляющих основу профессионального языка инженера-механика, привитие знаний по физическим и химическим закономерностям процесса резания, изнашивания режущего инструмента и формирования обработанной поверхности детали, а также на приобретение навыков и умений управления, оптимизации и интенсификации процесса резания, повышения надежности режущих инструментов.

Полученные студентами знания, умения и навыки по теории резания призваны способствовать осознанию ими основных проблем и необходимости дальнейшего развития машиностроения.

ВВЕДЕНИЕ

Машиностроение является ключевой отраслью промышленности, так как без использования его возможностей по изготовлению необходимых деталей, изделий, оборудования и т.п. не может обойтись ни одна другая отрасль. Ориентация отечественной промышленности на применение малооперационных, малоотходных и безотходных технологических процессов, на замену в отдельных случаях резания материалов более экономичными методами формообразования не исключают, однако, обработки резанием, которая является и на многие годы останется основным технологическим приемом изготовления деталей машин. Это связано, во-первых, с появлением новых материалов, трудноподдающихся обработке; во-вторых, с усложнением конструктивных форм деталей; в-третьих, с повышением требований к точности и качеству изготовления деталей; в четвертых, с возможностью гибкого управления обработкой резания в отличие от других методов. Например, современные способы литья и обработки давлением (прецизионная прокатка или штамповка, ротационная ковка и выдавливание, порошковая металлургия) обеспечивают 5...10-й качества точности и шероховатость поверхности $R_a = 80...5$ мкм. В сравнительно редких случаях достигаются 2...4 качества точности и шероховатость $R_a = 10...0,08$ мкм. Кроме того, потери металла по данным профессора Н.Н. Зорева составляют: при литье – 44 %, при обработке давлением – 40 %, при обработке резанием – 17 %. При этом, по сведениям профессора Г.М. Сахарова, производительность ($\text{см}^3/\text{ч}$) и энергозатраты ($\text{кВт}/\text{см}^3$) различных видов обработки материалов соответственно следующие: лезвийная – 14,0 и 3,0; абразивная – 8,0 и 30,0; электрохимическая – 1,0 и 500,0; электроэрозионная – 0,1 и 150,0; ультразвуковая – 0,005 и 150,0; лазерная – 0,0001 и 150000. Поэтому в настоящее время до 80 % заготовок деталей в машиностроении подвергается обработке резанием.

Современные тенденции развития машиностроения, связанные с автоматизацией производственных процессов, созданием гибких производственных систем и автоматизированных заводов требуют поиска новых подходов к исследованию процесса резания, основанных на достижениях фундаментальных наук, разработки новых видов обработки резанием, режущих инструментов и станков. Все это невозможно без знания и использования достижений науки о резании материалов.

1. МЕТОДИКА ОБУЧЕНИЯ И КОНТРОЛЯ УРОВНЯ ЗНАНИЙ, УМЕНИЙ И НАВЫКОВ

1.1. Общие положения

На кафедре металлорежущих станков и инструментов Полоцкого государственного университета в течение ряда лет реализуется методика обучения, которая нацелена на индивидуальную работу со студентами и комплексную (рейтинговую) оценку уровня полученных ими знаний.

Методика предусматривает выполнение следующих основных этапов обучения:

1. Посещение лекций и ведение конспекта с предоставлением его преподавателю на экзамене. Такое требование приучает студентов к внимательности и собранности на лекции, позволяет фиксировать новые (дополнительные к имеющимся учебно-методическим материалам) сведения по теории резания.

2. Самостоятельную подготовку студентов к лабораторным занятиям. Необходимо отметить, что содержание лабораторных работ соответствует разделам курса, и студент имеет возможность постепенно усваивать необходимую теоретическую информацию. До начала лабораторной работы студенты предоставляют отчет в виде краткого изложения теории по рассматриваемому вопросу, опрашиваются согласно перечню контрольных вопросов и при положительных ответах допускаются к выполнению лабораторной работы. При выполнении лабораторной работы студенты осваивают необходимые приемы на станке, проводят с использованием приборов и аппаратуры необходимые измерения, заполняют протоколы и обрабатывают экспериментальные данные. В конце лабораторных занятий студенты защищают лабораторную работу. Те студенты, которые не отчитались по лабораторной работе до начала следующей, не допускаются к выполнению очередной работы.

3. Выполнение научных исследований, написание научного реферата по одной из предлагаемых тем, участие в работе кафедрального научного кружка, выполнение практической работы по изготовлению на станках образцов, устройств, стендов к лабораторным работам.

Выполнение этих этапов обучения позволяет произвести рейтинговую оценку готовности студента к экзамену, которая складывается из оценки: 1) посещения лекций; 2) ведения конспекта лекций; 3) теоретической готовности к лабораторным работам; 4) своевременности оформления

отчетов по выполненным работам; 5) участия в научно-исследовательской работе кафедры.

Первые три оценки определяют уровень усвоения студентами теоретического курса (рейтинг R_T), четвертая оценка определяет полученные практические навыки (рейтинг $R_{пр}$), и пятая оценка характеризует активность и стремление студента к более глубокому познанию дисциплины (рейтинг $R_{акт}$). Таким образом, рейтинг по дисциплине «Теория резания» определяется по формуле:

$$R_d = R_T + R_{л.р} + R_{акт}$$

Оценка по каждой составляющей рейтинга выставляется по 10-балльной шкале. Знания по дисциплине считаются сформировавшимися при рейтинге по дисциплине более 19,5 баллов.

Оценка теоретических знаний студентов производится в соответствии с нижеприведенными контрольными вопросами, а их активность – участием в кафедральной научно-исследовательской работе.

1.2. Контрольные вопросы

Сформулировать определения следующих понятий теории резания:

1. Обработка резанием, кинематика процесса резания, геометрические параметры режущего инструмента и заготовки.

- 1.1. Резание
- 1.2. Теория резания
- 1.3. Система резания
- 1.4. Кинематика резания
- 1.5. Движение резания
- 1.6. Главное движение резания
- 1.7. Движение подачи
- 1.8. Касательное движение
- 1.9. Установочное движение
- 1.10. Скорость движения резания
- 1.11. Скорость главного движения резания
- 1.12. Скорость движения подачи
- 1.13. Подача на оборот
- 1.14. Подача минутная
- 1.15. Подача на зуб
- 1.16. Лезвийная обработка
- 1.17. Абразивная обработка
- 1.18. Точение

- 1.19. Обтачивание
- 1.20. Растачивание
- 1.21. Подрезание
- 1.22. Фасонное точение
- 1.23. Копировальное точение
- 1.24. Стругание
- 1.25. Долбление
- 1.26. Зубостругание
- 1.27. Зубодолбление
- 1.28. Осевая обработка
- 1.29. Сверление
- 1.30. Рассверливание
- 1.31. Центрование
- 1.32. Зенкерование
- 1.33. Развертывание
- 1.34. Зенкование
- 1.35. Цекование
- 1.36. Фрезерование
- 1.37. Периферийное фрезерование
- 1.38. Торцовое фрезерование
- 1.39. Круговое фрезерование
- 1.40. Охватывающее фрезерование
- 1.41. Зубофрезерование
- 1.42. Резьбофрезерование
- 1.43. Шлицефрезерование
- 1.44. Встречное фрезерование
- 1.45. Попутное фрезерование
- 1.46. Протягивание
- 1.47. Внутреннее протягивание
- 1.48. Наружное протягивание
- 1.49. Шевингование
- 1.50. Опиливание
- 1.51. Ротационная обработка
- 1.52. Свободное и несвободное резание
- 1.53. Непрерывное и прерывистое резание
- 1.54. Прямоугольное и косоугольное резание
- 1.55. Стационарное и нестационарное резание
- 1.56. Кинематическая схема резания

- 1.57. Одноэлементная кинематическая схема резания
- 1.58. Двухэлементная кинематическая схема резания
- 1.59. Трехэлементная кинематическая схема резания
- 1.60. Траектория резания
- 1.61. Поверхность резания
- 1.62. Поверхность главного движения резания
- 1.63. Основная плоскость
- 1.64. Плоскость резания
- 1.65. Главная секущая плоскость
- 1.66. Нормальная секущая плоскость
- 1.67. Рабочая плоскость
- 1.68. Инструментальная система координат
- 1.69. Статическая система координат
- 1.70. Кинематическая система координат
- 1.71. Обрабатываемая поверхность
- 1.72. Обработанная поверхность
- 1.73. Снимаемый слой
- 1.74. Припуск
- 1.75. Срезаемый слой
- 1.76. Сечение срезаемого слоя
- 1.77. Толщина срезаемого слоя
- 1.78. Ширина срезаемого слоя
- 1.79. Площадь срезаемого слоя
- 1.80. Номинальное сечение срезаемого слоя
- 1.81. Действительное сечение срезаемого слоя
- 1.82. Глубина резания
- 1.83. Режим резания
- 1.84. Режущий инструмент
- 1.85. Режущая часть инструмента
- 1.86. Корпусная часть инструмента
- 1.87. Крепежная часть инструмента
- 1.88. Лезвие инструмента
- 1.89. Передняя поверхность лезвия
- 1.90. Задняя поверхность лезвия
- 1.91. Режущая кромка
- 1.92. Главная режущая кромка
- 1.93. Вспомогательная режущая кромка
- 1.94. Главная задняя поверхность

- 1.95. Вспомогательная задняя поверхность
- 1.96. Вершина лезвия
- 1.97. Передний угол
- 1.98. Задний угол
- 1.99. Угол заострения
- 1.100. Угол резания
- 1.101. Угол в плане
- 1.102. Угол при вершине
- 1.103. Угол наклона режущей кромки

2. Инструментальные материалы

- 2.1. Твердость инструментального материала
- 2.2. Прочность инструментального материала
- 2.3. Износостойкость инструментального материала
- 2.4. Теплостойкость инструментального материала
- 2.5. Теплопроводность инструментального материала
- 2.6. Углеродистая инструментальная сталь
- 2.7. Легированная инструментальная сталь
- 2.8. Быстрорежущая сталь
- 2.9. Твердый сплав
- 2.10. Минералокерамика
- 2.11. Керметы
- 2.12. Сверхтвердый материал
- 2.13. Абразивный материал

3. Пластическая деформация, трение и контактные явления при резании

- 3.1. Стружкообразование
- 3.2. Стружка
- 3.3. Корень стружки
- 3.4. Сливная стружка
- 3.5. Элементная стружка
- 3.6. Стружка надлома
- 3.7. Поверхность сдвига
- 3.8. Плоскость сдвига
- 3.9. Зона первичной пластической деформации
- 3.10. Текстура стружки
- 3.11. Поперечная текстура стружки
- 3.12. Продольная текстура стружки

- 3.13. Застойная зона
- 3.14. Зона вторичной пластической деформации
- 3.15. Зона пластического контакта стружки
- 3.16. Зона упругого контакта стружки
- 3.17. Нарост
- 3.18. Передний угол нароста
- 3.19. Радиус нароста
- 3.20. Опорная длина нароста
- 3.21. Высота нароста
- 3.22. Периодичность нароста
- 3.23. Усадка стружки
- 3.24. Коэффициент утолщения стружки
- 3.25. Коэффициент укорочения стружки
- 3.26. Коэффициент уширения стружки
- 3.27. Абсолютный сдвиг
- 3.28. Относительный сдвиг
- 3.29. Коэффициент трения при резании
- 3.30. Нормальные контактные напряжения
- 3.31. Касательные контактные напряжения

4. Динамика резания

- 4.1. Контактные силы
- 4.2. Нормальная сила
- 4.3. Сила трения
- 4.4. Сила резания
- 4.5. Главная составляющая силы резания
- 4.6. Радиальная составляющая силы резания
- 4.7. Осевая составляющая силы резания
- 4.8. Динамометр
- 4.9. Упругая система динамометра
- 4.10. Система датчиков динамометра
- 4.11. Регистрирующая система динамометра
- 4.12. Усиливающая система динамометра
- 4.13. Работа резания
- 4.14. Мощность резания
- 4.15. Вибрации при резании
- 4.16. Вынужденные колебания
- 4.17. Автоколебания

5. Теплофизика резания

- 5.1. Тепло резания
- 5.2. Температура резания
- 5.3. Тепловой баланс процесса резания
- 5.4. Источник теплообразования
- 5.5. Потребители тепла
- 5.6. Температурное поле
- 5.7. Тепловые потоки
- 5.8. Контактная температура
- 5.9. Изотермы
- 5.10. Теплообразующие потоки
- 5.11. Теплообменные потоки
- 5.12. Термопара
- 5.13. Искусственная термопара
- 5.14. Полуискусственная термопара
- 5.15. Естественная термопара

6. Износ и изнашивание, стойкость и прочность режущих инструментов

- 6.1. Износ инструмента
- 6.2. Абразивное изнашивание инструмента
- 6.3. Адгезионное изнашивание инструмента
- 6.4. Диффузионное изнашивание инструмента
- 6.5. Надежность режущего инструмента
- 6.6. Критерий работоспособного состояния инструмента
- 6.7. Стойкость режущего инструмента
- 6.8. Период стойкости инструмента

7. Качество обработанной поверхности детали

- 7.1. Шероховатость поверхности
- 7.2. Волнистость поверхности
- 7.3. Наклеп
- 7.4. Остаточные напряжения
- 7.5. Макрогеометрия поверхности
- 7.6. Микрогеометрия поверхности

8. Функционирование системы резания
- 8.1. Структура системы резания
- 8.2. Автоматическое регулирование системы резания
- 8.3. Смазочно-охлаждающие средства
- 8.4. Смазочно-охлаждающие жидкости
- 8.5. Комбинированные виды обработки резанием
- 8.6. Обрабатываемость резанием
- 8.7. Планирование эксперимента
- 8.8. Расчет режима резания
- 8.9. Оптимизация режима резания

Дать ответ на вопрос:

1. Роль металлообработки в техническом прогрессе.
2. Теория резания материалов, ее назначение и роль в совершенствовании технологических процессов. Цели и задачи теории резания.
3. Историческое развитие теории и практики резания.
4. Резание как физический процесс. Общая схема и система резания.
5. Кинематика резания. Движение резания и составляющие его элементы. Количественные характеристики элементарных движений в процессе резания.
6. Общая классификация видов обработки резанием, их кинематические особенности, разновидности, назначение и область применения.
7. Строгально-долбежные виды обработки резанием, их кинематические особенности, разновидности, назначение и область применения.
8. Токарные виды обработки резанием, их кинематические особенности, разновидности, назначение и область применения.
9. Фрезерные виды обработки резанием, их кинематические особенности, разновидности, назначение и область применения.
10. Осевые виды обработки резанием (сверление, зенкерование, развертывание), их кинематические особенности, разновидности, назначение и область применения.
11. Протяжные виды обработки резанием, их кинематические особенности, разновидности, назначение и область применения.
12. Резьбонарезные виды обработки резанием, их кинематические особенности, разновидности, назначение и область применения.
13. Зуборезные виды обработки резанием, их кинематические особенности, разновидности, назначение и область применения.

14. Абразивные виды обработки резанием, их кинематические особенности, разновидности, назначение и область применения.

15. Кинематическая схема резания, ее определение, роль и применение. Основные правила изображения схемы. Классификация схем резания.

16. Одно- и двухэлементные кинематические схемы (изобразить основные схемы, объяснить движения, назвать виды обработки, определить назначение и применение).

17. Трехэлементные кинематические схемы (изобразить основные схемы, объяснить движения, назвать виды обработки, определить назначение и применение).

18. Траектория резания и траектория главного движения, их определение, роль в изучении процесса резания, классификация траекторий.

19. Поверхность резания и поверхность главного движения, их назначение и роль в изучении процесса резания (показать поверхности на примерах различных видов обработки).

20. Координатные системы: инструментальная, статическая и кинематическая. Их назначение и роль в изучении процесса резания. Плоскости координатных систем, их определение и расположение в различных видах обработки резанием.

21. Снимаемый слой и его размеры, припуск и глубина резания. Показать на примерах различия видов обработки резанием.

22. Срезаемый слой и сечение среза. Ширина и толщина среза. Площадь сечения срезаемого слоя. Показать на примерах различных видов обработки резанием.

23. Номинальное и действительное сечение среза. Показать на примерах различных видов обработки резанием.

24. Требования, предъявляемые к инструментальным материалам. Виды инструментальных материалов.

25. Углеродистые инструментальные стали, их состав, принцип маркирования, основные марки, свойства и применение.

26. Легированные инструментальные стали, их состав, принцип маркирования, основные марки, свойства и применение.

27. Быстрорежущие инструментальные стали, их состав, принцип маркирования, основные марки, свойства и применение.

28. Твердые сплавы, их состав, классификация, принцип маркирования, основные марки по группам, свойства и применение.

29. Минералокерамика и керметы, их состав, основные марки, свойства и применение.

30. Алмаз и его заменители (искусственный алмаз и сверхтвердые материалы), основные марки, свойства и применение.
31. Абразивные материалы, их виды, маркировка, свойства и применение.
32. Функциональные части режущего инструмента, элементы и углы лезвия (показать на примерах различных инструментов).
33. Изменение геометрии инструмента в процессе резания, основные причины изменения и характерные примеры их проявления.
34. Механика стружкообразования, ее объекты исследований, научное и практическое значение. Методы изучения в процессе стружкообразования.
35. Виды стружек при резании, влияние обрабатываемого и инструментального материалов, режима резания и геометрии инструмента на вид стружки. Этапы стружкообразования элементной и сливной стружки.
36. Деформированное состояние зоны резания: зона первичной деформации, плоскость и угол сдвига; зона вторичной деформации, застойная зона, поперечная и продольная текстура стружки.
37. Нарост при резании, сущность явления, динамика нароста, положительная и отрицательная роль нароста, влияние условий обработки на наростообразование.
38. Усадка стружки, коэффициенты усадки, зависимость усадки от переднего угла и прочих условий обработки.
39. Методы определения усадки стружки, весовой метод.
40. Относительный сдвиг, связь относительного сдвига с передним углом и углом скалывания и коэффициентом усадки стружки.
41. Напряженное состояние зоны резания.
42. Силы резания; контактные силы на поверхностях инструмента, сила сопротивления резания. Разложение силы сопротивления резания на составляющие, соотношения между ними.
43. Формулы для расчета силы резания через удельную силу резания.
44. Вывод формулы силы резания на базе теории пластического сжатия.
45. Вывод формулы силы резания исходя из условий равновесия резца.
46. Зависимость силы резания от условий обработки (элементов режима резания, геометрия инструмента).
47. Аппаратура для измерения силы резания (динамометры).
48. Вибрации при резании. Вынужденные колебания и автоколебания.
49. Теплообмен в телах. Основные виды теплообмена в технологических системах.

50. Тепло и температура резания. Определение общего тепла резания. Источники теплообразования при резании. Тепловой баланс при резании.
51. Температурное поле и контактные температуры.
52. Методы моделирования температурных полей.
53. Аналитический метод расчета температурного поля инструмента.
54. Тепловые потоки в зоне резания. Зависимость теплообменных потоков от времени.
55. Методы измерения температуры резания.
56. Температурные деформации станка, заготовки и инструмента.
57. Износ инструмента, виды изнашивания.
58. Механическое и абразивное изнашивание инструмента, зависимость износа от времени обработки.
59. Адгезионно-диффузионное изнашивание, его физическая сущность, зависимость от условий обработки.
60. Характер износа различных инструментов и объяснение причин.
61. Критерии износа режущих инструментов и их использование.
62. Стойкость инструмента, скорость резания, допускаемая стойкостью, связь стойкости инструмента с условиями обработки. Разрушение инструмента как результат образования и развития трещин.
63. Влияние на стойкость инструмента режима резания и геометрии лезвия.
64. Качество обработанной поверхности (шероховатость и физико-механические свойства), влияние на качество обработки технологических факторов и геометрии инструмента.
65. Шероховатость поверхностей детали при обработке острозаточенным резцом и резцом с радиусом вершины.
66. Регулирование системы резания путем воздействия на поверхностные явления смазочно-охлаждающими средствами (СОС). Основные разновидности СОС.
67. Способы подвода смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) в зону резания.
68. Комбинированные виды обработки резанием с дополнительным механическим, тепловым, электрическим и химическим воздействием.
69. Структура системы резания. Взаимосвязь явлений при обработке резанием.
70. Оптимизация функционирования системы резания. Обрабатываемость резанием. Классический эксперимент и метод планирования эксперимента.

71. Общий порядок расчета рационального режима резания, расчет подачи.

72. Расчет скорости резания, допускаемой стойкостью инструмента и мощностью на шпинделе станка.

73. Особенности расчета режима резания при многоинструментальной обработке и обработке на автоматических линиях и агрегатных станках.

74. Особенности резания при абразивной обработке.

75. Особенности обработки материалов со специфическими свойствами (жаропрочных и нержавеющей сталей и сплавов, чугунов, титановых, алюминиевых и медных сплавов, порошковых материалов и покрытий, полимерных материалов и пластмасс, углеграфитовых материалов).

1.3. Тематика научно-исследовательской работы студентов

Научные рефераты

1. Русские ученые – основоположники и создатели науки о резании материалов.

2. Прогрессивные кинематические схемы резания.

3. Кинематические особенности ротационного резания.

4. Особенности прерывистых видов обработки резанием.

5. Особенности обработки инструментом с износостойкими покрытиями.

6. Высоко- и сверхскоростное резание металлов.

7. Обзор финишных методов обработки резанием.

8. Шлифование – процесс микрорезания.

9. Комбинированные методы механической обработки, их технологические возможности.

10. Вибрационное резание материалов.

11. Применение ультразвуковых колебаний при резании материалов.

12. Обзор электрофизических и электрохимических методов обработки.

13. Энергетические методы интенсификации процесса резания.

14. Особенности обработки: нержавеющей сталей; титановых сплавов; электротехнических сталей; пластмасс; композиционных полимерных материалов; керамики; гранитов и синтегранитов; углеграфита.

15. Прогрессивные конструкции сборных инструментов: резцов, сверл, фрез, ротационных резцов.

16. Геометрические параметры ротационного инструмента.

17. Анализ способов и устройств для закрепления режущих лезвий в сборных инструментах.
18. Резцы для станков с программным управлением и автоматических линий.
19. Основные принципы построения САПР процесса резания.
20. Создание САПР инструментов.
21. Анализ способов и устройств для дробления стружки при резании.
22. Управление процессом резания на основе исследований стружкообразования.
23. Стружкообразование при ротационном точении.
24. Современные методы и аппаратура для исследования сил резания при высокоскоростных видах обработки.
25. Силы резания при ротационном точении.
26. Методы расчета напряжений в режущем инструменте.
27. Обзор теорий и формул для расчета силы резания.
28. Анализ способов и устройств для измерения температуры резания.
29. Метод источников тепла и его применение при исследовании тепловых явлений процесса резания.
30. Электрическое моделирование тепловых явлений при резании.
31. Температура резания при ротационной обработке.
32. Численный метод расчета температурных полей инструмента.
33. Устройства для исследований вибраций при резании материалов.
34. Вибрации при обработке лезвийным инструментом.
35. Современные теории изнашивания инструмента.
36. Особенности изнашивания инструмента при прерывистом резании.
37. Способы и устройства контроля износа инструмента в процессе резания.
38. Методы и устройства для испытаний надежности инструмента.
39. Виды поверхностного упрочнения инструмента.
40. Обзор исследований стойкости упрочненных инструментов.
41. Смазочно-охлаждающие средства при резании материалов.
42. Комплексное понятие качества поверхности детали при обработке резанием и факторы, влияющие на него.
43. Обзор современных видов инструментальных материалов: углеродистые стали; быстрорежущие стали; твердые сплавы; минералокерамика и керметы; сверхтвердые материалы; износостойкие покрытия.
44. Влияние элементов режима резания и геометрии инструмента на физико-механические характеристики процесса резания.

45. Взаимосвязь явлений при резании, система резания.
46. Применение методов планирования экспериментов при обработке материалов резанием.
47. Математические методы обработки экспериментальных данных при исследовании процесса резания.
48. Современные методы физического моделирования процесса резания.
49. Способы и устройства для обработки деталей с некруглым профилем.
50. Анализ способов и устройств для удаления стружки и пыли из зоны резания.
51. Способы и устройства внутреннего охлаждения инструмента.

Теоретические исследования

1. Создание абстрактно-логической, математической, физической и имитационной моделей процесса резания.
2. Разработка системы управления процессом резания.
3. Оптимизация процесса резания на основе оценки взаимосвязи явлений.
4. Разработка САПР процесса резания, режущих инструментов и станков.
5. Разработка методики исследований процесса резания с использованием ЭВМ.
6. Статистическая обработка результатов исследований с применением ЭВМ.
7. Расчет напряжений и температуры в инструменте.

Экспериментальные исследования и конструкторские разработки

1. Комплексное исследование различных видов резания:
 - стружкообразования и стружкодробления;
 - сил и температуры резания;
 - качества обработки;
 - износа инструмента;
 - взаимосвязи выходных характеристик.
2. Исследование пластинчатых термопар.
3. Сравнительные испытания резцов, сверл и фрез из различных инструментальных материалов при обработке труднообрабатываемых материалов.

4. Исследования надежности сборных конструкций инструмента.
5. Разработка стенда для испытаний вращающихся инструментов.
6. Разработка конструкций модульных инструментов.
7. Оптимизация кинематических и геометрических параметров процесса резания и инструмента с применением ЭВМ.
8. Исследование сил резания и износа инструментов с износостойкими покрытиями.
9. Исследование обрабатываемости резанием графитных изделий.
10. Разработка сборных конструкций инструмента для обработки графита.
11. Разработка конструкций установок для ротационного точения на станки моделей 16К20, 1М63, 1М65.
12. Модернизация оборудования для совмещенной обработки.

2. РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

Обучение дисциплине проводится в соответствии с рабочей программой и учебно-технологической картой.

2.1. Цели и задачи дисциплины, ее место в учебном процессе

Цель преподавания дисциплины

В связи с повышением требований к точности и качеству изделий, автоматизацией технологических процессов их изготовления, возрастает роль теории резания. Преподавание дисциплины «Теория резания» направлено на привитие студентам основ знаний о системе резания, о методах оптимизации ее функционирования, о путях управления системой резания, в том числе физическими процессами, об обеспечении надежности процесса резания и режущего инструмента.

Задачи изучения дисциплины

В соответствии с конечной целью науки о резании металлов – повышением производительности и качества обработки и снижением себестоимости выпуска продукции – студентам необходимо изучить:

- основные понятия, термины и определения теории резания материалов;
- физические основы процесса резания;
- свойства обработанной поверхности детали;
- работоспособность режущего инструмента;
- особенности абразивной и других видов обработки;
- применение смазочно-охлаждающих сред;
- вопросы оптимизации и управления процессом резания.

Перечень дисциплин с указанием разделов (тем), усвоение которых необходимо для изучения данной дисциплины:

Название дисциплины	Раздел темы
1. Высшая математика	Дифференциальные уравнения, теория вероятностей
2. Физика	Термодинамика, конвекция, теплоотдача. Взаимо-действие тел
3. Соппротивление материалов	Расчет на прочность, пластическая и упругая деформация
4. Начертательная геометрия	Описание поверхностей тел, сечения тел

5. Теоретическая механика	Кинематика и динамика тел
6. Теория механизмов и машин	Силы, трение и износ в механизмах и машинах
7. Материаловедение	Инструментальные материалы, термообработка
8. Технология конструкционных материалов	Основные понятия о механической обработке, станках и инструментах

2.2. Содержание дисциплины

Название тем, их содержание, объем в часах лекционных занятий

Название темы	Содержание	Кол-во часов
1	2	3
Введение	Основные тенденции развития машиностроения и механической обработки. Роль обработки резанием среди других видов формообразования деталей. Цели и задачи теории резания. Краткий исторический обзор развития теории и практики резания, тенденции совершенствования обработки материалов резанием.	2
Основные понятия, термины и определения теории резания материалов	Система и общая схема резания. Движение резания и его элементы. Основные виды обработки резанием, их краткая характеристика. Кинематическая схема резания. Поверхность резания и координатные системы. Геометрические элементы и поверхности заготовки: обрабатываемая и обработанная поверхности, снимаемый и срезаемый слой, сечение среза, его размеры, номинальное и действительное сечение среза при различных видах обработки резанием. Основные части и элементы режущего инструмента. Геометрические параметры режущего лезвия инструмента, их определение. Изменение углов лезвия инструмента.	6
Инструментальные материалы	Требования, предъявляемые к инструментальным материалам. Основные разновидности металлических и неметаллических инструментальных материалов, износостойкие покрытия, их характеристики, маркировка, область применения и направления их совершенствования.	2
Физические основы процесса резания	Механика стружкообразования. Методы изучения процесса пластической деформации и стружкообразования. Виды стружки. Образование сливной стружки. Дислокационный механизм стружкообразования. Зоны упругой и пластической деформации срезаемого слоя. Поверхности и плоскости скалывания или сдвига. Угол сдвига и текстура стружки. Зона вторичной деформации стружки.	4

	<p>Характеристики пластической деформации металла, степень деформации, относительный сдвиг. Влияние различных факторов процесса резания на коэффициенты укорочения, утолщения и уширения стружки, на относительный сдвиг. Управление стружкообразованием.</p> <p>Наростообразование при резании. Причины и механизм его образования. Влияние факторов процесса резания на наростообразование. Положительная и отрицательная роль нароста, методы управления наростообразованием.</p> <p>Контактные процессы при резании. Зоны упругого и пластического контакта инструмента со стружкой и заготовкой, нормальные и касательные напряжения по длине контактных зон. Коэффициент трения.</p>	
Динамика процесса резания	<p>Сила резания. Схема сил, действующих на контактные поверхности инструмента. Составляющие силы резания. Экспериментальные методы и приборы для определения силы резания. Теоретическое определение силы резания из условия равновесия резца и на базе теории пластического сжатия. Влияние условий обработки на составляющие силы резания. Работа и мощность резания.</p> <p>Колебания в процессе резания. Причины возникновения вынужденных колебаний и автоколебаний и их влияние на систему резания. Влияние различных факторов на амплитуду колебаний.</p>	6
Предварительные сведения о тепловых явлениях при резании. Основные виды теплообмена. Дифференциальное уравнение теплопроводности и его решение	<p>Источники тепла в зоне резания и баланс теплоты при резании. Методы определения температуры резания: экспериментальный, аналитический и метод моделирования. Температурное поле и тепловые потоки в системе резания. Влияние параметров обработки на температуру резания. Управление температурой при резании.</p>	6
Работоспособность и отказы режущего инструмента	<p>Работоспособное состояние инструмента, виды его отказов. Хрупкое разрушение инструмента, физическая природа абразивно-механического, адгезионного и диффузионного изнашивания. Характерные черты износа различных инструментов. Период стойкости инструмента, его зависимость от скорости и других факторов процесса резания. Критерии предельного состояния инструмента. Надежность инструмента и ее показатели. Влияние различных факторов процесса резания на износ и стойкость инструмента.</p>	4

Формирование свойств обрабатываемой детали в процессе резания	Физическая природа образования поверхностного слоя обработанной детали в условиях резания. Физико-механические характеристики обработанной поверхности детали: наклеп и остаточные напряжения. Формирование шероховатости поверхности при обработке острозаточенным резцом и резцом с радиусом при вершине. Влияние на качество обработки режима резания и геометрических параметров инструмента.	4
Абразивная обработка	Шлифование. Режущая способность абразивного инструмента. Съем материала при шлифовании. Прогрессивные высокопроизводительные процессы абразивной обработки: глубинное и скоростное шлифование и др.	2
Особенности обработки резанием различных материалов	Понятие обрабатываемости резанием как технологического свойства материала. Основные показатели обрабатываемости. Особенности обработки труднообрабатываемых материалов и сплавов, а также неметаллических и композиционных материалов. Пути улучшения обрабатываемости резанием.	2
Применение смазочно-охлаждающих средств, комбинированная обработка резанием	Смазочное, охлаждающее и моющее действие смазочно-охлаждающих средств (СОС). Виды смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ). Методы подачи СОЖ в зону резания. Комбинированные виды обработки резанием.	4
Особенности управления процессом резания в автоматизированном производстве	Процесс резания как взаимодействие элементов технологической системы. Надежность процесса резания и пути ее повышения в условиях автоматизированного производства. Автоматическое управление процессом резания.	6
Оптимизация процесса резания	Постановка задачи оптимизации, оптимизация одноцелевая и многоцелевая, детерминированная и стохастическая. Математическая модель оптимизации. Критерии оптимальности и технологические ограничения. Приближенное решение задачи оптимизации режима резания с использованием нормативов и расчетных зависимостей. Особенности расчета режима резания в автоматизированном производстве. Применение ЭВМ.	6

Лабораторные занятия, их наименование и объем в часах

Наименование	Объем в часах
Виды обработки резанием	4
Основные элементы и геометрические параметры режущих инструментов	4
Деформация срезаемого слоя	4
Стружкообразование и стружкодробление при обработке ротационным инструментом	4
Силы резания при точении	4
Силы резания при сверлении	2
Силы резания при фрезеровании	2
Температура резания	4
Влияние элементов режима резания и геометрических параметров лезвия на износ режущего инструмента	4
Определение рационального режима резания	4

2.3. Учебно-методические материалы

2.3.1. Литература

Основная

1. Ящерицын, П. И. Теория резания: учебник / П. И. Ящерицын, Е. Э. Фельдштейн, М. А. Корниевич. – Мн.: Новое знание, 2005. – 512 с.

2. Ящерицын, П. И., Еременко, М. Л., Фельдштейн, Е. Э. Теория резания. Физические и тепловые процессы в технологических системах: учеб. для вузов / П. И. Ящерицын, М. Л. Еременко, Е. Э. Фельдштейн. – Мн.: Выш. шк., 1990. – 512 с.

3. Бобров, В. Ф. Основы теории резания металлов / В. Ф. Бобров. – М.: Машиностроение, 1975. – 344 с.

4. Попок, Н. Н. Теория резания: конспект лекций для студентов машиностроительных специальностей. Ч. 1. / Н. Н. Попок. – Новополоцк: ПГУ, 1996. – 107 с.

5. Попок, Н. Н. Теория резания: конспект лекций для студентов машиностроительных специальностей. Ч. 2. / Н. Н. Попок. – Новополоцк: ПГУ, 2005. – 116 с.

6. Попок, Н. Н. Теория резания: учеб.-метод. комплекс для студ. машиностроительных специальностей / Н. Н. Попок. – Новополоцк: ПГУ, 2005. – 240 с.

Дополнительная

7. Подураев, В. Н. Технология физико-химических методов обработки / В. Н. Подураев. – М.: Машиностроение, 1985. – 264 с.
8. Старков, В. К. Обработка резанием. Управление стабильностью и качеством в автоматизированном производстве / В. К. Старков. – М.: Машиностроение, 1989. – 296 с.
9. Грановский, Г. И., Грановский В. Г. Резание металлов: учеб. для вузов / Г. И. Грановский, В. Г. Грановский. – М.: Высш. шк., 1985. – 304 с.
10. ГОСТ 25762-83. Обработка резанием.
11. ГОСТ 25761-83. Виды обработки резанием.
12. ГОСТ 25751-83. Инструменты режущие.
13. Попок, Н. Н. Комплексное моделирование и оптимизация обработки материалов резанием в гибком автоматизированном производстве / Н. Н. Попок. – Новополюцк: ПГУ, 1997. – 100 с.
14. Попок, Н. Н. Мобильная реорганизация машиностроительного производства / Н. Н. Попок.. – Мн.: УП «Технопринт», 2001. – 396 с.

2.3.2. Наглядные и другие пособия

1. Стенд обработки резцами.
2. Стенд обработки осевым инструментом.
3. Стенд обработки резьбонарезным инструментом.
4. Стенд обработки фрезами.
5. Стенд обработки зуборезным инструментом.
6. Макет токарной обработки.
7. Угломер настольный.
8. Угломер конструкции Бабченицера.
9. Угломер конструкции кафедры МРС и И.
10. Модель универсального угломера.
11. Угломер-отвес.
12. Приспособление для измерения передних и задних углов инструмента с криволинейными передней и задней поверхностями.
13. Микрометр.
14. Штангенциркуль.
15. Аппаратура УДМ.
16. Тарировочное устройство по силам резания.
17. Аппаратура для измерения температуры резания.
18. Устройство для тарирования термопар.

19. Инструментальный микроскоп БМИ-1.
20. Лупа Бринелля.
21. Металлорежущие станки модели 7Б35, 16К20, 1Б811, 3В642, 6М82, 5К32.

2.3.3. Плакаты (слайды)

1. Методы и способы обработки резанием.
2. Пространственные траектории.
3. Плоские траектории.
4. Кинематические схемы резания.
5. Координатные системы.
6. Координатные плоскости.
7. Элементы резца.
8. Углы лезвия.
9. Схемы измерения углов.
10. Графо-аналитический метод расчета углов в процессе резания.
11. Срезаемый слой и сечение среза.
12. Сечение срезаемого слоя при фрезеровании.
13. Условие равномерного фрезерования.
14. Типы стружек.
15. Усадка и сдвиг.
16. Деформация срезаемого слоя.
17. Схема динамометрической установки.
18. Схема динамометра.
19. Схема действия сил резания.
20. Схемы тарировки.
21. Схемы измерения температуры резания.
22. Схема измерения температуры резания естественной термопарой.
23. Температурное поле передней поверхности резца при точении стали ШХ15 резцом из твердого сплава Т14К8.
24. Геометрия токарных резцов.
25. Строгальные резцы.
26. Сверла.
27. Развертки.
28. Зенкеры.
29. Комбинированный режущий инструмент.

30. Конструктивные элементы и геометрические параметры фрез.
31. Конструктивные элементы и геометрические параметры резьбо-нарезного инструмента.
32. Типы протяжек для обработки отверстий.
33. Зуборезные долбяки.
34. Зуборезные фрезы.
35. Плоское шлифование периферией круга.
36. Плоское шлифование торцом круга.
37. Круглое наружное шлифование в центрах.
38. Круглое бесцентровое шлифование.

2.3.4. Методические указания к лабораторным работам

1. Попок, Н. Н. Иллюстративный материал к курсу лекций «Теория резания, тепловые процессы в технологических системах» для студентов специальности 1201 и 1202. Часть 1. Теория резания. Кинематика процесса, геометрические параметры инструмента и заготовки / Н. Н. Попок. – Новополюцк: НПИ, 1990. – 24 с.

2. Попок, Н. Н. Иллюстративный материал к курсу лекций «Теория резания, тепловые процессы в технологических системах» для студентов специальности 1201 и 1202. Часть 2. Инструментальные материалы. Пластическая деформация, трение и кинетика явления при резании. Динамика резания / Н. Н. Попок. – Новополюцк: НПИ, 1992. – 16 с.

3. Попок, Н. Н. Иллюстративный материал к курсу лекций «Теория резания, тепловые процессы в технологических системах» для студентов специальности 1201 и 1202. Часть 3. Тепловые процессы в технологических системах, теплофизика резания. Изнашивание, стойкость и прочность режущих инструментов. Качество обработанной поверхности детали / Н. Н. Попок. – Новополюцк: НПИ, 1993. – 16 с.

4. Попок, Н. Н. Иллюстративный материал к курсу лекций «Теория резания, тепловые процессы в технологических системах» для студентов специальности 1201 и 1202. Часть 4. Обработка резанием как система. Функционирование системы резания. Комбинированные виды механической обработки / Н. Н. Попок. – Новополюцк: НПИ, 1993. – 8 с.

5. Основные виды обработки резанием: метод. указания к учебно-исследовательской работе / Н. Н. Попок. – Новополюцк: НПИ, 1985. – 19 с.

6. Основные элементы и геометрические параметры режущих инструментов: метод. указания к учебно-исследовательской работе / Н. Н. Попок. – Новополоцк, НПИ, 1991. – 21 с.
7. Деформация срезаемого слоя: метод. указания к учебно-исследовательской работе / Н. Н. Попок. – Новополоцк, НПИ, 1992. – 8 с.
8. Стружкообразование и стружкодробление при обработке ротационным инструментом: метод. указания к учебно-исследовательской работе / В. А. Данилов, Н. Н. Попок. – Новополоцк: НПИ, 1984. – 16 с.
9. Силы резания: метод. указания к учебно-исследовательской работе / Н. Н. Попок. – Новополоцк: НПИ, 1993. – 12 с.
10. Температура резания: метод. указания к учебно-исследовательской работе / Ю. А. Новоселов. – Новополоцк: НПИ, 1977. – с. 44 – 51.
11. Влияние элементов режима резания и геометрических параметров лезвия на износ режущего инструмента: метод. указания к учебно-исследовательской работе / Н. Н. Попок. – Новополоцк: НПИ, 1987. – 12 с.
12. Задания на контрольные работы курса «Теория резания» для студентов-заочников специальности 0501: метод. указания к учебно-исследовательской работе / Н. Н. Попок. – Новополоцк: НПИ, 1984. – 11 с.
13. Арбузов, В. И., Мрочек, Ж. А., Попок, Н. Н., Хейфец, М. Л. Программно-информационное обеспечение автоматизации подготовки производства: учеб. пособие / В. И. Арбузов, Ж. А. Мрочек, Н. Н. Попок, М. Л. Хейфец. – Мн.: БГПА, 1998. – 77 с.

2.3.5. Формы протоколов по учебно-исследовательским лабораторным работам

Протокол исследования видов обработки резанием поверхностей детали

Эскиз обрабатываемых поверхностей детали	Результаты исследования										Примечание*	
	Схема обработки резанием	Кинематическая схема резания	Режимы резания				Срезаемого слоя			Параметры		
			t , мм	S , мм/об	n , мин ⁻¹	v , м/мин	a , мм	b , мм	l , мм	Шероховатости R_z , мкм		Квалитета точности, IT
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13

* Станок: модель –

Прибор измерительный: модель –

Заготовка: материал –

Резущий инструмент: тип –

Протокол измерения углов лезвия режущего инструмента

Наименование и обозначение углов	Значение углов, град		Примечание*
	Главных	Вспомогательных	
1. Передний угол, γ			
2. Задний угол, α			
3. Угол заострения, β			
4. Угол резания, δ			
5. Угол наклона режущей кромки, λ			
6. Угол в плане, φ			
7. Угол при вершине, ε			

* Режущий инструмент: тип –
 Прибор измерительный: модель –

Протокол исследования деформации срезаемого слоя

№ опыта	Серия опытов	Режимы резания				Диаметр заготовки d , мм	Параметры						Примечание*								
		t , мм	S , мм/об	n , мин ⁻¹	v , м/мин		Сечения среза			Стружки				Деформации							
							a , мм	b , мм	l , мм	a_1 , мм	b_1 , мм	l_1 , мм		k_a	k_b	k_l	ε				
1																					
2	$k_1, \varepsilon = f(t)$																				
3																					
4																					
5																					
6	$k_2, \varepsilon = f(S)$																				
7																					
8																					
9																					
10	$k_3, \varepsilon = f(v)$																				
11																					
12																					

* Станок: модель –
 Прибор измерительный: модель –
 Заготовка: материал –
 Режущий инструмент: тип – ; материал режущего лезвия – ; геометрия режущего лезвия –

Протокол исследования формы и усадки стружки при ротационном резании

№ опыта	Серия опытов	Режимы резания				Диаметр заготовки d , мм	Параметры						Форма стружки	Примечание*	
		t , мм	S , мм/об	v , м/мин	v_p/v		Сечения среза		Стружки		Деформации				
							a , мм	b , мм	l , мм	a_c , мм	b_c , мм	l_c , мм			k_a
1															
2	$k = f(t)$														
3															
4															
5															
6	$k = f(S)$														
7															
8															
9															
10	$k = f(v)$														
11															
12															

* Станок: модель –

Приспособление: тип –

Прибор измерительный: модель –

Заготовка: материал –

Режущий инструмент: тип – ; материал режущего лезвия – ; геометрия режущего лезвия – протокол исследования силы резания

Протокол исследования силы резания

№ опыта	Серия опытов	Режимы резания				Диаметр заготовки d, мм	Составляющие силы резания				Соотношения составляющих		Примечание*
		t, мм	S, мм/об	n, мин ⁻¹	v, м/мин		Осевая P _x		Тангенциальная P _z		P _x /P _z	P _y /P _z	
							Н	мV	Н	мV			
1													
2	P = f(t)												
3													
4													
5													
6	P = f(S)												
7													
8													
9													
10	P = f(v)												
11													
12													

* Станок: модель –

Прибор измерительный: модель –

Заготовка: материал –

Режущий инструмент: тип – ; материал режущего лезвия – ; геометрия режущего лезвия –

Протокол исследования температуры резания

№ опыта	Серия опытов	Режимы резания				Диаметр заготовки d, мм	Температура резания		Примечание*
		t, мм	S, мм/об	n, мин ⁻¹	v, м/мин		mA	θ°С	
1	θ = f(t)								
2									
3									
4									
5	θ = f(S)								
6									
7									
8									
9	θ = f(v)								
10									
11									
12									

* Станок: модель –
 Прибор измерительный: модель –
 Заготовка: материал –
 Режущий инструмент: тип – ; материал режущего лезвия – ; геометрия режущего лезвия –

Протокол исследования износа лезвия режущего инструмента

№ опыта	Уровни варьирования факторов			Результаты измерения износа h_p/h_z , мкм			Примечание*
	t , мм (γ, θ)	S , мм/об (α, θ)	v , м/мин (φ, θ)	Первое	Второе	Среднее	
1	-1	-1	-1				
2	-1	-1	+1				
3	-1	+1	-1				
4	-1	+1	+1				
5	+1	+1	+1				
6	+1	+1	-1				
7	+1	-1	-1				
8	+1	-1	+1				

* Станок: модель –

Прибор измерительный: модель –

Заготовка: материал –

Режущий инструмент: тип – ; материал режущего лезвия – ; геометрия режущего лезвия –

Протокол определения рационального режима резания

Таблица 1

Исходные данные

Характеристики и параметры заготовки и детали		Характеристики и параметры режущего инструмента																	
материал	длина	диаметр		шероховатость		Материал		Лезвие				Державка							
		D_3 , мм	D_d , мм	R_z , мкм	R_a , мкм	Лезвие	Державка	Длина	толщина	Угол в плане	Вспомогательный угол в плане	Радиус вершины	Длина	ширина	высота	Расстояние приложениия силы резания			
σ_B , кг/мм ²	l , мм	D_3 , мм	D_d , мм	R_z , мкм	R_a , мкм	$\sigma_{и1}$, кг/мм ²	$[F]$, мм	l_1 , мм	a , мм	ϕ_0	ϕ_1	r_b , мм	L , мм	B , мм	H , мм	l , мм			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

Продолжение табл. 1

Характеристики и параметры приспособления		Характеристики и параметры станка			
Коэффициент закрепления заготовки		Наименование и модель		Допускаемое усилие механизма подачи, Н	
В патроне	В патроне и центре				
$K_{п1}$	$K_{пц}$	$K_{ц}$		Мощность станка N , кВт	
21	22	23		24	
		25		26	

Продолжение табл. 1

Расчетные и справочные данные

Режим резания																									
Коэффициенты и показатели степени																									
Стойкость T, мин	Глубина резания t, мм	Подача						Скорость резания		Частота вращения		Данные паспорта станка													
		S ₁ , мм/об	S ₂ , мм/об	S ₃ , мм/об	S ₄ , мм/об	S ₅ , мм/об	S ₆ , мм/об	v ₁ , м/мин	v ₂ , м/мин	n ₁ , мин ⁻¹	n ₂ , мин ⁻¹	S ₀ , мм/об	n, мин ⁻¹												
27	C _{pz}	30	K _{pz}	31	K _{py}	32	K _{px}	33	K _{uz}	34	K _{uy}	35	K _{ux}	36	У _{pz}	37	У _{py}	38	У _{px}	39	C _u	40	Стойкость T, мин		
28	C _{py}	29	C _{px}	30	K _{pz}	31	K _{py}	32	K _{px}	33	K _{uz}	34	K _{uy}	35	K _{ux}	36	У _{pz}	37	У _{py}	38	У _{px}	39	C _u	40	Стойкость T, мин
29	C _{px}	30	K _{pz}	31	K _{py}	32	K _{px}	33	K _{uz}	34	K _{uy}	35	K _{ux}	36	У _{pz}	37	У _{py}	38	У _{px}	39	C _u	40	Стойкость T, мин	41	Глубина резания t, мм
30	K _{pz}	31	K _{py}	32	K _{px}	33	K _{uz}	34	K _{uy}	35	K _{ux}	36	У _{pz}	37	У _{py}	38	У _{px}	39	C _u	40	Стойкость T, мин	41	Глубина резания t, мм	42	S ₁ , мм/об
31	K _{py}	32	K _{px}	33	K _{uz}	34	K _{uy}	35	K _{ux}	36	У _{pz}	37	У _{py}	38	У _{px}	39	C _u	40	Стойкость T, мин	41	Глубина резания t, мм	42	S ₁ , мм/об	43	S ₂ , мм/об
32	K _{px}	33	K _{uz}	34	K _{uy}	35	K _{ux}	36	У _{pz}	37	У _{py}	38	У _{px}	39	C _u	40	Стойкость T, мин	41	Глубина резания t, мм	42	S ₁ , мм/об	43	S ₂ , мм/об	44	S ₃ , мм/об
33	K _{uz}	34	K _{uy}	35	K _{ux}	36	У _{pz}	37	У _{py}	38	У _{px}	39	C _u	40	Стойкость T, мин	41	Глубина резания t, мм	42	S ₁ , мм/об	43	S ₂ , мм/об	44	S ₃ , мм/об	45	S ₄ , мм/об
34	K _{uy}	35	K _{ux}	36	У _{pz}	37	У _{py}	38	У _{px}	39	C _u	40	Стойкость T, мин	41	Глубина резания t, мм	42	S ₁ , мм/об	43	S ₂ , мм/об	44	S ₃ , мм/об	45	S ₄ , мм/об	46	S ₅ , мм/об
35	K _{ux}	36	У _{pz}	37	У _{py}	38	У _{px}	39	C _u	40	Стойкость T, мин	41	Глубина резания t, мм	42	S ₁ , мм/об	43	S ₂ , мм/об	44	S ₃ , мм/об	45	S ₄ , мм/об	46	S ₅ , мм/об	47	S ₆ , мм/об
36	У _{pz}	37	У _{py}	38	У _{px}	39	C _u	40	Стойкость T, мин	41	Глубина резания t, мм	42	S ₁ , мм/об	43	S ₂ , мм/об	44	S ₃ , мм/об	45	S ₄ , мм/об	46	S ₅ , мм/об	47	S ₆ , мм/об	48	v ₁ , м/мин
37	У _{py}	38	У _{px}	39	C _u	40	Стойкость T, мин	41	Глубина резания t, мм	42	S ₁ , мм/об	43	S ₂ , мм/об	44	S ₃ , мм/об	45	S ₄ , мм/об	46	S ₅ , мм/об	47	S ₆ , мм/об	48	v ₁ , м/мин	49	v ₂ , м/мин
38	У _{px}	39	C _u	40	Стойкость T, мин	41	Глубина резания t, мм	42	S ₁ , мм/об	43	S ₂ , мм/об	44	S ₃ , мм/об	45	S ₄ , мм/об	46	S ₅ , мм/об	47	S ₆ , мм/об	48	v ₁ , м/мин	49	v ₂ , м/мин	50	n ₁ , мин ⁻¹
39	C _u	40	Стойкость T, мин	41	Глубина резания t, мм	42	S ₁ , мм/об	43	S ₂ , мм/об	44	S ₃ , мм/об	45	S ₄ , мм/об	46	S ₅ , мм/об	47	S ₆ , мм/об	48	v ₁ , м/мин	49	v ₂ , м/мин	50	n ₁ , мин ⁻¹	51	n ₂ , мин ⁻¹
40	Стойкость T, мин	41	Глубина резания t, мм	42	S ₁ , мм/об	43	S ₂ , мм/об	44	S ₃ , мм/об	45	S ₄ , мм/об	46	S ₅ , мм/об	47	S ₆ , мм/об	48	v ₁ , м/мин	49	v ₂ , м/мин	50	n ₁ , мин ⁻¹	51	n ₂ , мин ⁻¹	52	S ₀ , мм/об
41	Глубина резания t, мм	42	S ₁ , мм/об	43	S ₂ , мм/об	44	S ₃ , мм/об	45	S ₄ , мм/об	46	S ₅ , мм/об	47	S ₆ , мм/об	48	v ₁ , м/мин	49	v ₂ , м/мин	50	n ₁ , мин ⁻¹	51	n ₂ , мин ⁻¹	52	S ₀ , мм/об	53	n, мин ⁻¹

Продолжение табл. 1

Данные механической обработки заготовки

Шероховатость обработанной поверхности		Стойкость лезвия инструмента		Мощность резания	
R _z , мкм	R _a , мкм	T, мин	T, мин	N, кВт	N, кВт
54	55	56	56	57	57

2.3.6. Учебно-методическая карта

Номер недели	Номер темы	Название вопросов, выносимых на лекции	Лабораторные занятия	Номера наглядного пособия (Н), методического указания (М) и плаката (П)	Управляемая самостоятельная работа студентов		Формы контроля знаний	
					Содержание	Часы		
1	2	3	4	5	6	7	8	
1	1	Введение. О развитии машиностроения и станкостроения. Содержание курса. Цель и задачи науки о резании материалов. Общая схема резания. Движение резания и его элементы.		Н 1-6, 21; М 1,13	Развитие процессов резания металлов	2	Опрос при проведении лабораторных работ	
2	2	Основные виды обработки материалов резанием. Кинематические схемы резания. Геометрические элементы заготовки. Срезаемый слой и сечение среза при различных технологических операциях.	1	Н 1-6; М 1, 5; П 1-6, 11-13, 35-38				
3	3	Основные конструктивные элементы и геометрические параметры инструмента.	2	Н 7-12; М 1, 6; П 7-10, 24-34	Влияние геометрии инструмента на процесс резания.	4		
4	4	Инструментальные режущие материалы.	3, 4	М 2	Свойства инструментальных материалов			
5	5	Процесс стружкообразования при резании.	3, 4	Н 13, 14, 21; М 2, 8				Результаты НИРС
6	6	Основные этапы стружкообразования. Зоны распределения упругой и пластической деформации заготовки.	3, 4	Н 13, 14, 21; М 2, 7; П 14				

1	2	3	4	5	6	7	8
7	7	Усадка стружки. Относительный сдвиг.	3, 4	Н 13, 14, 21; М 2, 7; П 15, 16			
8	8	Застойная зона и нарост при резании.	3, 4	Н 19, 20; М 2			
9	9	Напряженное состояние зоны резания. Методы изучения напряженного состояния. Силы резания.	5	Н 15, 16, 21; М 2, 9; П 17-20			
10	10	Вывод формул для определения усилий резания на базе теорий пластического сжатия.		М 2, 9, 12	Расчетные формулы для определения сил при сверлении, фрезеровании и др. процессах резания. Методы обработки опытных данных.	4	
11	11	Теплота и температура резания. Методы определения температуры резания. Влияние условий обработки на тепловой баланс и температуру резания.	5	Н 17, 18, 21; М 3, 10; П 21-23	Эмпирические зависимости для расчета температуры резания.	4	
	12	Температурное поле в зоне резания. Аналитический способ определения температуры резания.		Н 17, 18; М 3; П 23	Аналитические зависимости для расчета температуры резания.	4	
12	13	Износ и стойкость инструмента.	7	Н 19, 20, 21; М 3, 11			
13	14	Критерии затупления и стойкость. Влияние различных факторов на износ и стойкость инструмента.		Н 19, 20; М 3, 11			
14	15	Качество обработанной детали.		Н 19-21; М 3			

1	2	3	4	5	6	7	8
15	16	Абразивная обработка.		М 1; П 35-38			
16	17	Применение СОС.		Н 21; М 4			
17	18	Комбинированные виды обработки резанием.		Н 21; М 4; П 29			
18	19	Оптимизация функционирования системы резания. Расчет режима резания.		М 4, 12			
	20	Особенности управления процессом резания.		М 12			
	21	Заключение.					

3. ОСНОВНЫЕ РАЗДЕЛЫ КУРСА

3.1. Теория резания как наука

3.1.1. Цели и задачи теории резания

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

Основными целями теории резания являются:

1. Повышение производительности процесса резания за счет применения прогрессивных видов обработки резанием, конструкций инструментов и станков, рациональных режимов резания, эффективных инструментальных материалов, охлаждающих средств и т.д.
2. Повышение точности и качества изделий, полученных путем обработки резанием.
3. Снижение себестоимости выпуска продукции за счет уменьшения расходов, связанных с процессом резания и инструментом.

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

- кинематики процесса резания;
- геометрии режущего инструмента;
- инструментальных материалов;
- деформации и стружкообразования при резании;
- сил и колебаний при резании;
- тепловых явлений, сопровождающих процесс резания;
- изнашивания режущих инструментов;
- точности и качества обработанной поверхности детали;
- особенностей обработки резанием материалов со специфическими свойствами;
- функционирования системы резания, ее оптимизации и управления.

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

3.1.2. Краткий исторический обзор развития теории и практики резания

Исследования основных вопросов теории резания и ее развития охватывают определенный *исторический период*. В этом периоде следует выделить даты, имена и достижения, которые способствовали созданию практических основ механической обработки. Это, прежде всего, 1100 г. – Теофилус Пресбатер (Германия): дал описание способов работы резцами, напильниками, шаберами и т.п.; 1500 г. – Леонардо да Винчи (Италия): предложил токарное устройство с маховиком, коленчатым валом, ходовым винтом и педальным приводом; 1578 г. – Жак Бессон (Франция): осуществил нарезание резьбы и точение овала по шаблону; 1769 г. – Джон Смит, Джон Уилксон (Англия): описали сверление цилиндрических отверстий; 1777 г. – Иоган Беккон (Германия): провел систематизацию технологических способов обработки; 1825 г. – Карл Кармаш (Германия): разработал основы механической технологии. Наблюдается постепенный переход от описательного к систематическому изложению механических технологий.

Первые исследования в области резания относятся к 1848 г. и принадлежат французу Кокилье, определившему полезное сопротивление, возникающее при сверлении кованого железа. В 1850 и 1864 гг. опыты Кокилье применительно к точению повторяют Кларинваль и Жоссель. Исследователи ограничивались только фиксацией полученных результатов, не вдаваясь в сущность явлений, их определяющих.

Наука о резании металлов зарождалась одновременно с комплексом смежных отраслей общего учения о металлах: открытие существования внутренних превращений стали при ее нагреве выше определенных температур (Д.К. Чернов – 1868 г.), экспериментальные исследования деформации металлов в пластической области (Н. Треска – 1868 г.), математическая теория пластичности (Сен-Венан – 1871 г.).

Впервые наиболее глубоко теоретически и экспериментально начал изучать процесс резания русский ученый, профессор Петербургского горного института И.А. Тиме (1868 – 1880 гг.). В своих научных трудах «Сопротивление металлов и дерева резанию» и «Мемуары о строгании металлов» он впервые:

1. Высказал мысль о *единстве закономерностей процесса резания* независимо от метода обработки металлов резанием (строгание, точение, резание на ножницах и др.).

2. Доказал, что *резание является последовательным скалыванием* отдельных элементов металла.

3. Установил понятие о *плоскости и угле скалывания* β_1 и доказал, что при снятии стружки основное деформирование металла имеет место в пределах указанного угла.

4. Установил явление *усадки стружки* и ввел понятие о *коэффициенте усадки*.

5. Ввел понятие о «коэффициенте резания» как силе резания, отнесенной к 1 мм^2 поперечного сечения срезаемого слоя (*удельная сила резания*).

6. Разработал *классификацию стружек* (сливная, суставчатая, надлома);

7. Вывел приближенное уравнение для расчета силы резания.

Следует отметить, что в то же время (1878 г.) французский профессор Н. Треска сравнивал образование стружки при резании с истечением твердого тела из сосуда под давлением.

В период 1889 – 1900 гг. в трудах русских ученых П.А. Афанасьева, А.В. Гадолина, К.А. Зворыкина и А.А. Брикса были исследованы основные вопросы динамики и механики процесса резания металлов. Профессор Санкт-Петербургского технологического института П.А. Афанасьев впервые предложил *схему сил резания с учетом сил трения*, действующих на грани инструмента, и привел *теоретическое доказательство положения* о том, что коэффициент трения при резании всегда значительно больше коэффициента трения поверхностей, не сопровождающихся их разрушением. Академик-генерал А.В. Гадолин уточняет формулу И.А. Тиме для расчета силы резания, введя в нее коэффициент трения между резцом и изделием. Профессор Харьковского технологического института К.А. Зворыкин в своем труде «Работа и усилие, необходимые для отделения металлических стружек» предложил следующее:

1. Систему сил и формулу для расчета силы резания.
2. Аналитическое выражение для определения угла скалывания.
3. Оригинальный гидравлический динамометр для измерения силы резания.

Профессор Михайловской артиллерийской академии А.А. Брикс в своем труде «Резание металлов (строгание)» уточнил схему стружкообразования и показал, что пластические сдвиги в срезаемом слое в каждый данный момент происходят не в какой-либо одной плоскости, а охватывают семейство плоскостей. Им получено математическое выражение для величины относительного сдвига.

Существенное влияние на развитие теории резания оказали исследования Фредерика Уинслоу Тейлора (США), который в своей работе «Ис-

кусство обработки металлов» (1900 г.) установил обрабатываемость материалов и определил стойкостные свойства режущих материалов.

Эти исследования завершают первый этап в развитии теории резания – этап механики деформирования срезаемого слоя и стружкообразования.

Применение для изготовления режущих инструментов быстрорежущих сталей позволило увеличить скорость резания, что существенно изменило условия обработки и вызвало необходимость изучения физики процесса резания металлов. Первые результаты в этом направлении были получены мастером-механиком Петербургского политехнического института Я.Г. Усачевым (1908 – 1917 гг.) и изложены в его труде «Явления, происходящие при резании металлов». Он впервые:

1. Исследовал тепловые явления при резании и использовал для этих целей специальные термодпары.
2. Применил металлографический анализ зоны резания.
3. Установил наличие плоскостей скольжения в деформированном металле.
4. Объяснил явление нароста: «Образование нароста на резце есть одно из условий приспособляемости природы к условиям, при которых процесс совершается с наименьшей затратой энергии».

Большой вклад в развитие науки о резании металлов в этот период внесли и другие русские ученые: инженер-механик из Москвы Н.В. Погоржельский (1907 г.), профессор Петербургского технологического института А.Д. Гатцук (1909 г.), профессор Томского технологического института Т.И. Тихонов (1913 г.), профессор Донского политехнического института (Новочеркасск) Б.Г. Соколов (1914 г.). Следует также отметить в этот период достижения зарубежных ученых, в частности Шлезингера, Герберта и Шверда (Германия), которые способствовали последующему развитию отечественной науки о резании металлов.

В период 1917 – 1935 гг. исследования в области обработки резанием носили более эмпирический характер. В это время большой вклад в развитие науки о резании металлов сделал профессор Петроградского военномеханического института А.Н. Челюсткин (1922 – 1925 гг.). В своем труде «Влияние размеров стружки на усилие резания металлов» он предложил формулу для расчета силы резания, выражающую зависимость силы резания от влияющих на нее факторов, в частности толщины и ширины срезаемого слоя. В это же время были предложены зависимости силы резания от площади срезаемого слоя немецкими учеными Клопштоком (1923 г.) и Кроненбергом (1927 г.).

Заслуживают внимания результаты оптического изучения деформации и напряжений в зоне резания Кирпичевым В.Л. (1913 г.) и Зайцевым А.К. (1927 г.), стружкообразования Розенбергом А.М. (1929 г.), термодинамическая теория резания металлов Сафронова Н.А. (1930 г.), исследование станков и инструментов, проведенные Игнатьевым А.М. (1934г.), Панкиным А.В., Кривоуховым В.А., Четвериковым С.С., Беспрозванным И.М., Грановским Г.И., Рудниковым С.С., изучение академиком Ребиндером П.А. (1928 г.) влияния смазочно-охлаждающих жидкостей на процесс резания, исследование качества обработки В.П. Линником (1931 г.) и физики процесса резания академиком Кузнецовым В.Д. (1932 г.), первые исследования лабораторией Оргметалла твердых сплавов типа «победит» (1930 г.), экспериментальные исследования силовых и стойкостных зависимостей комиссии по резанию металлов под представительством Е.П. Надеинской (1930 – 1935 гг.). В это и более позднее время в отечественной науке о резании металлов сформировались основные научные направления и школы:

1. Кинематики резания (основоположник Грановский Г.И.).
2. Механики стружкообразования (Зорев Н.Н.).
3. Динамики резания (Розенберг А.М.).
4. Теплофизики резания (Резников А.Н.).
5. Изнашивания инструмента (Лоладзе Т.Н.).
6. Охлаждения и смазки (Клушин М.И.).
7. Обрабатываемости (Резников Н.И.).
8. Качества обработки (Ящерицын П.И.).

По этим направлениям ведутся глубокие исследования, результаты которых отражены в трудах современных ученых: Коновалова Е.Г., Боброва В.Ф., Жаркова И.Г., Кабалдина Н.Г., Макарова А.Д., Петрухина С.С., Подураева В.И., Полетики М.Ф., Родина П.Р., Силина С.С., Старкова В.К., Талантова Н.В., Яковлева Г.М., Фельдштейна Э.И. и других ученых.

В ближайшее время следует ожидать получения новых результатов в области:

1. Физики процесса резания на основе термодинамических, дислокационных и системных представлений.
2. Создания новых видов обработки резанием путем комбинации различных поверхностных и энергетических воздействий.
3. Создания новых инструментальных материалов и, прежде всего, износостойких покрытий.
4. Совершенствования методов математического описания и оптимизации параметров процесса резания для его автоматизированного проектирования и управления.

3.2. Кинематика резания

3.2.1. Общая схема и система резания

Резанием называется обработка материала, заключающаяся в образовании новых поверхностей путем механического или какого-либо другого воздействия и последующего отделения части материала (стружки). Обработка резанием является по форме простой, так как для ее осуществления необходимы три основных компонента (рис. 3.1): режущий инструмент, заготовка и их относительное движение, а по содержанию – сложной, так как она зависит от большого количества величин, называемых параметрами резания.

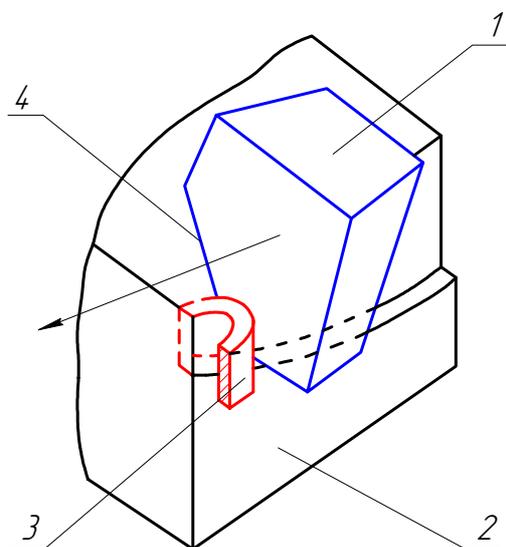


Рис. 3.1. Общая схема обработки резанием: 1 – режущий инструмент; 2 – заготовка; 3 – стружка; 4 – режущая кромка

К параметрам резания относятся: форма и размеры инструмента и заготовки, форма траектории резания, скорость относительного перемещения инструмента и заготовки, степень заглубления инструмента в заготовку, физические и химические характеристики обрабатываемого и инструментального материалов и другие. Эти параметры в процессе резания взаимодействуют и приводят к возникновению взаимосвязанных механических, электрических, тепловых, химических и других явлений, которые обуславливают отделение и формирование поверхностного слоя обрабатываемой заготовки, а также воздействие на инструмент. Поэтому обработку резанием можно представить как *систему* (рис. 3.2), включающую на «входе» параметры резания, которые определяют совокупность характери-

стик физических явлений в процессе резания («черный ящик»), и на «выходе» параметры обработанной поверхности детали и работоспособного состояния режущего инструмента. Функционирование системы и процесса резания определяется, прежде всего, кинематикой резания.

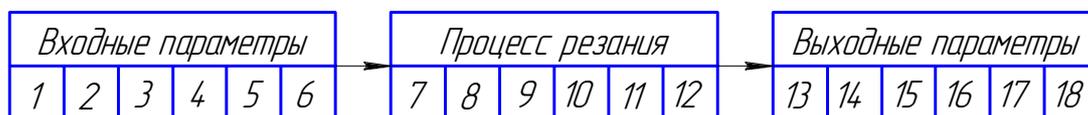


Рис. 3.2. Система резания: 1 – станок; 2 – приспособление; 3 – инструмент; 4 – заготовка; 5 – среда технологическая; 6 – режим резания; 7 – кинематика; 8 – упругие и пластические деформации; 9 – трение и разрушение; 10 – тепловые явления; 11 – химические явления; 12 – электромагнитные явления; 13 – точность обработки; 14 – качество поверхности; 15 – стойкость инструмента; 16 – прочность инструмента; 17 – производительность; 18 – экономичность

3.2.2. Движение резания и его элементы

Кинематика резания – это раздел теории резания, рассматривающий относительное движение инструмента и заготовки в процессе резания, его элементы, влияние этих элементов на процесс резания.

Движение резания – общее (результатирующее) относительное движение инструмента и заготовки в процессе резания. Оно может быть как простым, так и сложным. Сложное движение резания воспроизвести рабочим органом бывает затруднительно, поэтому его расчленяют на простые движения. Простейших движений в составе движения резания может быть несколько и их разделяют на главное движение D_r , движение подачи D_s и касательное движение D_k .

Главное движение – прямолинейное поступательное или вращательное движение режущего инструмента или заготовки, происходящее с наибольшей скоростью в процессе резания.

Движение подачи – прямолинейное поступательное или вращательное движение режущего инструмента или заготовки, скорость которого меньше скорости главного движения резания, предназначенное для того, чтобы распространить отделение слоя материала на всю обрабатываемую поверхность.

Касательное движение – движение режущего инструмента или заготовки, скорость которого меньше скорости главного движения и направлена по касательной к режущей кромке в рассматриваемой точке, предназначенное для того, чтобы сменять контактирующие с заготовкой участки ре-

жущей кромки. Примеры элементарных движений резания представлены на рис. 3.3 ... 3.7.

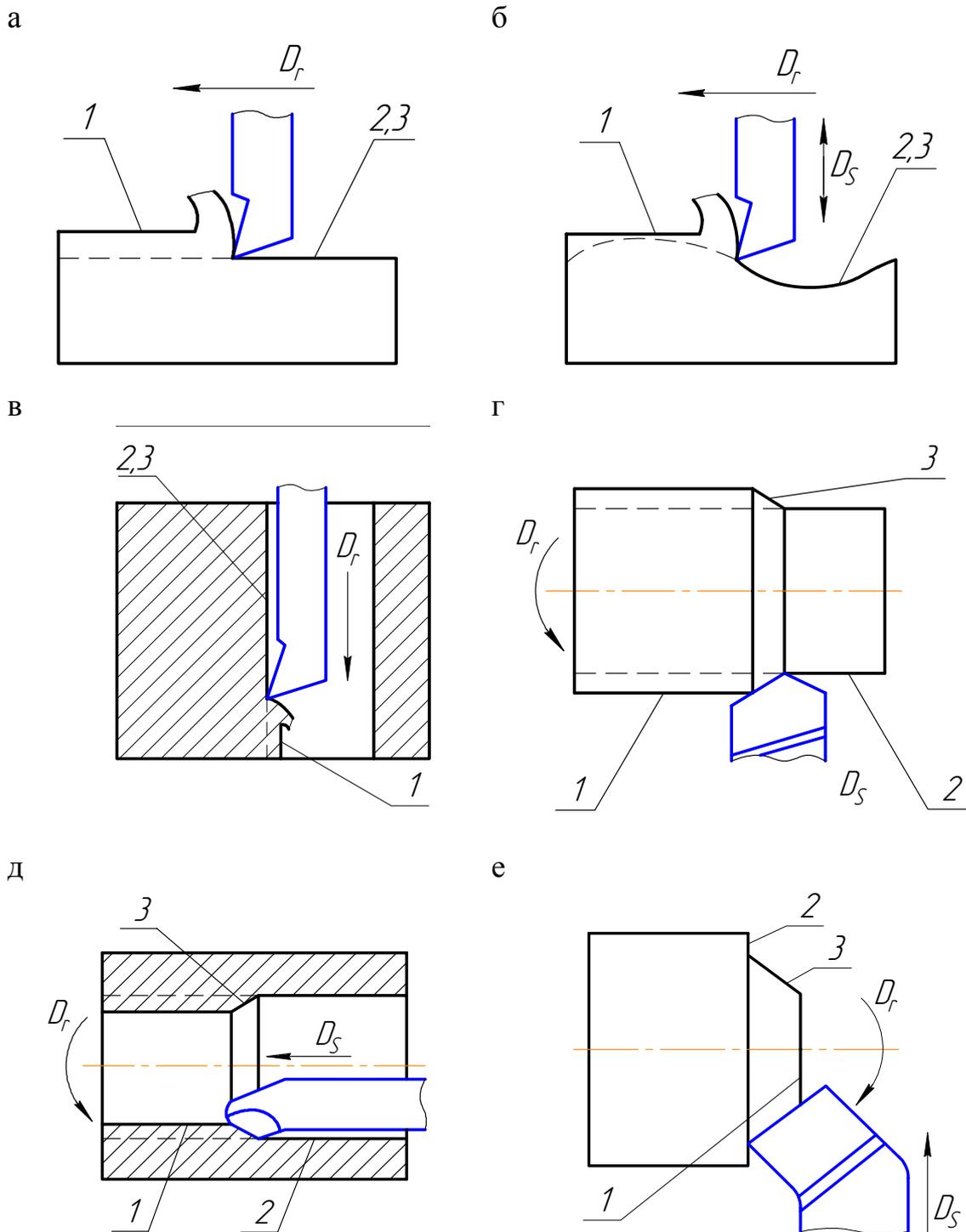


Рис. 3.3. Схемы видов лезвийной обработки:

а – строгание; б – строгание по копиру; в – долбление; г – обтачивание; д – растачивание; е – подрезание; 1 – обрабатываемая поверхность; 2 – обработанная поверхность; 3 – поверхность резания; D_r – главное движение; D_s – движение подачи

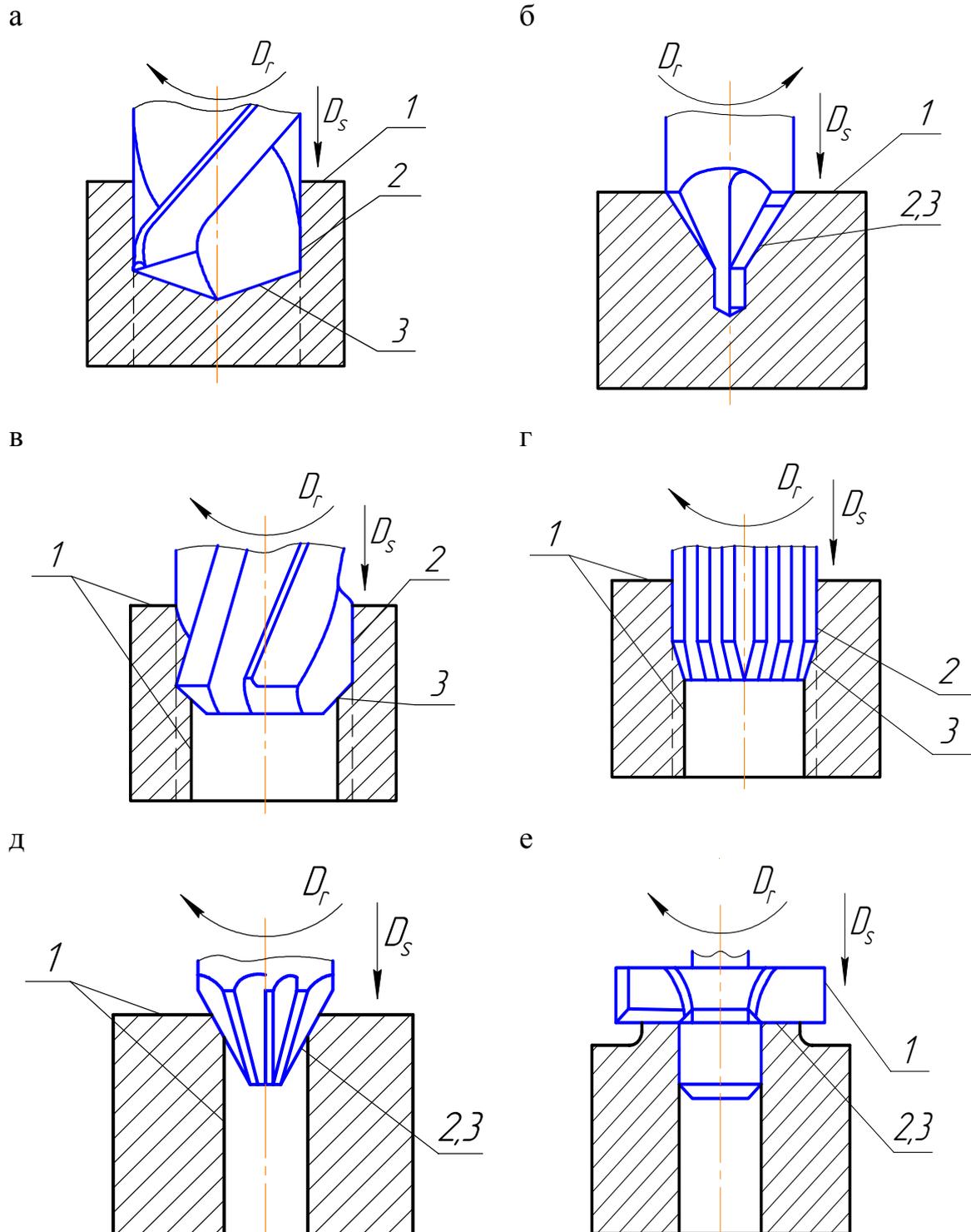
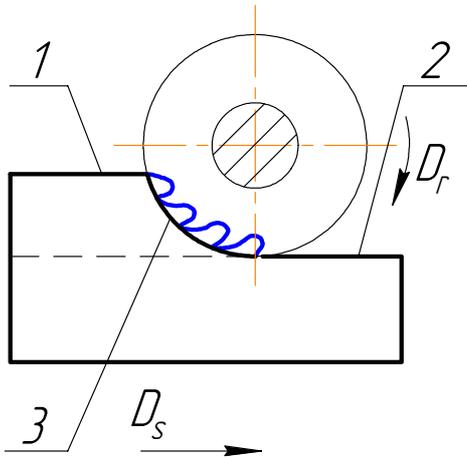
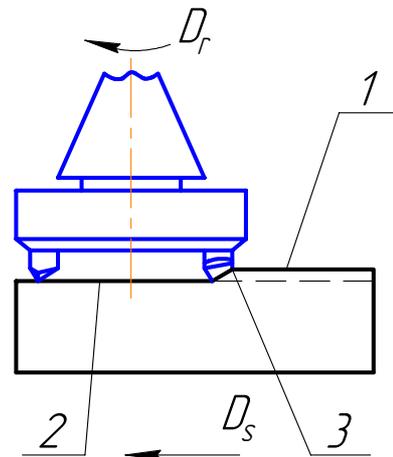


Рис. 3.4. Схемы видов лезвийной обработки:
 а – сверление; б – центрование; в – зенкерование;
 г – развертывание; д – зенкование; е – цекование;
 1, 2, 3, D_r , D_s – по рис. 3.3

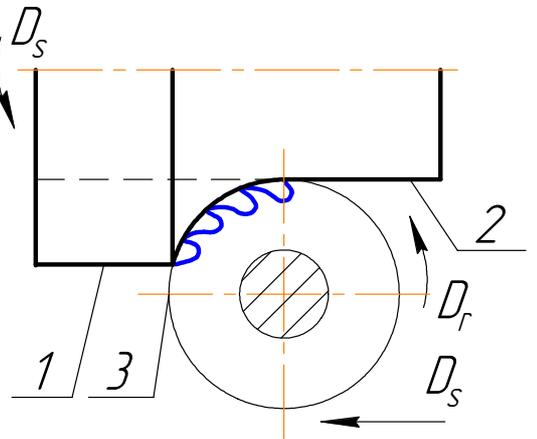
а



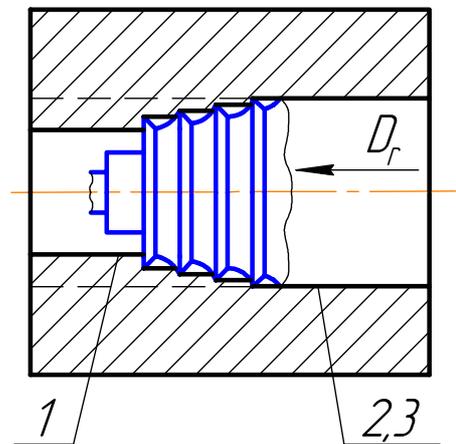
б



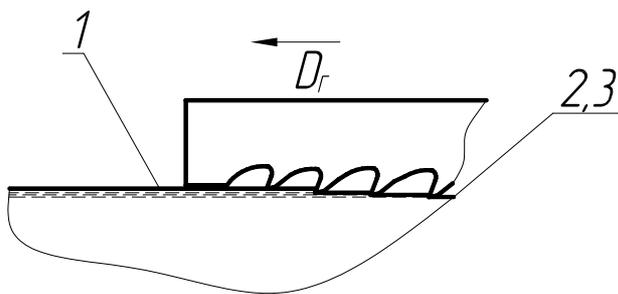
в



г



д



е

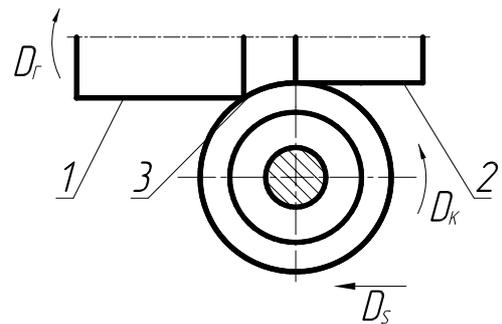


Рис. 3.5. Схемы видов лезвийной обработки:
 а – периферийное (цилиндрическое, дисковое и т. п.) фрезерование; б – торцовое фрезерование; в – круговое фрезерование; г – внутреннее протягивание; д – наружное протягивание; е – ротационное точение;
 1, 2, 3, D_r , D_s – по рис. 3.3; D_k – касательное движение

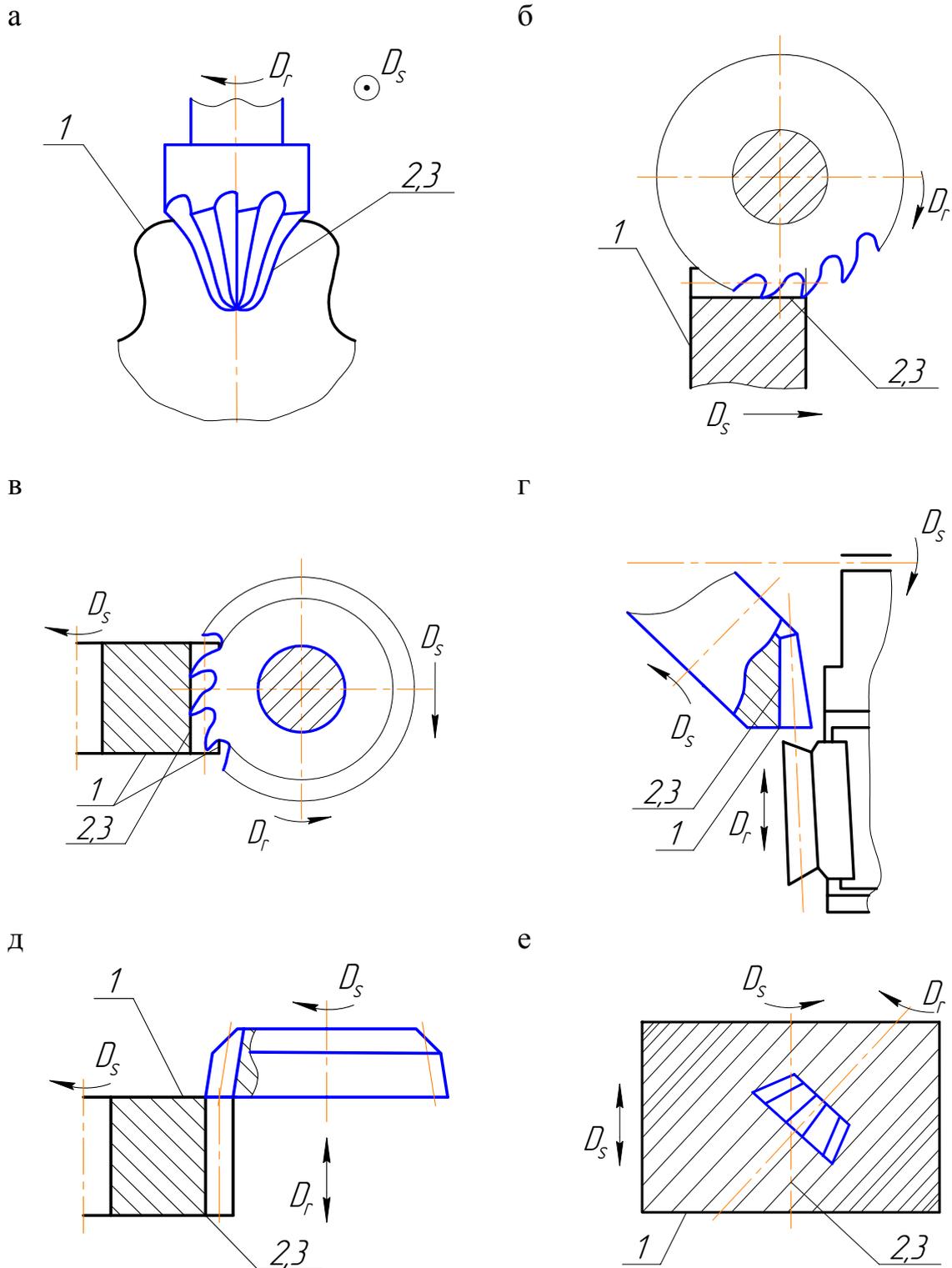


Рис. 3.6. Схемы зубонарезания:
 а – модульной пальцевой фрезой; б – модульной дисковой фрезой; в –
 зубофрезерование модульной червячной фрезой; г – зубострогание;
 д – зубодолбление; е – зуботочение долбяком;
 1, 2, 3, D_r , D_s – по рис. 3.3

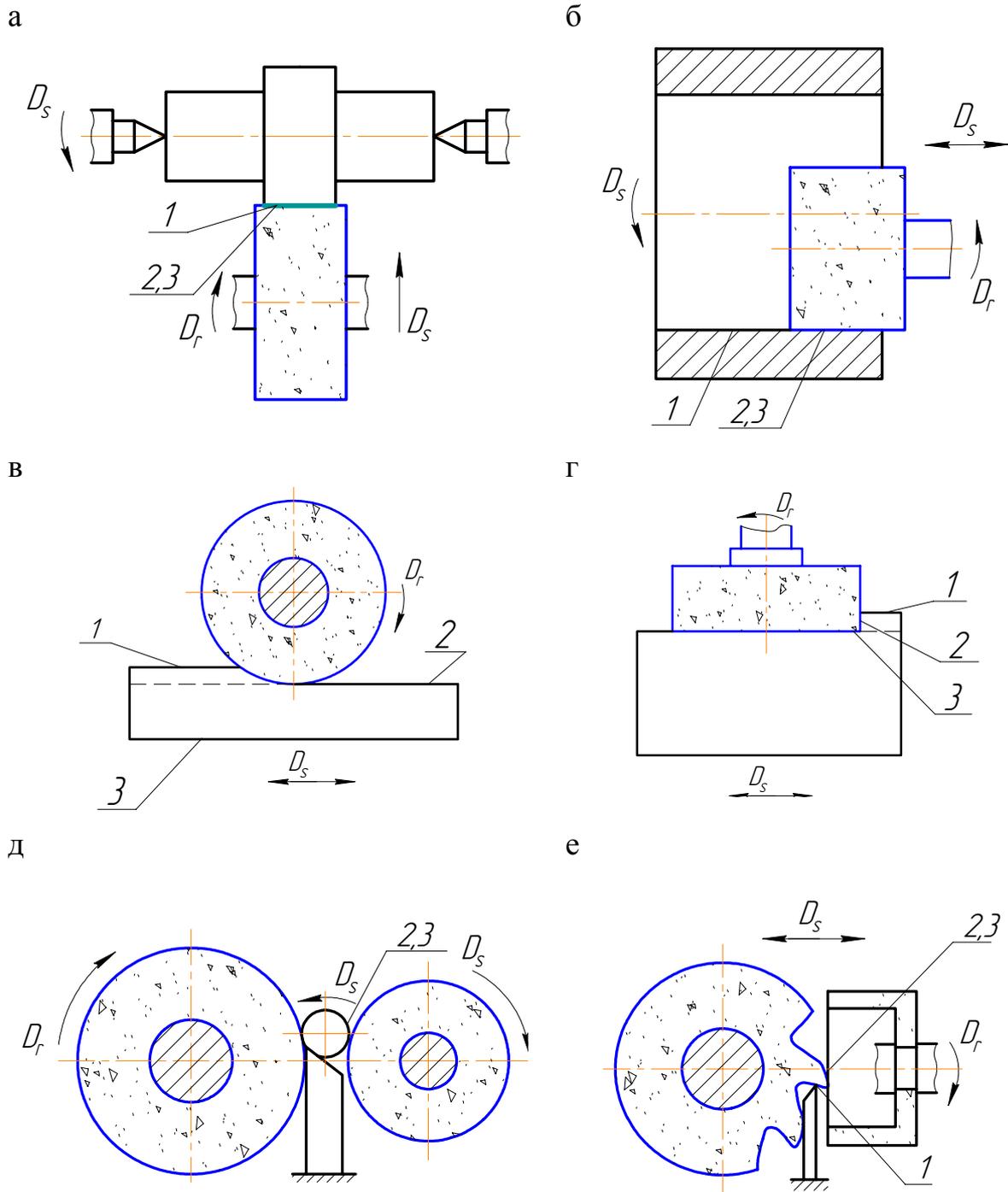


Рис. 3.7. Схемы абразивной обработки:
 а – круглое наружное шлифование; б – внутреннее шлифование;
 в и г – плоское шлифование соответственно периферией и торцом круга;
 д – бесцентровое шлифование; е – заточка лезвия фрезы;
 D_r , D_s – по рис. 3.3

Движение резания количественно характеризуется скоростью. *Скоростью резания* v называется скорость перемещения точек режущей кромки в движении резания. *Скорость главного движения* v_r – скорость перемещения инструмента или заготовки в главном движении.

Скорость резания v_r измеряется в м/мин или м/с, применяются также такие характеристики как частота вращения n , мин⁻¹ и число двойных ходов k , дв. х/мин:

$$v = \frac{\pi D n}{1000} = \frac{2 L k}{1000}, \quad (3.1)$$

где D – диаметр инструмента или заготовки;
 L – длина пути инструмента или заготовки.

Скорость движения подачи v_s – скорость перемещения инструмента или заготовки в движении подачи за каждый цикл главного движения или его часть. Различают подачу на один оборот главного движения S_o , мм/об или на один двойной ход S_x , мм/дв. х, подачу на один зуб S_z , мм/зуб, минутную подачу S_m , мм/мин. Математическая связь между этими подачами следующая:

$$S_m = S_o \cdot n = S_z \cdot Z \cdot n, \quad (3.2)$$

где Z – число зубьев инструмента.

Движение подачи не следует путать с установочным движением, предназначенным для установки инструмента в новое рабочее положение вне процесса резания.

Скорость касательного движения v_k – это скорость рассматриваемой точки режущей кромки или заготовки в касательном движении. Она не является режимной характеристикой и задается в виде соотношения v_k/v_r .

3.2.3. Основные виды обработки резанием, их краткая характеристика

Кинематика процесса резания реализуется в конкретных *видах обработки резанием*.

Вид лезвийной обработки определяется *кинематическими признаками*: видом и направлением главного движения резания, сообщением его инструменту или заготовке, видом и направлением движения подачи, а также касательного движения; *функциональными признаками*: формой получаемой поверхности резания и обработанной поверхности; *конструктивно-технологическими признаками*: конструкцией режущего инструмента и технологией его изготовления.

По конструктивно-технологическим признакам существующие виды обработки резанием подразделяются на лезвийную и абразивную обработку

Лезвийная обработка – обработка резанием, осуществляемая лезвийным инструментом; *абразивная обработка* – обработка абразивным инструментом, работающим по любой кинематической схеме резания.

По функциональным признакам выделяются следующие основные виды обработки резанием: *отрезание* – обработка резанием, заключающаяся в отделении заготовки в качестве части от целого вдоль одной ее стороны; *вырезание* – обработка резанием, заключающаяся в отделении заготовки в качестве части от целого вдоль двух или нескольких ее сторон; *разрезание* – обработка резанием, заключающаяся в разделении заготовки на части; *снятие фаски* – обработка резанием, заключающаяся в образовании фаски; *резьбонарезание* – обработка резанием, заключающаяся в образовании резьбы; *зубонарезание* – обработка резанием, заключающаяся в образовании зубьев; *зубозакругление* – обработка резанием концов зубьев вблизи торца зубчатого колеса, заключающаяся в придании им формы, облегчающей ввод колеса в зубчатое зацепление, *затылование* – обработка резанием, заключающаяся в образовании задних поверхностей затылованных зубьев.

По кинематическим признакам существующие виды лезвийной обработки резанием условно подразделяются на поступательные, токарные, осевые и фрезерные, а также протягивание, ротационное резание и другие.

К поступательным относятся следующие разновидности.

Строгание и долбление – обработка резанием осуществляемая однолезвийным инструментом с возвратно-поступательным главным движением резания (см. рис. 3.3, а, б, в). Строгание и долбление обычно применяются при обработке несложных профильных поверхностей с прямолинейными образующими, а также для обработки вертикальных и горизонтальных плоскостей в единичном и массовом производствах. Для этого процесса характерно действие на инструмент ударных нагрузок, небольшие скорости резания (1...1,5 м/с) и низкая производительность обработки вследствие инерционности движущихся частей станков и наличия холостого хода стола или инструмента.

Точение – лезвийная обработка с вращательным главным движением резания и возможностью изменения радиуса его траектории. Это наиболее универсальный и широкоприменяемый вид обработки резанием, позволяющий получать детали практически любой формы с высокой точностью и качеством. Разновидности точения: *обтачивание* – точение наружной

поверхности с движением подачи вдоль образующей линии обработанной поверхности (рис. 3.3, г); *расточивание* – точение внутренней поверхности с движением подачи вдоль образующей линии обработанной поверхности (рис. 3.3, д); *подрезание* – точение торцовой поверхности (рис. 3.3, е). При точении, как и при строгании и долблении, возможна обработка фасонным резцом и обработка по копиру (рис. 3.3, б).

Осевая обработка – лезвийная обработка с вращательным главным движением резания при постоянном радиусе его траектории и движении подачи только вдоль оси главного движения резания.

К разновидностям осевой обработки относятся следующие.

Сверление – осевая обработка сверлом (рис. 3.4, а, б). Сверление применяется для получения отверстий в сплошном материале, а также для рассверливания на больший диаметр уже имеющихся отверстий и получения центровочных отверстий. Сверлением обеспечивается 12...11-й качества точности и шероховатость обработанной поверхности $R_z = 80...20$ мкм. Процесс резания при сверлении во многом аналогичен точению, но имеет ряд особенностей, обусловленных: 1) переменностью переднего угла, принимающего малые и даже отрицательные значения у поперечной кромки, что приводит к повышению деформации срезаемого слоя, силы и температуры резания; 2) изменением скорости резания по длине главной режущей кромки, сказывающимся на изменении деформации в смежных элементах; 3) ухудшением отвода стружки и затруднением проникновения СОЖ в зону резания; 4) отсутствием задних углов на вспомогательных режущих кромках, что повышает силы трения.

Зенкование и цекование – осевая обработка соответственно зенковкой и цековкой (рис. 3.4, д, е).

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

Различают *периферийное* и *торцовое фрезерование* – фрезерование инструментом соответственно с периферийным и торцовым расположением лезвий (рис. 3.5, а, б). На практике используются: *круговое фрезерование* – фрезерование поверхности вращения (рис. 3.5, в); *охватывающее фрезерование* – фрезерование инструментом, зубья которого расположены на внутренней поверхности его корпуса.

В зависимости от направления векторов скоростей главного движения и подачи различают *попутное* и *встречное фрезерование*. Если векто-

ры скоростей главного движения резания и движения подачи в месте контакта инструмента с заготовкой направлены в одну сторону, то это *попутное фрезерование*, а если – в противоположные стороны, то – *встречное фрезерование*. Встречное и попутное фрезерование различаются целым рядом физических и технологических особенностей. Например, попутное фрезерование более спокойный процесс в смысле вибраций, более благоприятно с точки зрения действующих на заготовку сил и уменьшения температуры резания, а также устранения явления наклепа.

Фрезерование применяется при обработке плоскостей, пазов с прямолинейным и винтовым направлением, шлицев, тел вращения, разрезки заготовок, образования резьбы, а также для получения фасонных поверхностей. Фрезерованием обеспечивается 11...9 квалитеты точности и шероховатость обработанной поверхности с $R_z = 40 \dots 3.2$ мкм. К особенностям процесса фрезерования относятся: 1) периодически повторяющееся чередование рабочего и холостого циклов движения зуба фрезы; 2) переменность толщины срезаемого слоя и рабочей длины лезвия.

Зубонарезание может осуществляться по методу копирования и методу обката. При первом способе обработки профиль инструмента (рис. 3.6, а, б) определяется профилем впадины нарезаемого колеса. Нарезание зубчатых колес по методу обката производится червячными модульными фрезами, долбяками, строгальными резцами и другими инструментами, по определенной кинематической схеме (рис. 3.6, в ... е). Особенности зубонарезания: изменяется сечение срезаемого слоя за время обработки одним зубом; одновременно участвуют в резании несколько зубьев; различные участки лезвия неодинаково нагружаются из-за различного сечения среза и имеют различную скорость резания; не может быть обеспечена оптимальная геометрия лезвия из-за сложной формы режущей части и движений.

Протягивание – обработка многолезвийным инструментом с поступательным или вращательным главным движением резания, распространяемая на всю обрабатываемую поверхность без движения подачи (рис. 3.5, г, д). Производительность этого процесса в 5 ... 10 раз выше фрезерования и в 10 ... 15 раз – зенкерования и развертывания, несмотря на низкие скорости резания (до 0,2 ... 0,3 м/с). Применяется в массовом и серийном производствах при получении отверстий, обработке плоских и цилиндрических наружных поверхностей с точностью до 7 ... 9 квалитетов и шероховатостью $R_z = 6,3 \dots 0,8$ мкм. К особенности протягивания относится срезание припуска большим количеством зубьев.

Ротационное резание – обработка ротационным лезвийным инструментом, при котором главное движение сообщается заготовке, а инструменту – движение подачи и касательное движение (рис. 3.5, е).

К видам абразивной обработки относятся: круглое и внутреннее шлифование (рис. 3.7 а, б), плоское шлифование периферией и торцом круга (рис. 3.7, в, г), бесцентровое шлифование (рис. 3.7, д), резьбошлифование, зубошлифование, шлицешлифование, профильное шлифование, отрезное шлифование, заточка лезвия инструмента (рис. 3.7, е), ленточное шлифование, хонингование, суперфиниширование, доводка и притирка, полирование.

Шлифование – это процесс резания материалов, осуществляемый зернами абразивного, алмазного или эльборового материалов. Обеспечивает 9...6 качества точности и шероховатость обработанной поверхности $R_a = 0,63...0,04$ мкм. Особенности: многопроходность, высокие скорости резания (30 – 70 м/с), и температура резания.

Ленточное шлифование – обработка абразивными лентами. Абразивные ленты применяются для формообразования деталей при круглом, внутреннем и бесцентровом шлифовании, для обработки поверхностей деталей сложной формы, для обдирки, доводки и полировки.

Хонингование – обработка хонем (абразивными брусками), которому сообщают вращательное и возвратно-поступательное движение. При этом абразивные бруски имеют возможность перемещения в радиальном направлении.

Суперфиниширование – отделочная обработка поверхностей деталей мелкозернистыми абразивными брусками. Особенностью процесса является колебательное движение брусков с частотой 500...5000 дв.ход/мин и амплитудой 2...5 мм. Получают поверхность шероховатостью до $R_a = 0,16...0,08$ мкм с минимальной огранкой (0,5 мкм).

Доводка и притирка – отделочная обработка с помощью паст или суспензий, содержащих мелкозернистые абразивные порошки и смазку. Применяют для финишной обработки высокоточных плоских и фасонных поверхностей, отверстий малого диаметра, шариков для подшипников, деталей топливной аппаратуры и др. Достигается шероховатость поверхности $R_a = 0,16...0,01$ мкм и погрешность формы не более 0,5...0,1 мм.

Полирование – отделочная обработка эластичным инструментом поверхностей различной конфигурации, обеспечивающим их высокое качество без исправления погрешности формы. Достигается шероховатость поверхности $R_a = 0,02...0,16$ мкм.

Несмотря на многообразие видов обработки резанием все они могут быть сведены к сравнительно небольшому числу основных случаев работы лезвий инструмента:

1. По количеству рабочих участков режущих кромок, участвующих в резании (рис. 3.8, а, б) – *свободное резание*, если в работе участвует только одна прямолинейная режущая кромка и *несвободное резание*, если в работе участвуют две и более режущих кромок.

2. По ориентации режущей кромки относительно вектора скорости резания (рис. 3.8, в, г) – *прямоугольное резание*, если вектор скорости резания перпендикулярен режущей кромке, и *косоугольное резание*, если вектор скорости резания не перпендикулярен режущей кромке.

3. По количеству одновременно участвующих в работе лезвий – *однолезвийное* (см. рис. 3.3) и *многолезвийное* (см. рис. 3.4, 3.5 а – д, 3.6).

4. По протеканию процесса резания во времени – *непрерывное* (см. рис. 3.3, 3.4) и *прерывистое* резание (см. рис. 3.5 а, б, в, д, 3.6).

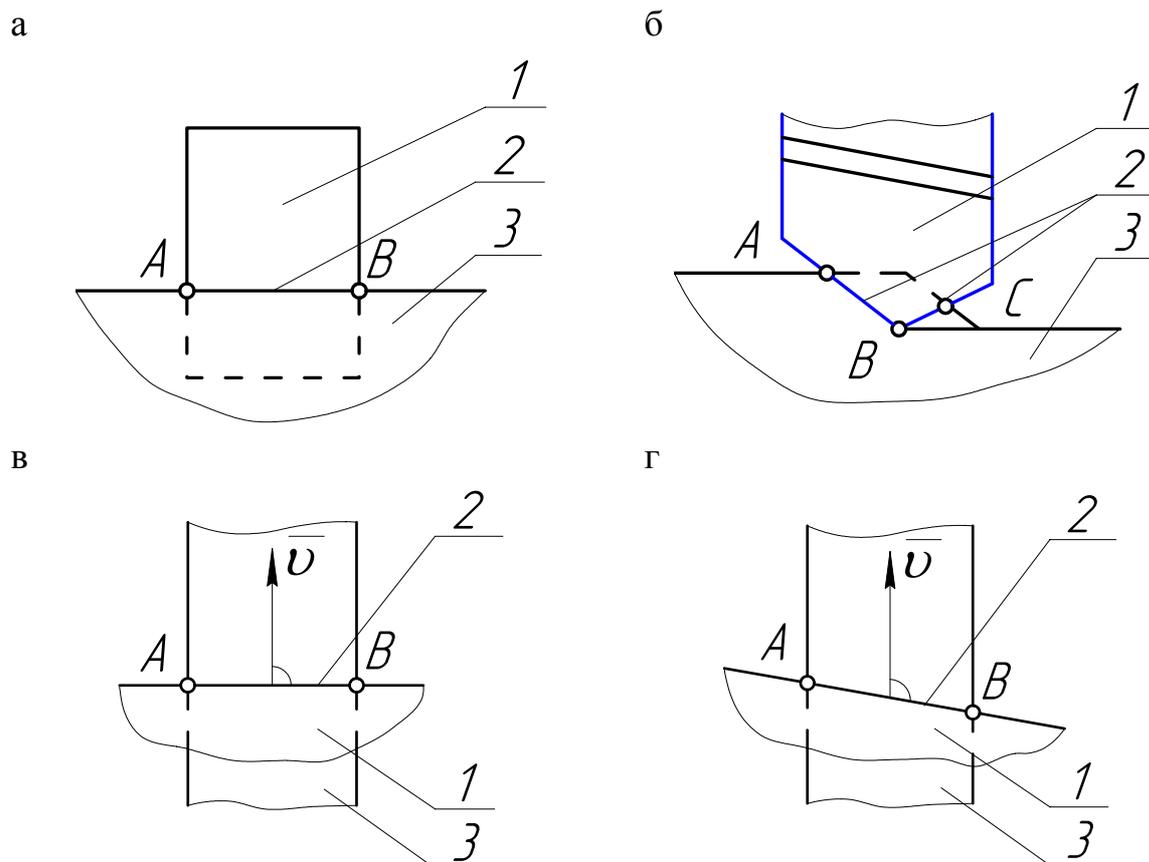


Рис. 3.8. Основные случаи работы режущего лезвия инструмента:
а и б – свободное и несвободное резание; в и г – прямоугольное и косоугольное резание; 1 – лезвие инструмента; 2 – режущая кромка; 3 – заготовка

5. По форме сечения срезаемого слоя – с *постоянным* (см. рис. 3.3, 3.4) и *переменным* (см. рис. 3.5, 3.6) сечениями.

Каждый из видов обработки резанием характеризуется конкретной кинематической схемой резания.

3.2.4. Кинематические схемы и траектории резания

Кинематической схемой резания называется условное графическое изображение количества, вида и взаимного расположения всех элементарных движений резания. Условимся изображать кинематическую схему в определенной системе координат XYZ. Ось OX этой системы направлена вдоль оси главного вращательного движения, ось OY – по радиусу главного вращательного движения, ось OZ – по направлению вектора скорости главного движения. Эта координатная система общая для всех видов резания. Классификация кинематических схем резания предложена впервые профессором Г.И. Грановским и включает восемь групп, основывающихся на сочетании прямолинейного и вращательного движений: I – одно прямолинейное движение; II – два прямолинейных движения; III – одно вращательное движение; IV – одно вращательное и одно прямолинейное движения; V – два вращательных движения; VI – два прямолинейных и одно вращательное движения; VII – два вращательных и одно прямолинейное движения; VIII – три вращательных движения.

Кинематические схемы по числу элементарных движений можно разделить на одноэлементные (рис. 3.9, а, б); двухэлементные (рис. 3.9, в, и); трехэлементные (рис. 3.10, а ... е); четырехэлементные и т.д. Схемы из четырех и более сочетаний движений в настоящее время используются редко. На практике широкое применение получили лишь два-три десятка кинематических схем резания.

Как видно из рассматриваемых схем, точки режущих кромок инструмента находятся в сложном относительном движении и описывают сложные траектории резания.

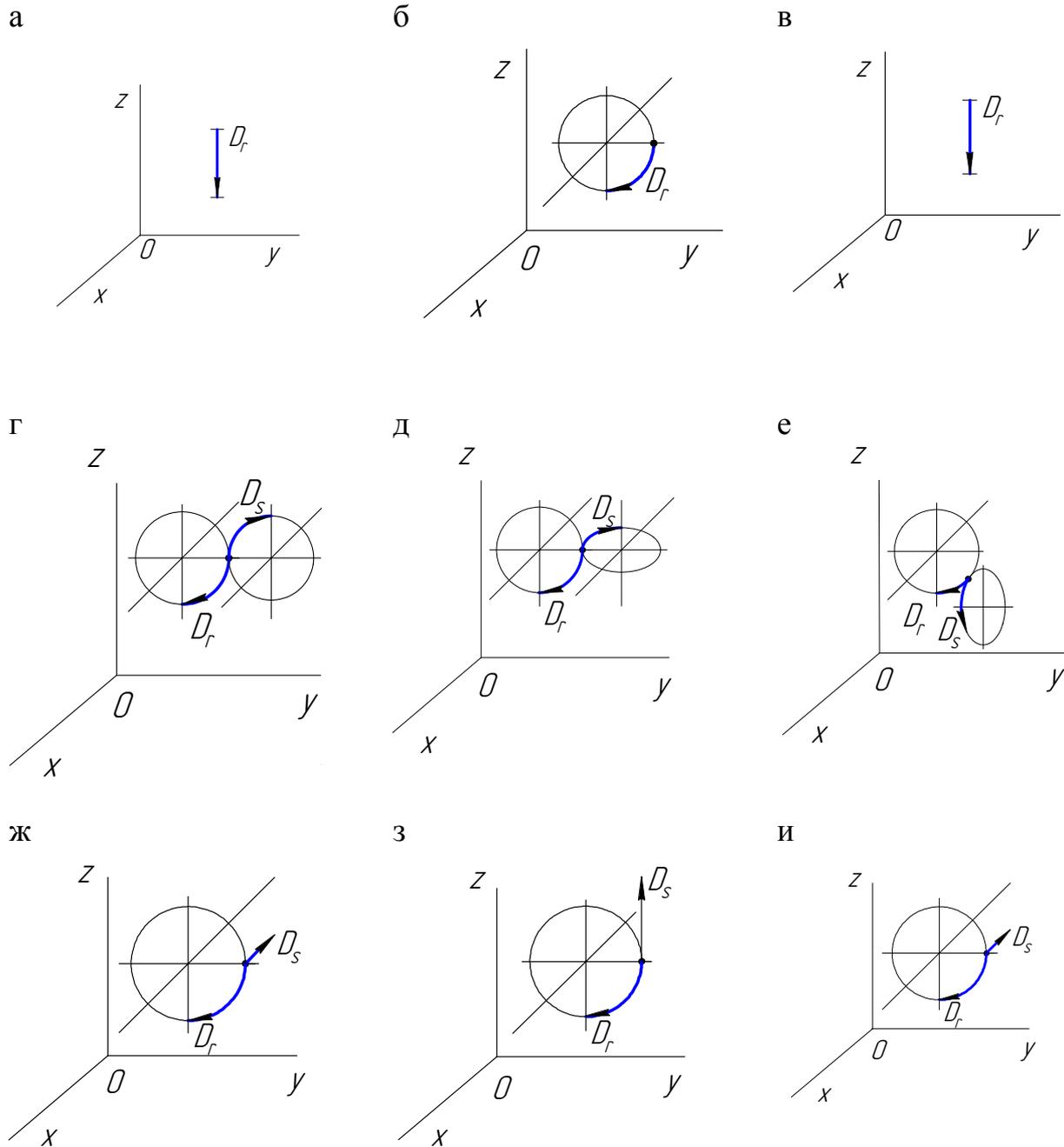


Рис. 3.9. Одно- и двухэлементные кинематические схемы резания:
а – строгание, долбление, протягивание; б – круговое протягивание с остановленной деталью; в – строгание или долбление по копиру; г – круговое фрезерование, круглое шлифование; д – зубофрезерование червячной фрезой; е – круговое фрезерование, шлифование торцом чашечного круга; ж – обтачивание, осевая обработка, резбонарезание, хонингование; з – плоское шлифование, фрезерование; и – отрезание, подрезание, фрезерование, зубофрезерование модульной фрезой

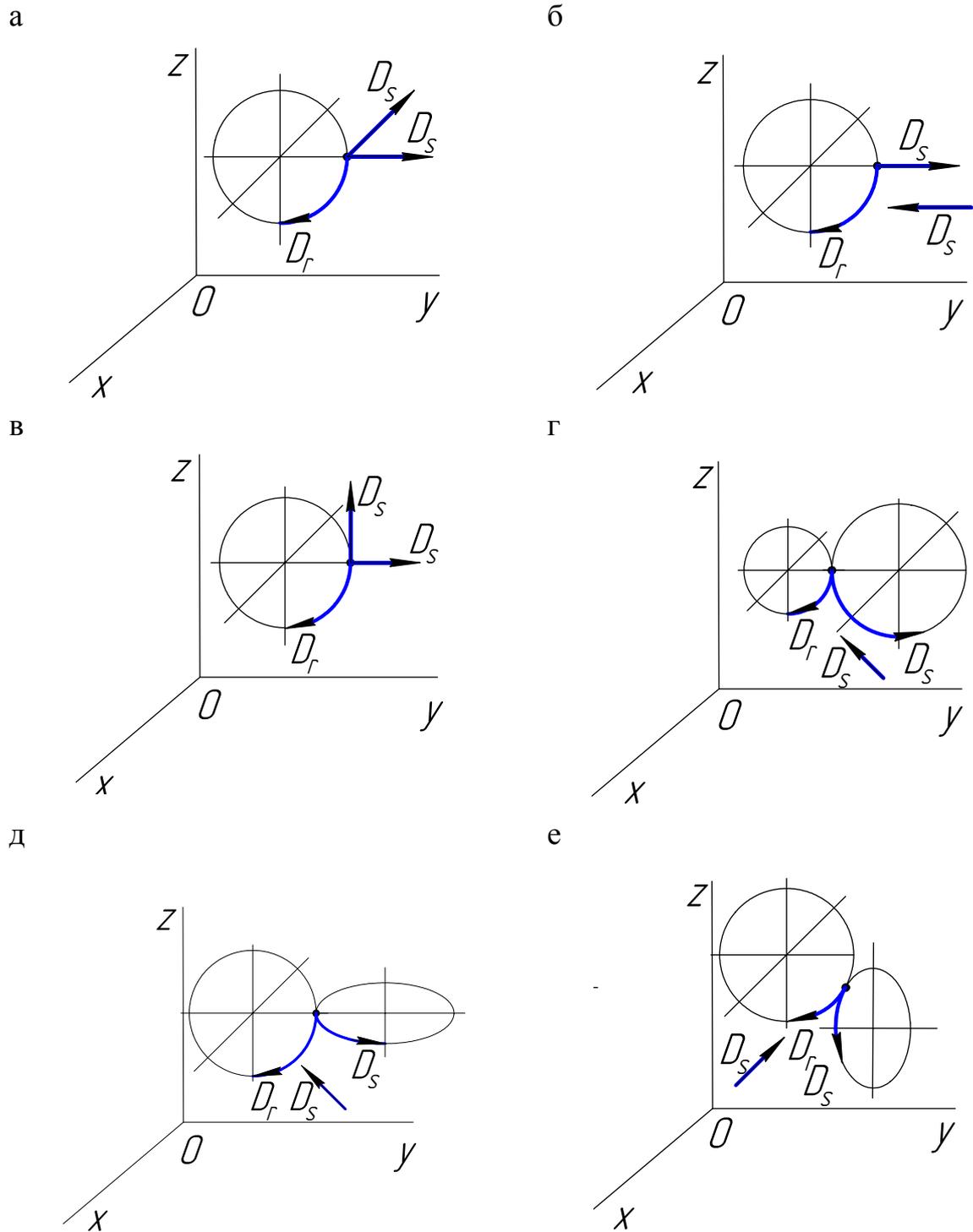


Рис. 3.10. Трехэлементные кинематические схемы резания:
а – обтачивание конуса, затылование червячных фрез, копировальное фрезерование;
б – затылование круговых протяжек; в – копировальное фрезерование; г – круговое фрезерование, вихревое резбонарезание, круглое шлифование; д – зубофрезерование червячной фрезой, ротационное точение; е – ротационное точение, шлифование торцом круга

Траекторией резания называется кривая, описываемая точкой режущей кромки в движении резания. Форма траектории зависит от кинематической схемы резания и может быть самой разнообразной. Каждая сложная траектория может быть представлена как сочетание простейших кривых: прямой линии, окружности, винтовой линии, архимедовой спирали, циклоиды. Все траектории можно подразделить на плоские (рис. 3.11, а ... д) и пространственные (рис. 3.11, е), а в зависимости от количества элементарных движений – на одно- (рис. 3.11, а, б), двух- (рис. 3.11, в ... д) и трех-элементные (рис. 3.11, г). Следует отметить, что во многих случаях формы траекторий можно упростить. Например, при обтачивании из-за малой скорости движения подачи отличие формы одного витка винтовой траектории движения резания от окружности в главном движении мало и можно рассматривать вместо винтовой кривой дугу окружности.

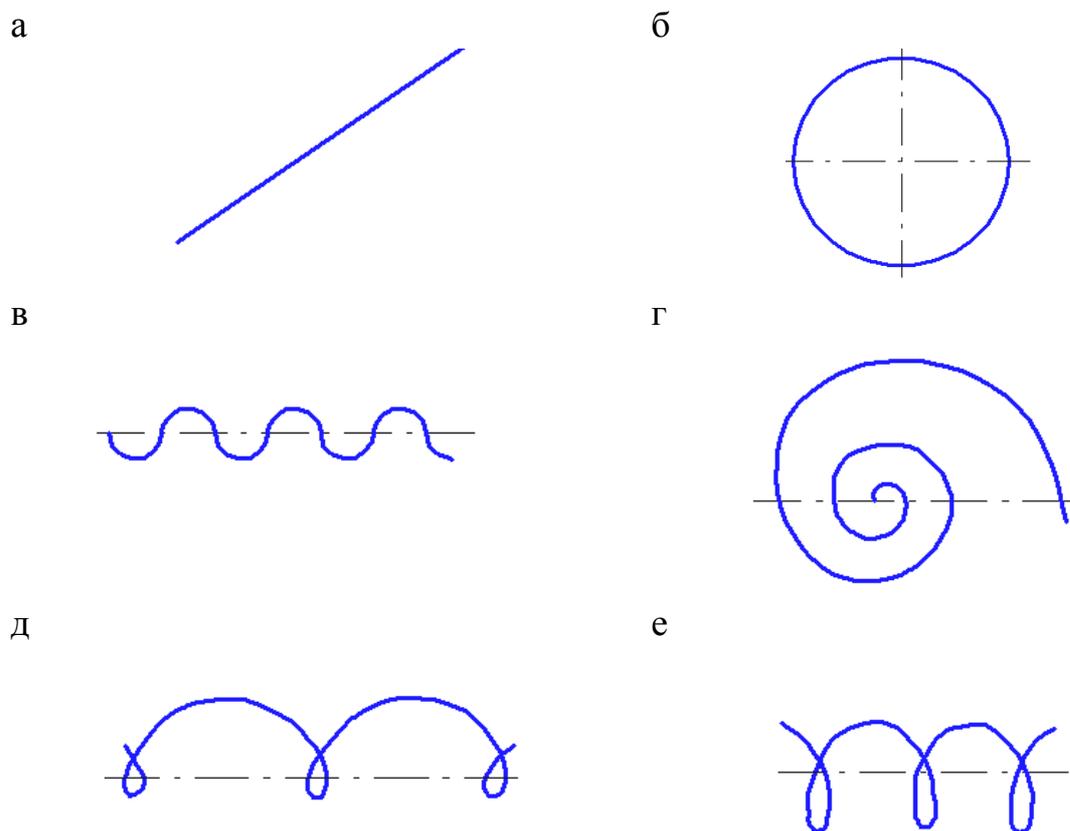


Рис. 3.11. Примеры траекторий резания:

- а – прямая при долблении, строгании, протягивании; б – окружность при круговом протягивании с остановленной деталью; в – кривая линия при строгании по копиру; г – спираль Архимеда при отрезании, подрезании; д – циклоида при фрезеровании; е – винтовая линия при точении, осевой обработке, хонинговании, протягивании винтовых пазов

3.2.5. Поверхность резания и координатные системы

Представим (рис. 3.12), что произвольная по форме режущая кромка инструмента 1 находится в сложном движении резания и по траектории 2 описывает в пространстве поверхность резания 3.

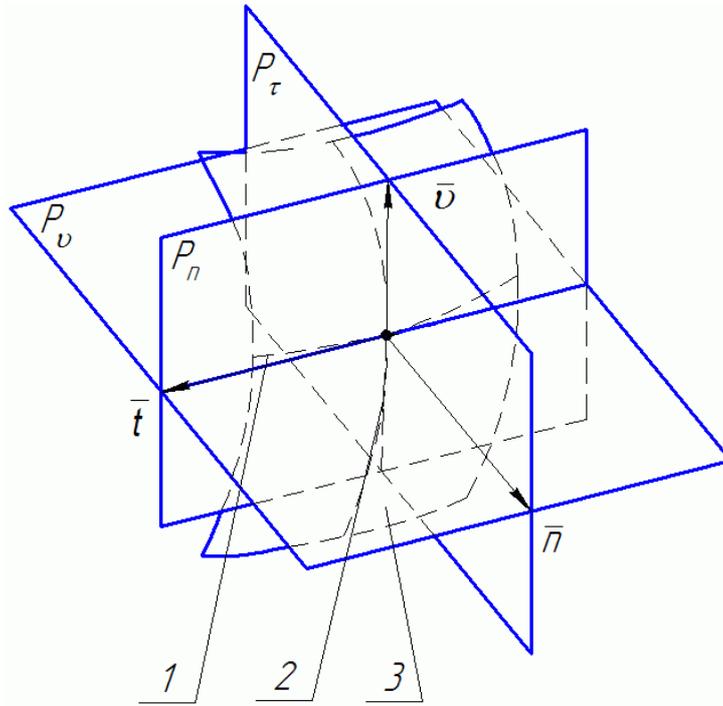


Рис. 3.12. Поверхность резания и координатные плоскости:

1 – режущая кромка инструмента; 2 – траектория резания; 3 – поверхность резания; P_v – основная плоскость; P_τ – секущая плоскость; P_n – плоскость резания; \bar{v} – скорость резания; \bar{n} – нормаль к поверхности резания; \bar{t} – касательная к поверхности резания

Поверхность резания – поверхность, образуемая режущей кромкой в результирующем движении резания. Когда скорость движения подачи или касательного движения значительно меньше, чем скорость главного движения, то можно говорить о *поверхности главного движения* – поверхности, образуемой режущей кромкой в главном движении резания. Примеры поверхностей резания и поверхностей главного движения приведены на рис. 3.13.

Поверхность резания является одним из результатов обработки и с ней связаны многие явления и показатели процесса резания. Например, она определяет шероховатость поверхности и напряжения в детали после обработки и т.п. Поэтому естественным является выбор этой поверхности в качестве отсчетной для описания показателей процесса резания. С ней связывается специальная система координат, ориентирующая зону резания относительно траекторий движения. Плоскости этой координатной системы имеют специфическое название (см. рис. 3.12).

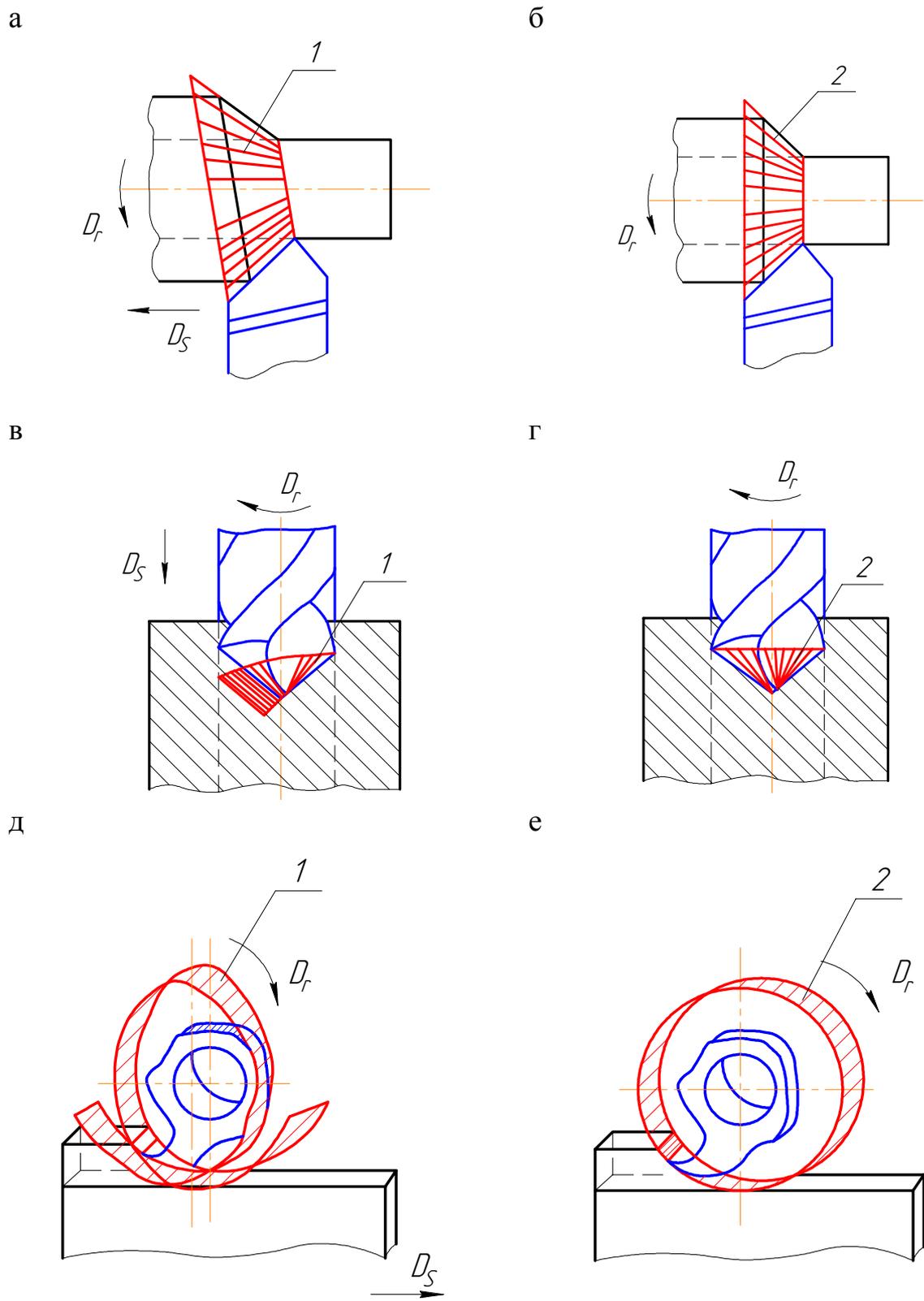


Рис. 3.13. Поверхность резания (1) и поверхность главного движения (2) соответственно при:
 а и б – точении; в и г – сверлении; д и е – фрезеровании

Основная плоскость P_v – это координатная плоскость, проведенная через рассматриваемую точку режущей кромки инструмента перпендикулярно направлению скорости главного или результирующего движения резания в этой точке (содержит векторы $\bar{\tau}$ и \bar{n}).

Плоскость резания P_n – это координатная плоскость, проведенная касательно к поверхности резания в рассматриваемой точке режущей кромки инструмента или касательно к режущей кромке и перпендикулярно основной плоскости (содержит векторы \bar{v} и $\bar{\tau}$).

Главная секущая плоскость P_τ – это координатная плоскость, проведенная через векторы скорости резания или главного движения резания и нормаль к поверхности резания или главного движения резания в рассматриваемой точке режущей кромки инструмента (содержит векторы \bar{v} и \bar{n}).

В зависимости от конечных целей описания показателей процесса резания координатные системы подразделяют на инструментальную, статическую и кинематическую (рис. 3.14 и 3.15).

Инструментальная система координат – это прямоугольная система координат с началом в вершине лезвия инструмента, ориентированная относительно геометрических элементов режущего инструмента, принятых за базу. В качестве базовых элементов могут быть приняты, например, у резца – поверхности державки, у сверла – ось его вращения и т.п. Эта система координат применяется для изготовления и контроля инструмента.

Статическая система координат – это прямоугольная система координат с началом в рассматриваемой точке режущей кромки, ориентированная относительно направления скорости главного движения. Эта система координат применяется для приближенных расчетов углов лезвия в процессе резания и для учета изменения этих углов после установки инструмента на станке. Она является в общем случае переходной системой от инструментальной системы координат к кинематической.

Кинематическая система координат – это прямоугольная система координат с началом в рассматриваемой точке режущей кромки, ориентированная относительно направления скорости результирующего движения резания. Эта система координат применяется для теоретического анализа геометрии лезвия в процессе резания.

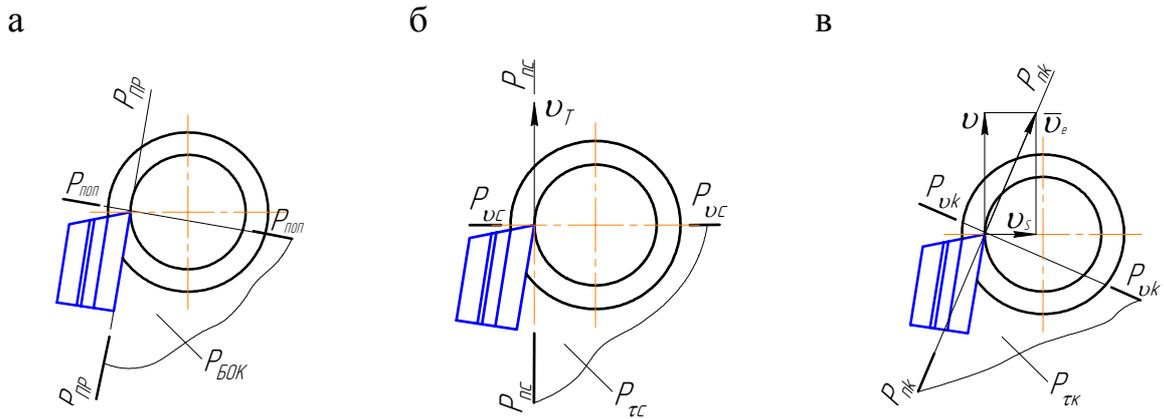


Рис. 3.14. Системы координат при фасонном точении:
а – инструментальная; б – статическая; в – кинематическая

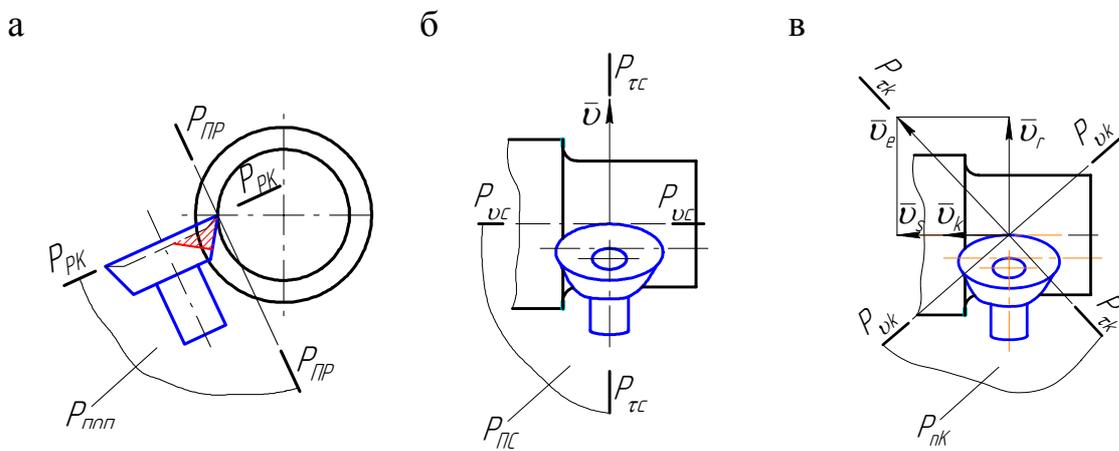


Рис. 3.15. Системы координат при ротационном точении:
а – инструментальная; б – статическая; в – кинематическая

3.2.6. Поверхности и геометрические элементы заготовки

Поверхность резания связана с рядом других не менее важных для понимания процесса резания поверхностей и геометрических элементов заготовки: обрабатываемой и обработанной поверхностями, припуском на обработку, снимаемым и срезаемым слоями и их параметрами.

Обрабатываемой поверхностью называется исходная поверхность заготовки, частично или полностью удаляемая в процессе обработки. *Обработанной поверхностью* называется поверхность, получаемая в результате обработки. Обрабатываемая поверхность определяет величину *припуска*, длительность процесса обработки, производительность. Обработанная поверхность определяет качество и долговечность детали. Для отдельных видов обработки, например, для строгания и протягивания, поверхность резания совпадает с обработанной поверхностью.

Припуск – это весь подлежащий удалению слой материала заготовки за один или несколько проходов инструмента в движении подачи с целью получения детали.

Снимаемым слоем называется часть объема заготовки, удаляемая за один проход инструмента в движении подачи. Снимаемый слой имеет длину L , ширину B и толщину A . Наряду с этими размерами снимаемого слоя для оценки нагруженности режущей кромки инструмента вводится понятие *глубины резания* t . Существует два определения глубины резания:

1. Глубина резания – это расстояние между обрабатываемой и обработанной поверхностями, измеренное в направлении нормали к обработанной поверхности.

2. Глубина резания – это размер снимаемого слоя, измеряемый в направлении перпендикуляра к рабочей плоскости. *Рабочая плоскость* – это плоскость, проходящая через направления скоростей главного движения и движения подачи.

Первое определение глубины резания не является универсальным и, например, при отрезании, подрезании, сверлении, фрезеровании и других видах обработки неприемлемо. Чаще всего это определение глубины резания используется при разработке технологических процессов и характеризуется толщиной слоя припуска, который может быть срезан за один проход инструмента. Второе определение является универсальным и применяется в теории резания для характеристики размера рабочего участка режущей кромки инструмента, находящегося в контакте с заготовкой.

Для определения срезаемого слоя представим, что режущая кромка 1 произвольной формы участвует в движении резания, описывая в пространстве некоторую траекторию 2 и образуя поверхность резания (рис. 3.16).

За один виток в главном движении режущая кромка за счет подачи срежет слой материала 3, называемый срезаемым слоем.

Срезаемый слой характеризуется длиной l , шириной b и толщиной a . *Длина* l измеряется в направлении непрерывного движения точки режущей кромки по траектории резания. *Ширина* b – это размер сечения срезаемого слоя, измеряемый по поверхности резания (линейный размер наибольшей стороны сечения срезаемого слоя). *Толщина* a – это линейный размер сечения срезаемого слоя в рассматриваемой точке режущей кромки в направлении нормали к поверхности резания. При точных расчетах этих параметров, сечение среза рассматривается в основной плоскости перпендикулярной вектору скорости резания. Примеры поверхностей и геометрических элементов заготовки для некоторых видов обработки резанием представлены на рис. 3.17.

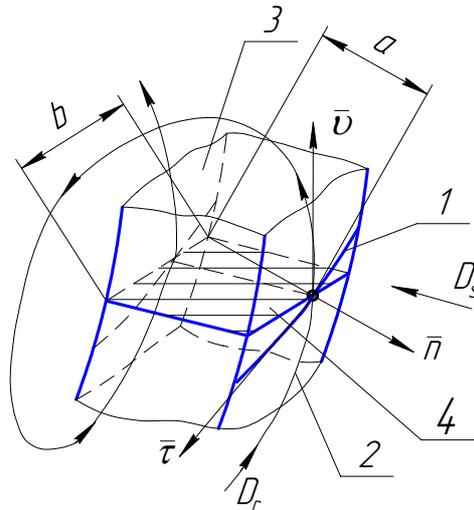


Рис. 3.16. Срезаемый слой и сечение срезаемого слоя:
 1 – режущая кромка; 2 – траектория резания;
 3 – срезаемый слой; 4 – сечение срезаемого слоя;
 a – толщина срезаемого слоя; b – ширина срезаемого слоя

Толщина и ширина среза являются важнейшими характеристиками процесса резания и являются *геометрическими параметрами резания*.

Связь геометрических и технологических параметров, например, при обтачивании следующая:

$$a = S_0 \cdot \sin \varphi, \quad b = \frac{t}{\sin \varphi} \quad (3.3)$$

При фрезеровании толщина срезаемого слоя переменна и зависит от угла контакта зуба фрезы с заготовкой μ :

$$a_\mu = S_0 \cdot \sin \mu, \quad (3.4)$$

Пользуются также понятием *площади сечения срезаемого слоя*, которая определяется по формуле:

$$f = a \cdot b \quad (3.5)$$

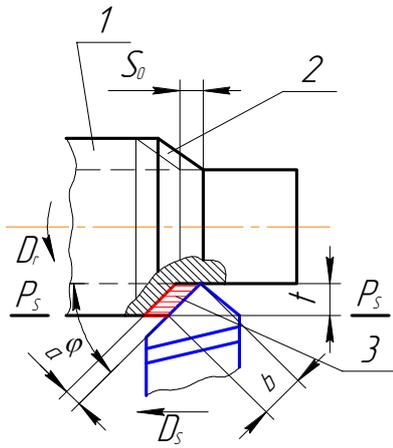
Различают *номинальное (abcd) и действительное (abed) сечения срезаемого слоя*, отличающиеся на величину так называемого «гребешка» bce , определяющего шероховатость обработанной поверхности (рис. 3.18).

Исходя из формул (3.3) и (3.5), площадь сечения среза может быть определена через технологические параметры:

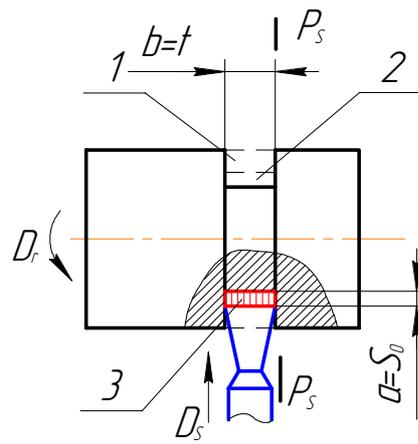
$$f = a \cdot b = S_0 \cdot \sin \varphi \cdot \frac{t}{\sin \varphi} = S_0 \cdot t \quad (3.6)$$

Из выражения (3.6) следует, что независимо от формы режущей кромки площадь срезаемого слоя всегда будет определяться произведением подачи на глубину резания.

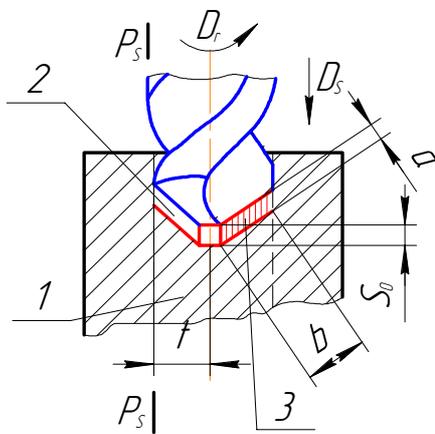
а



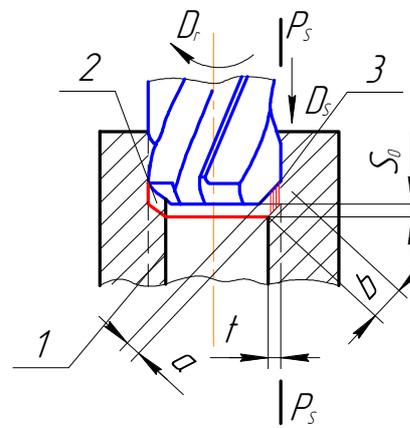
б



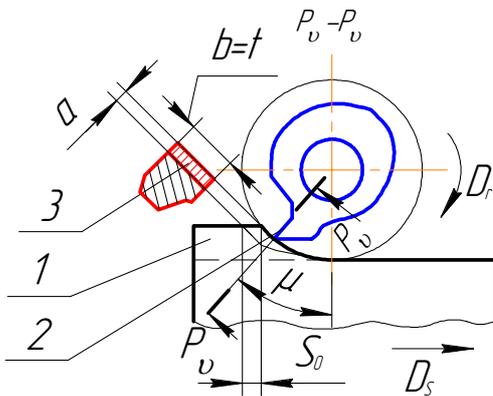
в



г



д



е

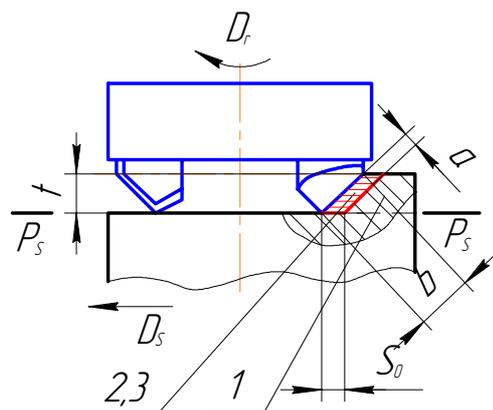


Рис. 3.17. Геометрические элементы и параметры заготовки при:
 а – обтачивании; б – отрезании; в – сверлении; г – зенкерования; д – периферийном фрезеровании; е – торцовом фрезеровании; 1 – снимаемый слой; 2 – срезаемый слой; 3 – сечение срезаемого слоя

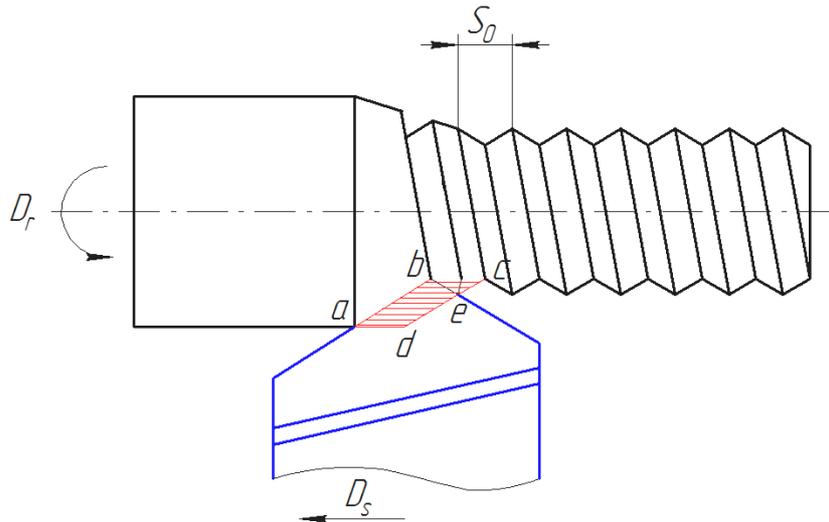


Рис. 3.18. Номинальное (abcd) и действительное (abed) сечения срезаемого слоя

3.3. Режущие инструменты

3.3.1. Элементы и геометрические параметры режущих инструментов

Режущие инструменты предназначены для обработки резанием и подразделяются на лезвийные и абразивные.

Лезвийный инструмент – режущий инструмент с заданным числом лезвий установленной формы.

Абразивный инструмент – инструмент из абразивного материала.

Лезвийный инструмент, например, токарный резец (рис. 3.19) состоит из лезвия, корпусной и крепежной частей.

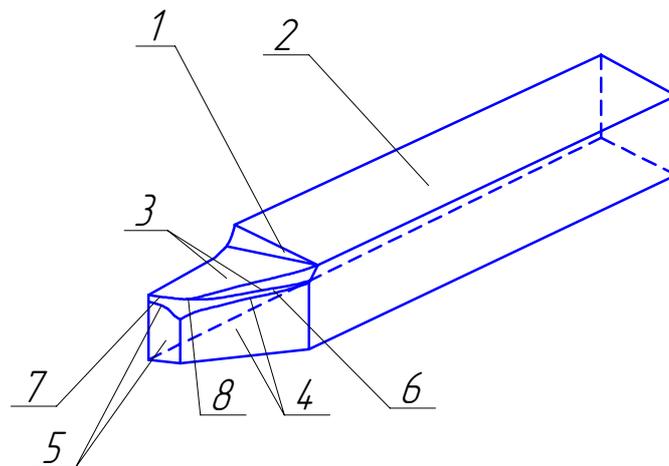


Рис. 3.19. Режущий инструмент (токарный резец) и его элементы: 1 – лезвие; 2 – корпусная и крепежная части; 3 – передняя поверхность лезвия; 4 – главная задняя поверхность лезвия; 5 – вспомогательная задняя поверхность лезвия; 6 – главная режущая кромка; 7 – вспомогательная режущая кромка; 8 – вершина лезвия

Лезвие – клинообразный элемент режущего инструмента для проникновения в материал заготовки и отделения слоя материала. Лезвие включает в себя переднюю и задние поверхности, режущие кромки и вершину.

Передняя поверхность – это поверхность, контактирующая в процессе резания со срезаемым слоем и стружкой.

Задняя поверхность – это поверхность, контактирующая в процессе резания с поверхностью резания, обрабатываемой и обработанной поверхностями заготовки.

Режущая кромка – это кромка лезвия, образуемая пересечением передней и задней поверхностей лезвия.

Вершина – это участок режущей кромки в месте пересечения двух задних поверхностей или участок режущей кромки, имеющий максимальное внедрение в материал заготовки. У проходного токарного резца и сверла вершиной является участок или точка лезвия в месте пересечения главной и вспомогательных режущих кромок.

Главной режущей кромкой называется часть режущей кромки, формирующая большую сторону сечения срезаемого слоя.

Вспомогательная режущая кромка – это часть режущей кромки, формирующая меньшую сторону сечения срезаемого слоя. В зависимости от того, к какой части режущей кромки примыкает задняя поверхность, она называется главной или вспомогательной.

К геометрическим параметрам режущего инструмента относятся *углы лезвия*. Углы лезвия рассматриваются в координатных плоскостях статической и кинематической систем и имеют следующие названия, обозначения и определения (рис. 3.20):

передний угол γ – это угол в главной секущей плоскости между передней поверхностью лезвия и основной плоскостью;

задний угол α – это угол в главной секущей плоскости между задней поверхностью и плоскостью резания;

угол заострения β – это угол в главной секущей плоскости между передней и задней поверхностями лезвия;

угол наклона кромки λ – это угол в плоскости резания между режущей кромкой и основной плоскостью;

угол в плане φ – это угол в основной плоскости между плоскостью резания и рабочей плоскостью, проходящей через направление скоростей главного движения и движения подачи.

Для описания некоторых характеристик процесса резания также используются понятия *угла резания* δ , определяемого в главной секущей плоскости между передней поверхностью и плоскостью резания, и *угла при вершине* ε , определяемого в основной плоскости между плоскостями резания двух сопрягающихся в вершине режущих кромок.

В зависимости от принадлежности к главной или вспомогательной режущим кромкам углы лезвия делятся на *главные* и *вспомогательные* (на рис. 3.20 последние обозначены с индексом 1).

Передний угол γ и угол наклона кромки λ могут иметь как положительные, так и отрицательные значения. Передний угол считается положительным в том случае, когда передняя поверхность в сечении главной секущей плоскостью расположена ниже основной плоскости и отрицательным, когда – выше основной плоскости. Угол наклона главной режущей кромки λ положительный тогда, когда режущая кромка в плоскости резания располагается выше основной плоскости и отрицательный, когда кромка – ниже основной плоскости. Выбор знака для угла наклона вспомогательной кромки λ_1 обратен главному углу λ .

Углы в основной и главной секущей плоскостях связаны следующими соотношениями: $\varphi + \varphi_1 + \varepsilon = 180^\circ$; $\gamma + \lambda + \beta = 90^\circ$; $\gamma + \delta = 90^\circ$; $\beta + \alpha = \delta$.

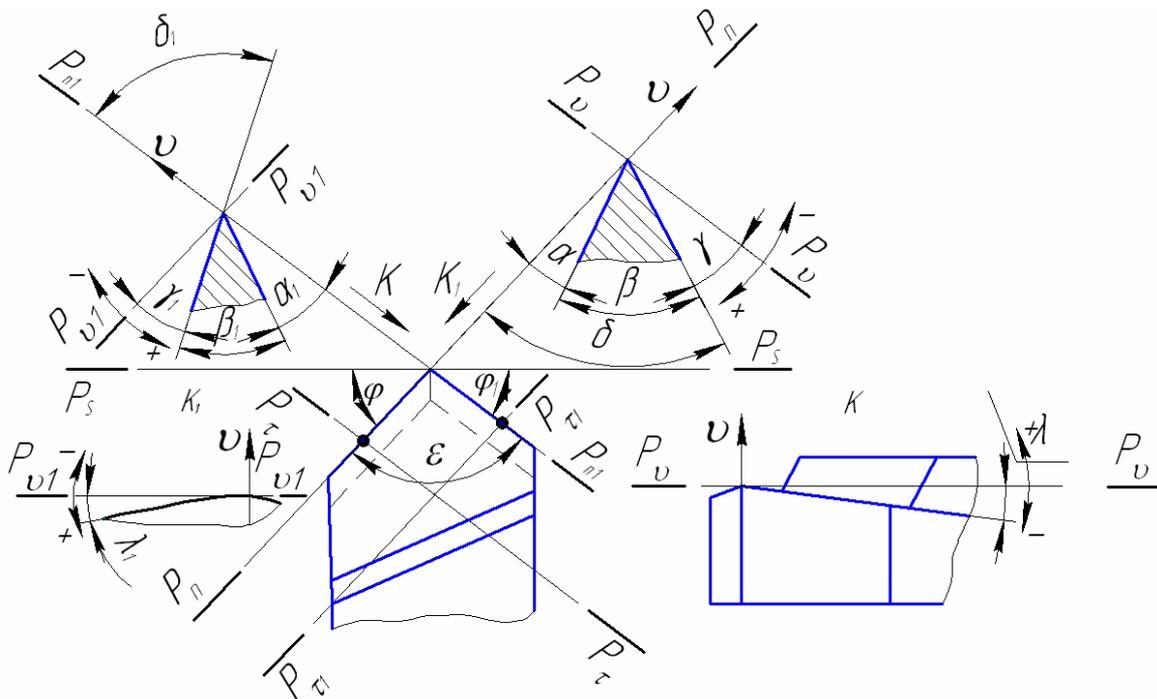


Рис. 3.20. Геометрические параметры лезвия режущего инструмента (токарного резца)

3.3.2. Основные случаи изменения углов лезвия

Рабочие углы лезвия в некоторых случаях отличаются от углов инструмента, рассматриваемого как геометрическое тело. Эти изменения углов необходимо учитывать при заточке и эксплуатации инструмента. *Передний и задний углы лезвия могут изменяться:*

а) при установке резца на станке выше или ниже линии центров (рис. 3.21, а). Углы в этом случае связаны следующими соотношениями:

$$\gamma_1 = \gamma + \mu; \alpha_1 = \alpha - \mu; \gamma_2 = \gamma - \mu; \alpha_2 = \alpha + \mu.$$

За счет поворота резца в основной плоскости относительно оси вращения детали также изменяются главный и вспомогательный углы в плане;

б) при переходе от одной координатной системы к другой, например, от статической к кинематической (рис. 3.21, б). Углы связаны между собой соотношениями: $\gamma_k = \gamma_c + \mu$; $\alpha_k = \alpha_c - \mu$; $\operatorname{tg} \mu = v_s/v = S_0 \cdot n/\pi Dn = S_0/\pi D$;

в) при изменении направления вектора скорости резания в различных точках режущей кромки, например, за счет угла λ (рис. 3.21, в);

г) при изменении кривизны режущей кромки или передней и задней поверхностей, например, на долбяке (рис. 3.22).

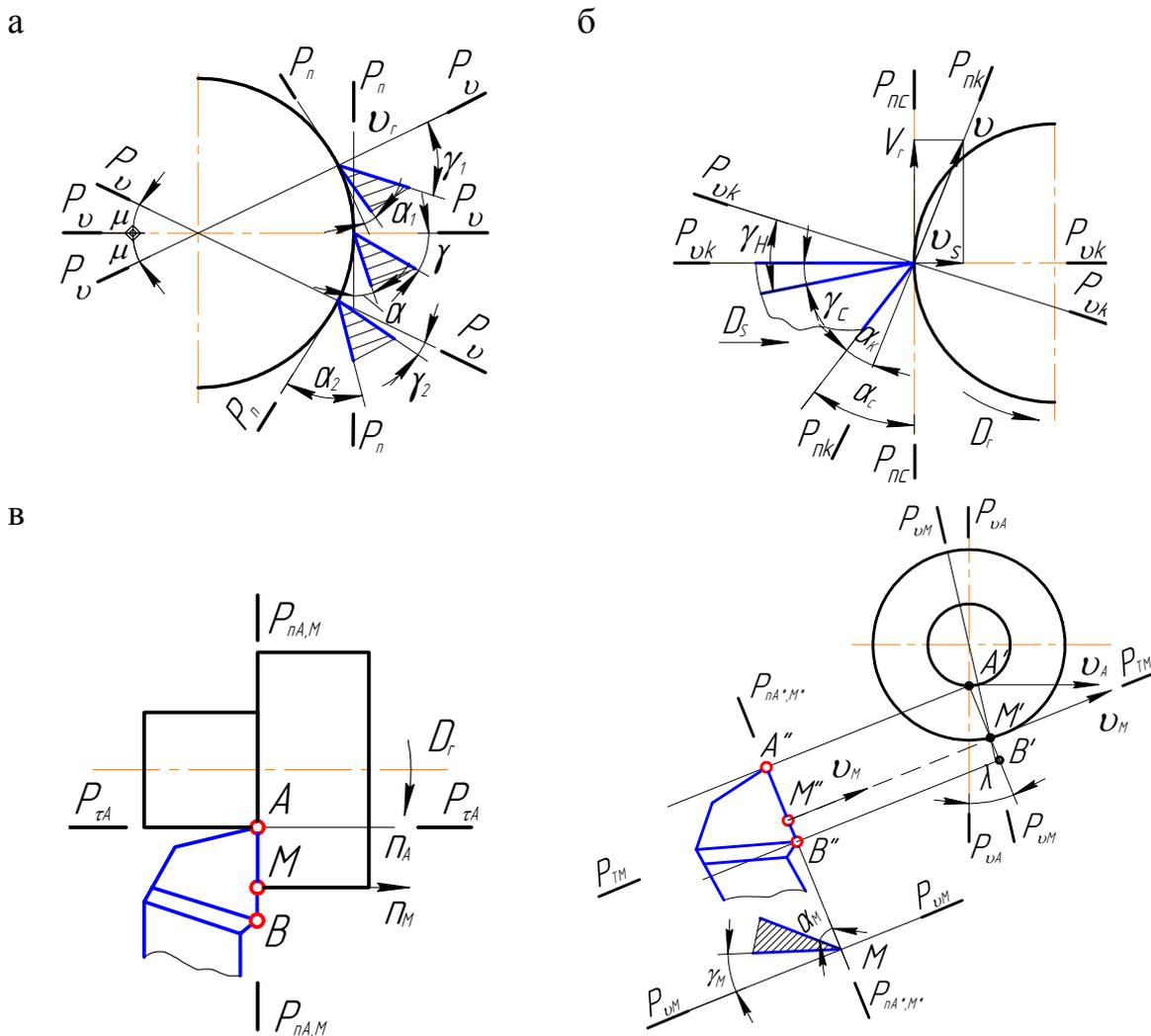


Рис. 3.21. Изменение углов на инструменте:

а – при установке на станке; б – при переходе от одной координатной системы к другой; в – при переходе от одной точки режущей кромки к другой (за счет угла λ или кривизны)

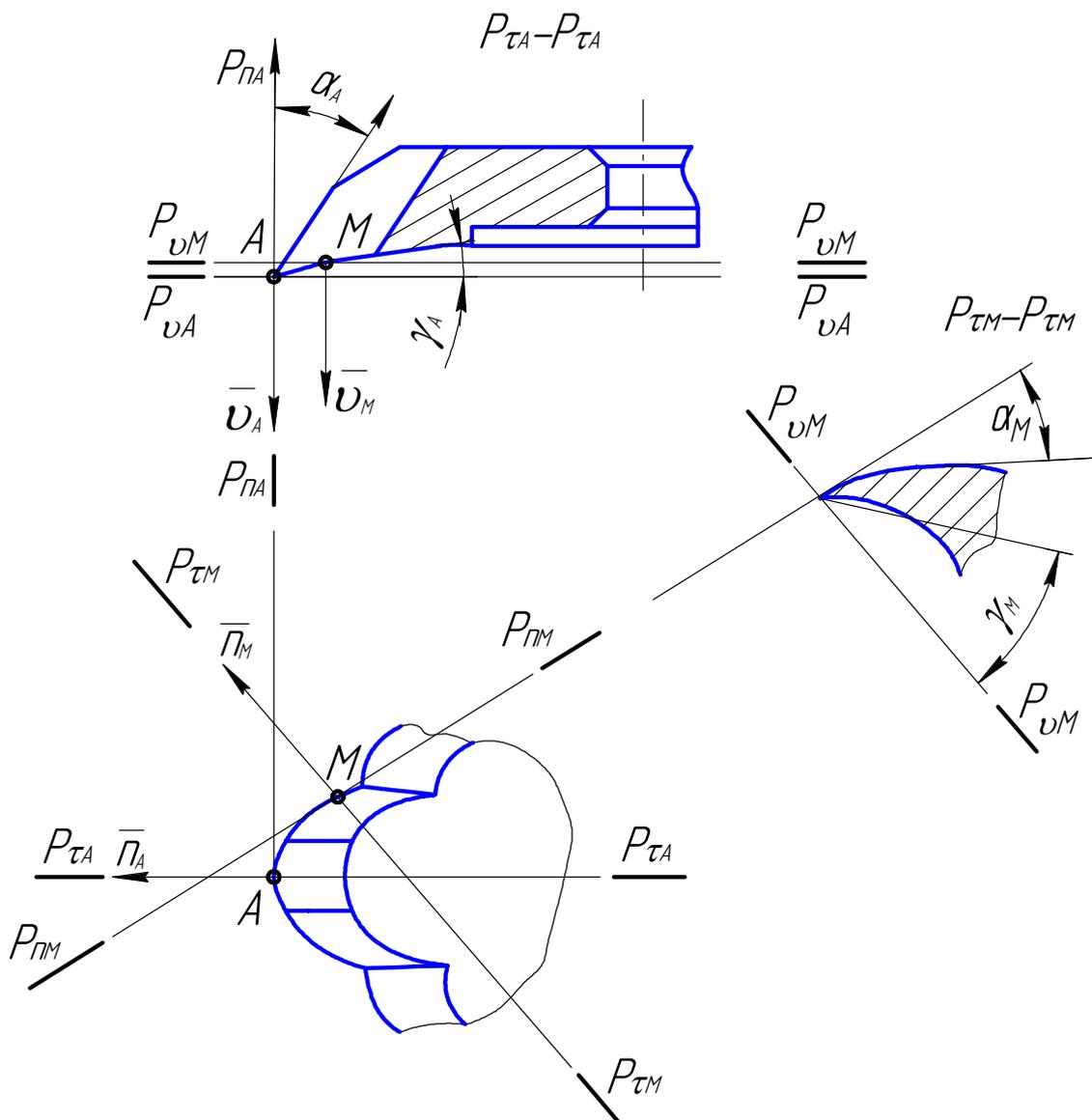


Рис. 3.22. Изменение углов на инструменте (долбьяке) при изменении кривизны режущей кромки

3.3.3. Расчеты геометрических параметров лезвия инструмента

Изменение углов лезвия требуют умения рассчитывать их значения в различных плоскостях. При изготовлении и заточке инструмента необходимо знать углы лезвия в осевой или поперечной и радиальной, или продольной (по отношению к заготовке или инструменту) плоскостях.

Рассмотрим связь углов лезвия в главной секущей плоскости с углами в осевой и радиальной плоскостях на примере точения (рис. 3.23).

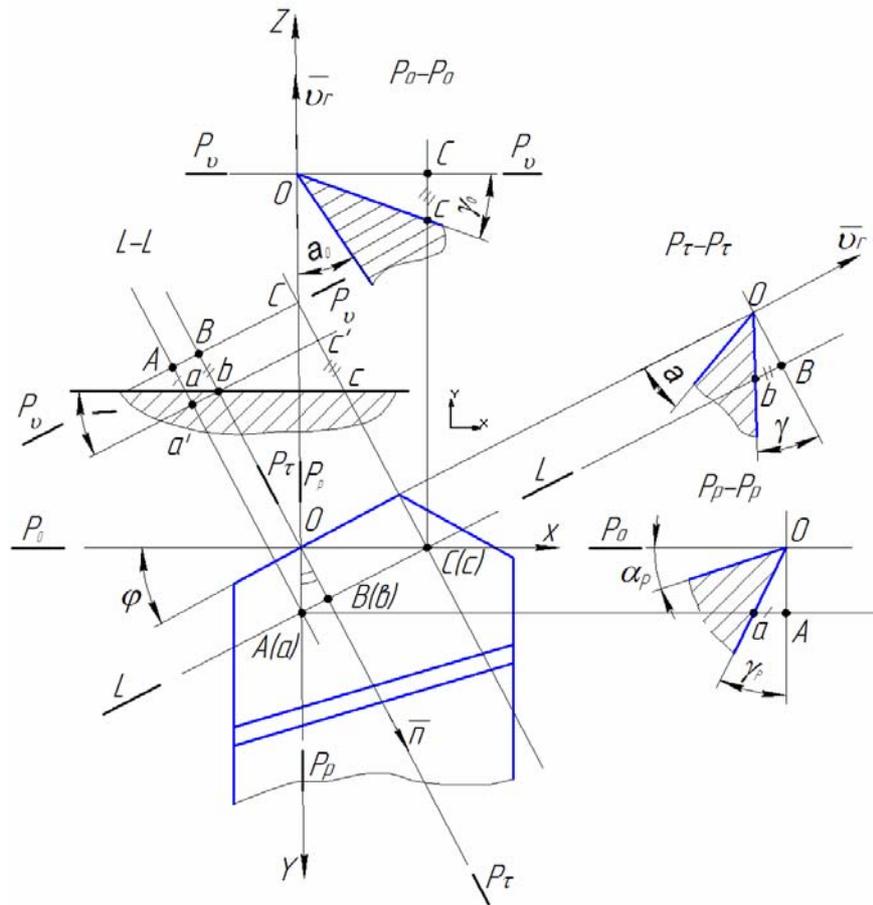


Рис. 3.23. Схема к расчету углов лезвия в секущей, осевой и радиальной плоскостях

Из ΔOCc , OBb , OAa

$$\operatorname{tg}\gamma_0 = cC / OC, \quad (3.7)$$

$$\operatorname{tg}\gamma = bB / OB, \quad (3.8)$$

$$\operatorname{tg}\gamma_p = aA / OA. \quad (3.9)$$

Выразим числитель в формулах (3.7) и (3.9) через отрезок bB , угол λ и другие отрезки.

Из $\Delta aba'$ и $\Delta bcb'$: $\operatorname{tg}\lambda = aa' / a'b = aa' / AB$; и $\operatorname{tg}\lambda = cc' / c'b = cc' / BC$

$$cC = c'C + cc' = bB + BC \cdot \operatorname{tg}\lambda$$

$$aA = a'A - aa' = bB - AB \cdot \operatorname{tg}\lambda.$$

В эти соотношения подставим выражения bB из формулы (3.8):

$$cC = OB \cdot \operatorname{tg}\gamma + BC \cdot \operatorname{tg}\lambda,$$

$$aA = OB \cdot \operatorname{tg}\gamma - AB \cdot \operatorname{tg}\lambda,$$

$$\operatorname{tg}\gamma_0 = OB / OC \cdot \operatorname{tg}\gamma + BC / OC \cdot \operatorname{tg}\lambda,$$

$$\operatorname{tg}\gamma_p = OB / OA \cdot \operatorname{tg}\gamma - AB / OA \cdot \operatorname{tg}\lambda,$$

или

$$\operatorname{tg}\gamma_0 = \operatorname{tg}\gamma \cdot \sin\varphi + \operatorname{tg}\lambda \cdot \cos\varphi, \quad (3.10)$$

$$\operatorname{tg}\gamma_p = \operatorname{tg}\gamma \cdot \cos\varphi - \operatorname{tg}\lambda \cdot \sin\varphi. \quad (3.11)$$

1) Умножим (3.10) на $\sin\varphi$, а (3.11) на $\cos\varphi$ и сложим полученные выражения.

2) Умножим (3.10) на $\cos\varphi$, а (3.11) на $\sin\varphi$ и вычтем из формулы (3.10) выражение (3.11). В результате этих действий получим:

$$\operatorname{tg}\gamma = \operatorname{tg}\gamma_0 \cdot \sin\varphi + \operatorname{tg}\gamma_p \cdot \cos\varphi, \quad (3.12)$$

$$\operatorname{tg}\lambda = \operatorname{tg}\gamma_0 \cdot \cos\varphi - \operatorname{tg}\gamma_p \cdot \sin\varphi. \quad (3.13)$$

Для расчета заднего угла нужно взять соотношение $\alpha = 90^\circ - \beta - \gamma$ или $\gamma = 90^\circ - \beta - \alpha$, принять переднюю поверхность за заднюю, т.е. $\beta = 0^\circ$ и подставить $\gamma = 90^\circ - \alpha$ в формулы (3.10) ... (3.13):

$$\operatorname{ctg}\alpha_0 = \operatorname{ctg}\alpha \cdot \sin\varphi + \operatorname{tg}\lambda \cdot \cos\varphi, \quad (3.14)$$

$$\operatorname{ctg}\alpha_p = \operatorname{ctg}\alpha \cdot \cos\varphi - \operatorname{tg}\lambda \cdot \sin\varphi, \quad (3.15)$$

или

$$\operatorname{ctg}\alpha = \operatorname{ctg}\alpha_0 \cdot \sin\varphi + \operatorname{ctg}\alpha_p \cdot \cos\varphi, \quad (3.16)$$

$$\operatorname{tg}\lambda = \operatorname{ctg}\alpha_0 \cdot \cos\varphi - \operatorname{ctg}\alpha_p \cdot \sin\varphi. \quad (3.17)$$

При эксплуатации ряда режущих инструментов, например, фасонных резцов надо знать значение углов в нормальной плоскости, проходящей через нормаль к поверхности резания n перпендикулярно режущей кромке.

Рассмотрим *перерасчет углов лезвия резца из главной секущей плоскости в нормальную плоскость* (рис. 3.24).

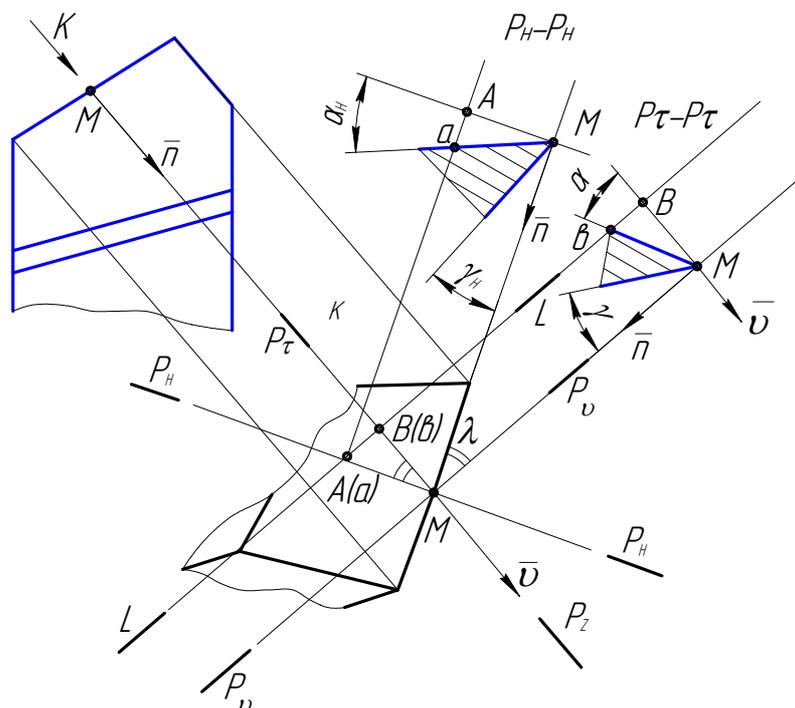


Рис. 3.24. Схема к расчету углов лезвия в секущей и нормальной плоскостях

Из $\triangle MAa$ и $\triangle MBb$: $\operatorname{tg}\alpha_n = \frac{aA}{AM}$ и $\operatorname{tg}\alpha = \frac{bB}{BM}$.

Разделим первое выражение на второе:

$$\frac{\operatorname{tg}\alpha_n}{\operatorname{tg}\alpha} = \frac{aA}{AM} \cdot \frac{BM}{bB} = \cos\lambda.$$

Так как $aA = bB$, то $\operatorname{tg}\alpha_n = \operatorname{tg}\alpha \cdot \cos\lambda$. (3.18)

Для переднего угла можно написать аналогичное (3.18) выражение, приняв во внимание, что $\alpha = 90^\circ - \beta - \gamma$. Если принять переднюю поверхность за заднюю, т.е. $\beta = 0^\circ$, то $\alpha = 90^\circ - \gamma$ и

$$\operatorname{tg}\gamma = \operatorname{tg}\gamma_n \cdot \cos\lambda. \quad (3.19)$$

Полученные соотношения можно использовать для пересчета углов не только при плоских поверхностях лезвия и прямолинейных кромках, но и при криволинейных. В последнем случае расчет справедлив для плоскостей, которые касательны к передней и задней поверхностям в рассматриваемой точке режущей кромки. Эти формулы также справедливы при расчете и других режущих инструментов. В этом случае необходимо только правильно выбрать осевую и радиальную плоскости, а также углы γ , φ и λ .

3.4. Инструментальные материалы

3.4.1. Требования, предъявляемые к инструментальным материалам

Большое влияние на процесс резания и достижение высокой производительности обработки оказывает материал режущего лезвия инструмента (*инструментальный материал*). В этой связи к инструментальным материалам предъявляются определенные *требования* по обеспечению:

- высокой твердости и прочности;
- высокой теплостойкости или красностойкости, характеризующейся наивысшей температурой, при которой инструментальный материал сохраняет свои режущие свойства;
- высокой износостойкости;
- удовлетворительных технологических качеств (материалы должны хорошо поддаваться ковке, термообработке, шлифованию, заточке и т.д.);
- сравнительной дешевизны и отсутствию остродефицитных элементов.

К инструментальным материалам относятся следующие *разновидности*: углеродистые и легированные инструментальные стали, быстроре-

жущие стали и сплавы, твердые сплавы, минералокерамика и сверхтвердые материалы.

Наиболее распространенным инструментальным материалом является быстрорежущая сталь. Из этого материала изготавливается около 66 % инструмента, из твердого сплава – около 32 %, из остальных групп инструментальных материалов – только 2 % (рис. 3.25, а). Сравнение же применяемости каждой группы материалов по объему снимаемой стружки дает иную картину их распространения (рис. 3.25, б).

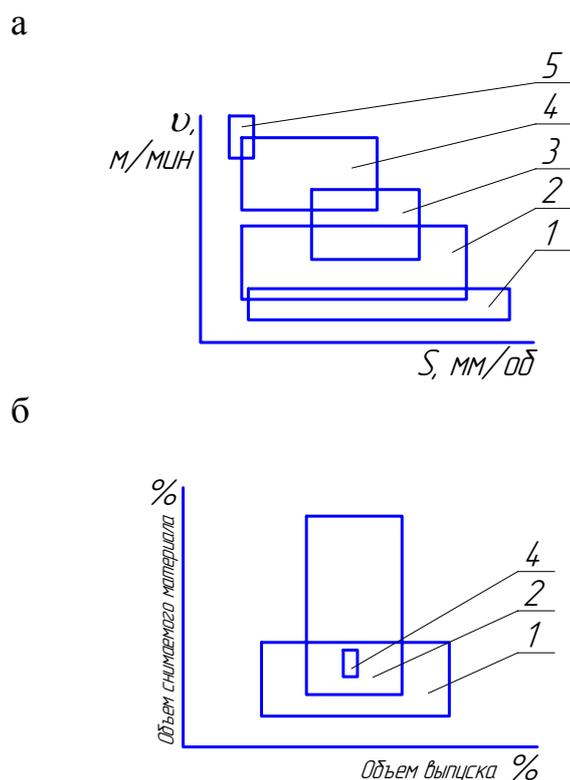


Рис. 3.25. Использование инструментальных материалов в диапазоне допустимых скоростей резания и подачи (а), по объемам выпуска и снимаемого материала (б):

1 – быстрорежущие стали; 2 – твердые сплавы; 3 – твердые сплавы с покрытиями;
4 – керамика; 5 – сверхтвердые материалы

Так, инструментом из твердого сплава снимается примерно 68 % стружки, инструментом из быстрорежущей стали – около 28 %, на долю остальных групп материалов приходится только 4 %. Приведенные процентные соотношения в течение времени изменяются в зависимости от изменения структуры обрабатываемых материалов, парка оборудования, точности изготавливаемых деталей. Наиболее быстрыми темпами в настоящее время развиваются инструменты из сверхтвердых материалов и минералокерамики, а также с износостойкими покрытиями (рис. 3.26).

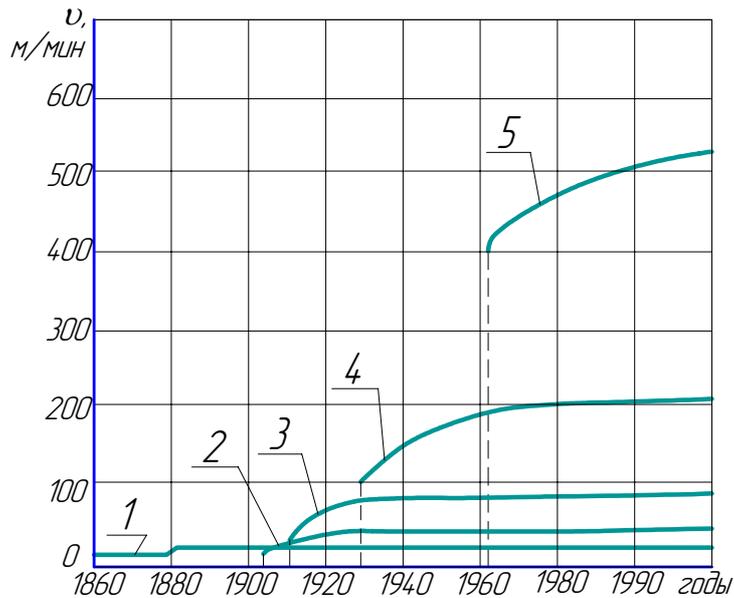


Рис. 3.26. Применение инструментальных материалов по годам и скоростям резания: 1 – инструментальные стали; 2 – быстрорежущие стали; 3 – литые твердые сплавы; 4 – порошковые твердые сплавы; 5 – керамика

3.4.2. Основные разновидности инструментальных материалов

Наиболее распространенными марками *углеродистых инструментальных сталей* являются У10А, У11А, У12А, У13А, где буква У означает углеродистая, цифры – содержание углерода в десятых долях процента, буква А – сталь улучшенная. Имеют твердость 61 ... 63 HRC₃, прочность $\sigma_s = 2000 \dots 2200$ МПа и теплостойкость $\theta_T = 200 \dots 250$ °С. Эти стали применяются в условиях единичного и мелкосерийного производства для изготовления метчиков, плашек, сверл малых диаметров и других инструментов (в том числе слесарных), работающих при невысоких скоростях резания 8 ... 10 м/мин.

Легированные инструментальные стали отличаются от инструментальных углеродистых наличием в них легирующих элементов – хрома, вольфрама, молибдена, ванадия и других. Введение легирующих элементов повышает теплостойкость инструментальной стали до 350 ... 400 °С, что позволяет повысить скорость резания по сравнению с инструментальными углеродистыми сталями в 1,2 ... 1,4 раза ($v = 10 \dots 14$ м/мин). Наибольшее распространение для изготовления режущего инструмента получили стали марок 9ХС (0,9 % С, Х – Cr, С – Si). ХВСГ (В – V, Г – Mn), ХВГ и другие. Твердость этих сталей 65 ... 67 HRC₃. Основное преимущество инструментальных легированных сталей – возможность изготовления тонкого и длинного стержневого инструмента – протяжек, сверл, разверток, метчиков и других.

Быстрорежущие стали обладают более высокими режущими свойствами, чем вышерассмотренные. Имеют твердость 63 ... 65 HRC₃, красностойкость $\theta_T = 600 - 720$ °С и позволяют работать при скоростях резания 20 ... 40 м/мин. Возможность работать на таких скоростях резания объясняется наличием в их составе вольфрама, молибдена, кобальта и ванадия. Маркировка быстрорежущей стали включает в себя буквы, обозначающие карбидообразующие и легирующие элементы (Р – вольфрам, М – молибден, Ф – ванадий, К – кобальт, Т – титан, Ц – цирконий, А – азот) и цифры (за буквами), обозначают среднее массовое содержание элемента в %. Например, Р18 (W – 18 %, Cr – 4,1 %, V – 1,2 %, C – 0,75 %, Si и Mn – 0,4 %, Mo – 3 %, P и S – 33 %).

Быстрорежущие стали подразделяются на: вольфрамовые – Р18, Р12, Р9 и другие; вольфрамомолибденовые – Р6М5, 10Р6М5 и другие; вольфрамованадиевые – Р18Ф, Р12Ф3 и другие; вольфрамокобальтовые – Р9К5, Р9К10 (64 ... 65 HRC₃, $\theta_{кр} = 630$ °С); вольфрамванадиевые с кобальтом – Р18К5Ф2, Р18Ф2К8 и другие (66 ... 68 HRC₃, $\theta_{кр} = 640$ °С); вольфрамомолибденованадиевые с кобальтом – Р6М5К5, Р12М3Ф2К5, Р10М4Ф3К10, Р6М5Ф2К8 и другие (66...69 HRC₃); с интерметаллидным упрочнением – В11МЭК23, В14МЭК25, 30В20К16 и другие (68 ... 69 HRC₃, $\theta_{кр} = 700 - 725$ °С). Влияние отдельных элементов на свойства сталей различно. Повышение процентного содержания углерода приводит к повышению твердости, красностойкости, но одновременно снижает прочность, ухудшает технологические свойства сталей. Вольфрам придает красностойкость, а хром хорошую прокаливаемость. Ванадий также увеличивает красностойкость, но ухудшает шлифуемость сталей. Молибден влияет на красностойкость так же, как и вольфрам. Режущие свойства сталей существенно зависят от термообработки, заключающейся в закалке ($\theta_3 = 1300$ °С) в соляных ваннах и последующем двух- или трехкратном отпуске.

Применяются также *литые быстрорежущие стали* для изготовления инструментов простой формы, вязкость которых выше, чем у кованных.

Порошковые быстрорежущие стали изготавливают методом прессования порошков, которые получают распылением расплавленной стали в среде инертных газов (азот, аргон) во избежание их окисления. Порошок (размер зерен около 150 мкм) предварительно прессуют в холодном состоянии при давлении 40000 МПа. После вакуумирования порошок нагревают до 1150 ... 1200 °С и вторично прессуют под давлением 4000 МПа. Затем куют заготовки диаметром 100 ... 200 мм.

Твердые сплавы получают методами порошковой металлургии в виде пластинок путем спекания их в электрических печах при температуре около 1500 °С. Для стандартных твердых сплавов $\sigma_u = 950 \dots 1800$ МПа, $\sigma_s = 4000 \dots 6000$ МПа. В зависимости от состава карбидной фазы выделяют три группы сплавов:

1. Вольфрамокобальтовые или однокарбидные (ВК) – ВК2 (98 % WC + 2 % Co), ВК3, ВК4, ВК4В, ВК6М, ВК60М, ВК8, ВК8В, ВК10М и другие.

2. Титановольфрамовые или двукарбидные (ТК) – Т5К10 (85 % WC + 10 % Co + 5 % TiC), Т5К12В, Т15К6, Т30К4 и другие.

3. Титано-танталовольфрамокобальтовые или трехкарбидные (ТТК) – ТТ7К12, ТТ7К15, ТТ10К8 (3 % TiC + 10(TaC + NbC) + 82 % WC + 8 % Co) и другие.

Сплавы размером зерен WC от 3 до 5 мкм относятся к крупнозернистым и обозначаются буквой В, если размер зерен WC не превышает 0,5 ... 1,5 мкм, то сплавы относятся к мелкозернистым и обозначаются буквой М, если зерна меньше 1 мкм, то сплавы особо мелкозернистые – ОМ.

Сплавы первой группы применяются для обработки материалов, дающих стружку надлома или элементную, например, жаропрочных сталей и титановых сплавов. Сплавы второй группы применяются при обработке пластичных материалов. Они более тверды, теплостойки и износостойки, но в то же время более хрупки и менее прочны, чем сплавы первой группы. Поэтому сплавы ТК плохо выдерживают ударные нагрузки, прерывистое резание с переменным сечением среза. Твердые сплавы третьей группы обладают более высокой прочностью (вязкостью), чем ТК за счет замены части TiC карбидом тантала (TaC), имеющим меньшую микротвердость и более высокую температуру плавления. Уступая ТК по теплостойкости, сплавы ТТК превосходят их по прочности. Они характеризуются высокой износостойкостью, сопротивлением удару, вибрациям и выкрашиванию.

Относительно новой группой твердых сплавов являются *безвольфрамовые твердые сплавы*, в которых карбид вольфрама заменен карбидом титана или карбонитридом титана, а в качестве связки используются никель, железо, молибден. Сплавы отличаются, с одной стороны, высокой окалийностойкостью, малым коэффициентом трения, пониженной склонностью к адгезии, меньшей плотностью, и, с другой стороны, пониженной прочностью, склонностью к трещинообразованию при напайке. Применяются в основном при получистовой обработке. Примеры марок – ТН-25 (TiC – 79 %, Ni – 15 %, Mo – 6 %), ТН-25, ТН-30, КНТ-16.

Дальнейшее развитие твердых сплавов, а также быстрорежущих сталей осуществляется в направлении углубления их специализации и сокращения марочного состава в пределах каждой группы. Перспективным направлением является нанесение на режущий инструмент износостойких покрытий методами химического и физического осаждения. Методы химического осаждения применяются для нанесения покрытий из TiC, TiN и Al_2O_3 на твердосплавные пластины. Отличительной их особенностью являются высокие температуры (более 1000 °С) нанесения покрытий, что не позволяет использовать эти методы для быстрорежущих и инструментальных сталей. К методам физического осаждения покрытий относятся ионно-плазменные, в частности электронно-лучевой, магнетронного распыления в вакууме и электродуговой, осуществляемые при температуре не более 500 °С, что позволяет использовать их для инструментальных и быстрорежущих сталей. При этих методах на поверхности лезвия инструмента наносятся одно- или многослойные покрытия, например TiN, TiC, ZrN, толщиной 2 ... 10 мкм. Износостойкие покрытия позволяют повысить стойкость инструментов в 2 ... 5 раз по сравнению с исходным материалом. Зарубежные фирмы, например, *SANDVIK COROMANT* до 90 % инструмента выпускают с покрытиями.

Минералокерамика выпускается в виде пластин белого, светло-желтого и черного цвета высокой твердости (90...94 HRA), теплостойкости (до 1200 °С) и износостойкости, превосходящей твердые сплавы. Недостатки – высокая хрупкость, низкая ударная вязкость, плохая сопротивляемость циклическим изменениям температуры. Основой этих материалов является глинозем (Al_2O_3). Минералокерамику на основе оксида алюминия подразделяют на: 1) оксидную керамику (Al_2O_3 – до 99,7 %), например ЦМ – 332; 2) керамику, представляющую собой оксид алюминия с добавлением металлов (титан, ниобий и др.); 3) оксидно-карбидную керамику (черного цвета), состоящую из оксида алюминия и карбидов тугоплавких металлов (титана, вольфрама, молибдена), например, ВОК-60, ВОК-63. Наряду с материалами на основе Al_2O_3 выпускается керамика на основе нитрида кремния – силинит – Р и картинит ОНТ-20 (с добавками оксида алюминия и некоторых других веществ), отличающаяся отсутствием склонности к адгезии.

Минералокерамика используется при получистой и чистовой обработке труднообрабатываемых сталей и сплавов, чугунов, а также неметаллических материалов.

Широкое распространение получили *сверхтвердые материалы* на основе алмаза и нитрида бора. Природный алмаз (А) имеет высокую твер-

дость и прочность ($\sigma = 2000$ МПа), теплопроводность и низкий коэффициент линейного расширения. Недостатки – способность интенсивно растворяться в железе и его сплавах с углеродом при $\theta = 750$ °С, высокая стоимость. Синтетические алмазы (СА) тверже, чем природные, и получают их переводом углерода в другую модификацию за счет графита при $\theta = 2500$ °С и $P = 100000$ МПа. А и АС применяются в абразивных и режущих лезвийных инструментах при чистовой обработке труднообрабатываемых материалов.

Сверхтвердые материалы на основе кубического нитрида бора (КНБ) подразделяют на композиты: 1) с массовой долей КНБ более 95 % – эльбор Р (композит 01), гексанит (композит 10), белбор (композит 02), исмит, ПТНБ в виде столбиков диаметром 4 ... 6 мм и высотой 3 ... 6 мм; 2) с массовой долей КНБ до 75 % с различными добавками – композит 05 в виде таблеток диаметром 8 мм и высотой 6 мм.

К сверхтвердым материалам также относятся материалы на основе диборита титана, искусственных монокристаллов сапфира, рубина и т.д.

Отдельную группу инструментальных материалов составляют *абразивные материалы* для абразивных инструментов. К ним относятся: электрокорунд, карбид кремния, карбид бора, алмаз, кубический нитрид бора, белбор и другие. При маркировке абразивных материалов используют цифровые и буквенные обозначения, например, белый электрокорунд – 25А, 24А, 23А, 22А; карбид кремния черный – 55С, 54С, 53С; карбид кремния зеленый – 64С, 63С, 62С; алмаз природный – А; алмаз синтетический – АСО, АСР, АСВ; эльбор – Л и т.д. Размеры зерен абразивного материала подразделяют по номерам зернистости: 125, 80, 50, 40 и т. д., что соответствует – 1,25 мм, 0,8 мм, 0,5 мм, 0,4 мм и т. д. Твердость материала обозначают буквами: М – мягкий, СМ – среднемягкий, С – средний, СТ – среднетвердый. Абразивные зерна могут использоваться в свободном состоянии и связываться между собой при помощи специальных веществ, называемых связками: К – керамическая, Б – бакелитовая, В – вулканитовая, М – металлическая и т.д. Различают плотную, среднюю и открытую структуры абразивного материала, например, 4, 5, 6, 7 – средняя структура. Эти обозначения входят в маркировку абразивных инструментов. Например, шлифовальный круг ЧАЗ 250×16×75 25А 40 С25К5 35 м/с А 1кл ГОСТ 2424-83, где ЧАЗ – наименование завода изготовителя, 250×16×75 – размеры круга (наружный диаметр, высота, внутренний диаметр). 25А – вид абразивного материала, 40 – зернистость, С2 – твердость, 5 – структура, К5 – вид связки, 35 м/с – скорость вращения круга, А – класс точности, 1кл – класс неуравновешенности.

3.5. Механика стружкообразования

3.5.1. Пластическое деформирование и стружкообразование при резании, методы их изучения

Процесс *пластического деформирования* срезаемого слоя является основным процессом при обработке резанием. Большую роль в изучении этого процесса играет *стружка* – деформированный и отделенный в результате обработки поверхностный слой материала заготовки (рис. 3.27). Раздел теории резания, изучающий закономерности превращения срезаемого слоя в стружку называется *механикой стружкообразования*.

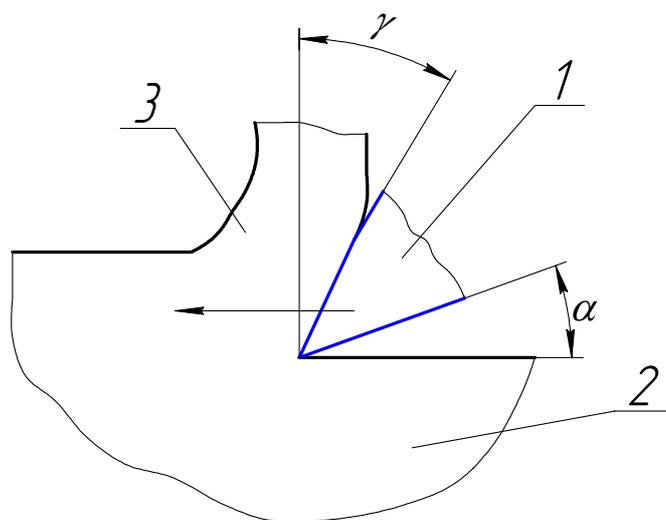


Рис. 3.27. Схема стружкообразования: 1 – инструмент; 2 – заготовка; 3 – стружка

При изучении пластического деформирования и стружкообразования используются следующие *методы*:

1. Визуальный, заключающийся во внешнем осмотре стружки с определением показателей процесса деформирования и стружкообразования по очевидным качествам. Например, виду и форме стружки, цвету стружки, наличию или отсутствию нароста и следов износа и т.п.

2. Скоростной кино- и видеосъемки, заключающийся в фотографировании срезаемого слоя и стружки скоростной кино- или видеокамерой с частотой до 10000 кадров в секунду. Это позволяет наблюдать быстропротекающий процесс стружкообразования в замедленном виде.

3. Делительной сетки, заключающийся в нанесении на боковую поверхность образца краской, травлением, царапанием и т.п. прямоугольников, квадратов или окружностей, которые при резании теряют правильную форму, и по их искажению на стружке судят о пластической деформации. Для сопоставления нанесенной сетки на образце и искаженной на стружке с

помощью специальных приспособлений для «мгновенного» прекращения процесса резания получают так называемый корень стружки. *Корень стружки* – это фиксированный объем срезаемого слоя с неотделенным участком стружки.

4. Микротвердости, заключающийся в измерении твердости в различных точках корня стружки на приборе ПМТ-3 с последующим построением изосклер (линий постоянной твердости), по которым судят о пластической деформации и напряжениях.

5. Металлографический, заключающийся в изготовлении шлифов боковой поверхности корня стружки с последующим изучением его структуры под микроскопом.

6. Механический, заключающийся в последовательном удалении с поверхностей образца детали тонких слоев материала и измерении с помощью тензометрических датчиков величин деформации, по которым судят о величине и знаке напряжений первого рода.

7. Рентгенографический, заключающийся в стравливании поверхностного слоя образца детали и съеме рентгенограмм, по которым изучаются напряжения второго рода, действующие внутри кристаллического зерна.

8. Поляризационно-оптический основан на том, что прозрачные изотропные тела при действии на них сил становятся анизотропными, и если их рассматривать в поляризованном свете, то интерференционная картина позволяет определить величину и знак действующих напряжений. Метод дает точные величины напряжений только в упругой области и при резании образцов из оптически активных материалов, например, органического стекла.

3.5.2. Виды стружки

В зависимости от свойств обрабатываемого материала, режима резания, геометрии инструмента и т.п. при резании образуются следующие *виды стружки* (рис. 3.28): 1) сливная; 2) элементная; 3) надлома. По классификации И.А. Тиме выделяется также стружка суставчатая, по зарубежным классификациям эти виды стружки носят названия соответственно гладкой, пилообразной и дробленой.

Сливная и элементная стружки (рис. 3.28, а, б) образуются при обработке пластичных материалов. В основе формирования этих видов стружки лежит образование чередующихся элементов: у сливной – микроскопических, у элементной – явно выраженных. Стружка надлома (рис. 3.28, в) образуется при обработке хрупких материалов и состоит из отдельных, не связанных друг с другом частей различной формы и размеров.

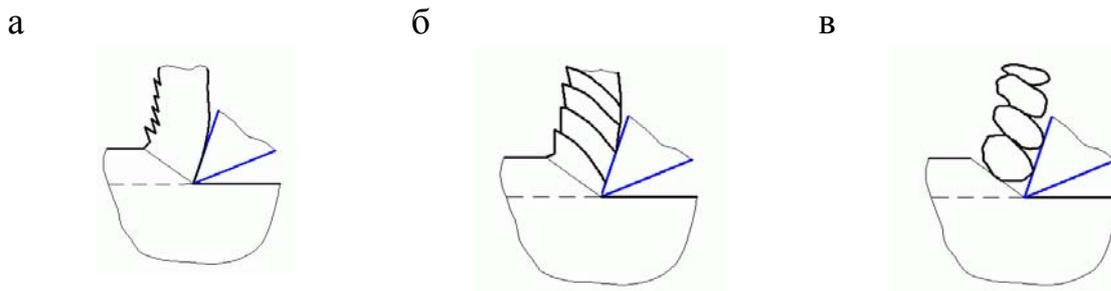


Рис. 3.28. Виды стружки:
а – сливная; б – элементная; в – надлома

В зависимости от условий обработки одних и тех же материалов может образовываться как сливная, так и элементная стружки. Например, при уменьшении скорости резания и переднего угла лезвия, при увеличении подачи, а также при обработке без охлаждения и обработке вязких материалов образующаяся стружка имеет вид элементной. Как правило, образование элементной стружки и стружки надлома приводит к вибрациям в процессе резания и ухудшению качества обработки. Поэтому при чистовой обработке нужно стремиться к образованию сливной стружки.

Стружку также классифицируют: по форме, например, ленточная, спутанная, винтовая, спирально-винтовая, завитковая, осколочная; по размерам; степени и направлению скручивания; по цвету стружки и т.д. Такая классификация стружки важна для оценки резания с точки зрения эффективного дробления, удаления и переработки стружки, автоматизации производственного процесса, силовой и тепловой напряженности в зоне резания, качества обработанной поверхности детали.

На производстве всегда стремятся получить компактную и короткую стружку. Для этого используются различные *способы и устройства для дробления стружки* в процессе резания, в частности:

1. Подбор геометрии лезвия инструмента.
2. Подбор режима резания.
3. Выполнение уступов и лунок на передней поверхности лезвия.
4. Использование накладных стружколомов на передней поверхности лезвия.
5. Кинематическое дробление стружки за счет прерывания подачи, наложения вибраций и колебаний на зону резания, использования видов обработки, обеспечивающих прерывистый характер работы инструмента.
6. Нанесение канавок и рисок на обрабатываемую поверхность или поверхность резания.
7. Термическое дробление стружки путем расплавления или пережигания импульсами электрического тока.

3.5.3. Механизм образования сливной стружки

В образовании сливной стружки можно выделить три переходящие друг в друга этапа (рис. 3.29):

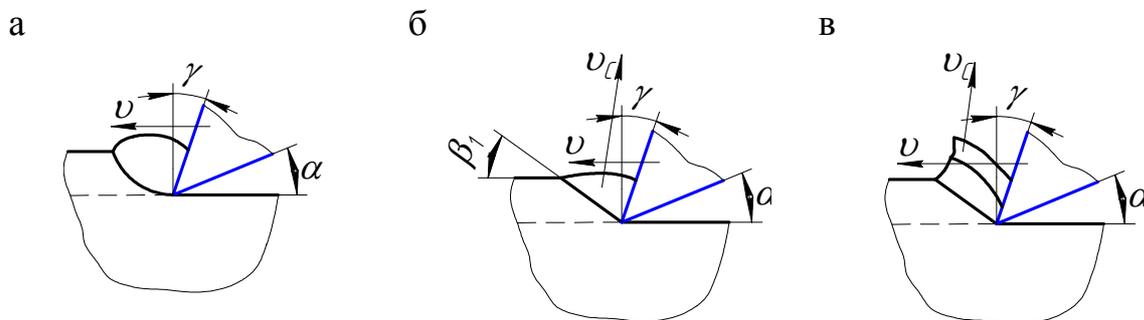


Рис. 3.29. Основные этапы стружкообразования:
а – образование элемента смятия; б – разрушение элемента;
в – формирование стружки

1. При воздействии лезвия инструмента на срезаемый слой (рис. 3.29, а) впереди него создается упруго – пластическая зона, сконцентрированная в ограниченной области обрабатываемого материала и примыкающая к передней поверхности лезвия инструмента. Образуемый в результате пластической деформации смятия элемент срезаемого слоя увеличивается в объеме. В нем возрастают пластические напряжения смятия вплоть до величины предела прочности материала.

2. В некоторой области деформированного элемента напряжения смятия превосходят предел прочности обрабатываемого материала, и этот элемент разрушается путем пластического сдвига по некоторой *поверхности или плоскости сдвига* (рис. 3.29, б). Угол наклона этой плоскости к направлению вектора скорости резания называется *углом сдвига* β_1 . Угол β_1 является комплексной характеристикой напряженного состояния *зоны стружкообразования*, и его величина зависит от свойств обрабатываемого материала, геометрии инструмента, режима резания и других условий обработки.

В момент разрушения сопротивление элемента сдвигу снижается, а продолжающееся движение инструмента приводит к формированию нового элемента и повторению первого этапа. Сдвинутый элемент имеет тенденцию перемещаться по направлению перпендикулярному плоскости сдвига. Однако, встречая сопротивление со стороны передней поверхности инструмента, элемент стружки изменяет свое направление по вектору *скорости движения стружки* v_c .

3. Элемент стружки, перемещаясь вдоль передней поверхности инструмента, испытывает в приконтактных слоях большое давление, которое

Стружка, перемещаясь по передней поверхности инструмента, из-за неровностей контактируемых поверхностей и других причин на участке ОФ длиной l_{Γ} затормаживается, и отдельные ее элементы или волокна на участке ОД, длиной примерно $l_{\Gamma}/2$ могут вообще остановиться. Это приводит к дополнительной деформации элементов стружки, изменению направления образования структуры стружки с поперечного на продольное (вдоль скорости движения стружки v_c) и формированию *продольной текстуры стружки*. Зона, в которой происходят эти процессы, называется *зоной вторичной деформации* или *застойной зоной*. Участок ОФ – это участок контакта стружки с передней поверхностью лезвия и включает участок пластического контакта ОД и упругого контакта ДФ.

Длина контакта заготовки с задней поверхностью лезвия характеризуется величиной l_3 . Наличие зон деформации приводит к пластическому h_n и упругому изменению h_y поверхностных слоев заготовки и детали.

3.5.5. Коэффициенты утолщения, укорочения и уширения стружки

Пластическая деформация срезаемого слоя характеризуется *углом сдвига* β_1 , *усадкой стружки* и *относительным сдвигом* ε .

Усадка стружки – это изменение геометрических размеров стружки по сравнению с размерами срезаемого слоя. Усадка стружки характеризуется тремя коэффициентами: коэффициентом утолщения $K_a = a_1/a$, коэффициентом уширения $K_b = b_1/b$ и коэффициентом укорочения $K_l = l/l_1$, где a_1, b_1, l_1 соответственно толщина, ширина и длина стружки; a, b, l соответственно толщина, ширина и длина срезаемого слоя.

Согласно условию равенства объемов срезаемого слоя и стружки: $a_1 \cdot b_1 \cdot l_1 = a \cdot b \cdot l$, связь между коэффициентами утолщения, укорочения и уширения сливной стружки выражается зависимостью: $l/l_1 = a_1/a = b_1/b$. В большинстве случаев резания коэффициент уширения близок к единице, поэтому обычно принимают $K_l = K_a$.

Коэффициент K_l для сливных и элементных стружек, как правило, имеет величину большую единицы. Однако при обработке малопластичных материалов, например, титановых сплавов и некоторых видов пластмасс коэффициент может иметь величину меньшую единицы. Это явление называется «отрицательной» усадкой стружки.

Найдем *связь коэффициента утолщения K_a с углом сдвига β_1* (рис. 3.31).

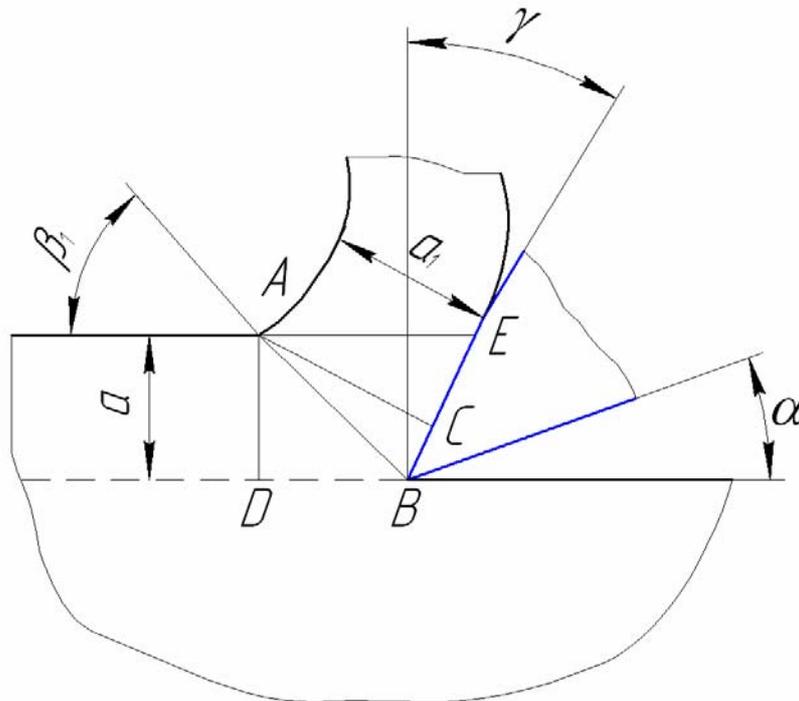


Рис. 3.31. Схема к определению коэффициента утолщения стружки

Из $\triangle ADB$ и $\triangle ACB$:

$$AC = a_1 = AB \cdot \cos(\beta_1 - \gamma), \quad AD = a = AB \cdot \sin \beta_1.$$

Тогда

$$K_a = \frac{a_1}{a} = \frac{AC}{AD} = \frac{AB \cdot \cos(\beta_1 - \gamma)}{AB \cdot \sin \beta_1} = \frac{\cos(\beta_1 - \gamma)}{\sin \beta_1}. \quad (3.20)$$

Для пользования формулой (3.20) необходимо знать угол β_1 , который определяется путем проведения довольно трудоемких экспериментов. Поэтому более удобной является формула, связывающая угол сдвига β_1 с коэффициентом утолщения стружки:

$$K_a = \frac{\cos \beta_1 \cdot \cos \gamma + \sin \beta_1 \cdot \sin \gamma}{\sin \beta_1} = \operatorname{ctg} \beta_1 \cdot \cos \gamma + \sin \gamma,$$

$$\operatorname{ctg} \beta_1 = \frac{K_a - \sin \gamma}{\cos \gamma} \quad \text{или} \quad \operatorname{tg} \beta_1 = \frac{\cos \gamma}{K_a - \sin \gamma}. \quad (3.21)$$

Как видно из формул (3.20) и (3.21), при оценке влияния переднего угла на деформацию следует учитывать и угол сдвига – по мере увеличения угла γ коэффициент K_a уменьшается, что связано с улучшением условий деформации и схода стружки. При увеличении скорости резания коэффициент K_a также уменьшается (см. рис. 3.31).

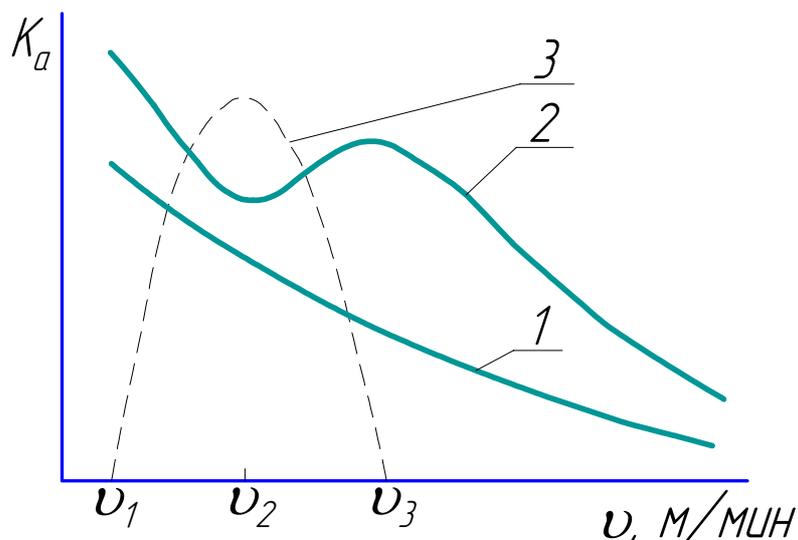


Рис. 3.32. Зависимость коэффициента утолщения стружки и высоты нароста от скорости резания при:
1 – резание без нароста; 2 – резание с наростом; 3 – высота нароста

Уменьшение коэффициента K_a при резании без нароста объясняется, с одной стороны, отставанием скорости деформации от скорости резания, что приводит к уменьшению зоны первичной деформации и степени сжатия срезаемого слоя, а, с другой стороны, с увеличением скорости резания растет затрачиваемая энергия и тепловыделение, что уменьшает прочность обрабатываемого материала и коэффициент трения стружки о переднюю поверхность лезвия инструмента.

При резании с наростом в диапазоне скоростей $v_1 \dots v_2$ наблюдается снижение деформации за счет увеличения высоты нароста, увеличения переднего угла и улучшения условия резания. В диапазоне $v_2 \dots v_3$ высота нароста уменьшается, что приводит к уменьшению переднего угла, ухудшению условий резания и повышению пластических деформаций. При значениях скорости резания больших v_3 степень пластической деформации снижается за счет роста температуры резания.

Наибольшее влияние на K_a оказывает толщина срезаемого слоя (рис. 3.33), причем при малых толщинах среза (для углеродистых сталей $a_i \leq 0,2 \dots 0,3$ мм) с увеличением a наблюдается резкое уменьшение усадки стружки. При больших толщинах усадка стружки стабилизируется. Объясняется это тем, что малые толщины среза сопоставимы по величине с радиусом округления режущей кромки, способствующим увеличению деформации срезаемого слоя.

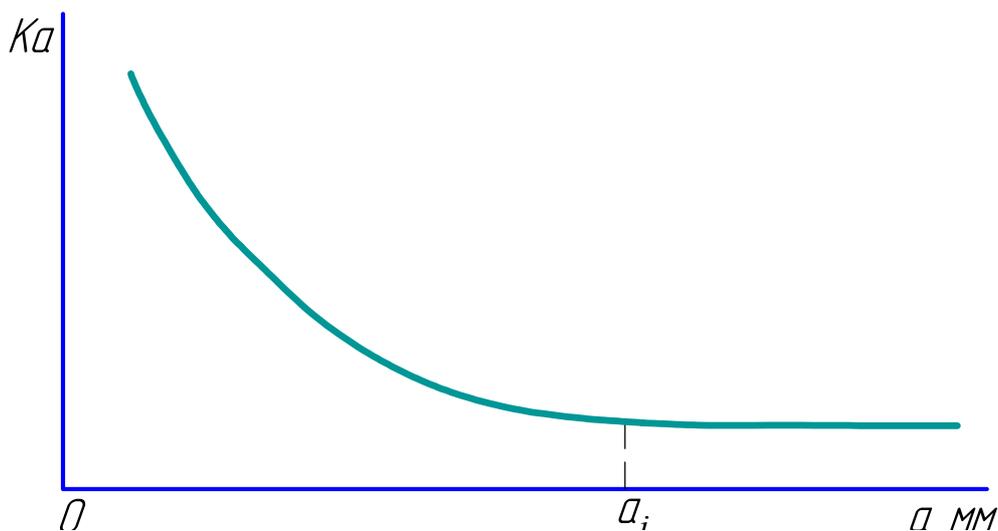


Рис. 3.33. Зависимость коэффициента утолщения стружки от толщины срезаемого слоя

3.5.6. Относительный сдвиг и скорость сдвига

Более полно и точно деформацию срезаемого слоя по сравнению с коэффициентами K_a , K_b , K_l отражает *относительный сдвиг* ε . Сдвиг – это вид деформированного состояния малого объема тела, при котором деформация вдоль одной из трех главных осей отсутствует, вдоль второй главной оси наблюдается уменьшение, а вдоль третьей главной оси – равное ему увеличение объема тела (рис. 3.34, а). Разновидностями сдвига являются простой сдвиг и чистый сдвиг (рис. 3.34, соответственно б и в). При *простом сдвиге тела* деформация заключается в смещении всех точек тела в направлении параллельном только одной оси на расстояние, пропорциональное расстоянию точки тела от этой оси в направлении второй оси. В результате простого сдвига квадрат $abcd$ превращается в равновеликий параллелограмм $ab'c'd'$ с теми же размерами основания и высоты, что и у исходного квадрата. Расстояние ΔS , на которое верхняя сторона квадрата сдвинулась относительно нижней, называется *абсолютным сдвигом*. Мемой деформации простого сдвига является *относительный сдвиг*, равный отношению абсолютного сдвига к стороне квадрата, т.е. $\varepsilon = \Delta S / \Delta X$.

При *чистом сдвиге тела* происходит равномерное укорочение вдоль одной оси Z и равномерное удлинение вдоль другой оси X , перпендикулярной к первой. Квадрат $abcd$ превращается в конгруэнтный ромб $ab'c'd'$ при неизменном объеме тела.

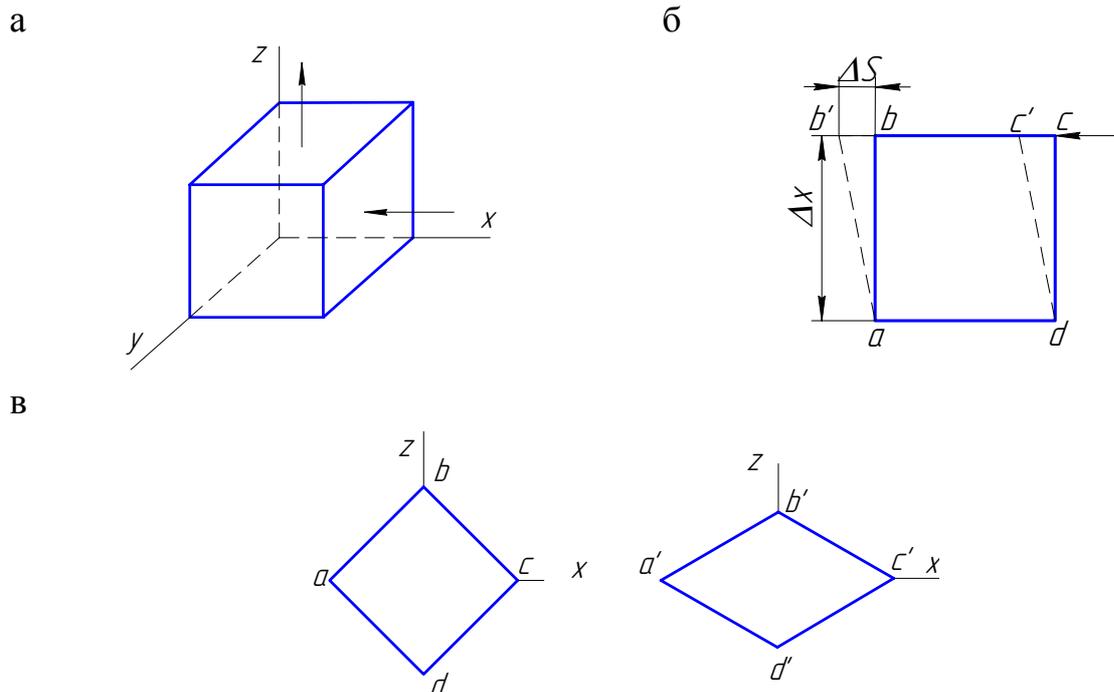


Рис. 3.34. Схемы деформации тела:
 а – сдвиг; б – простой сдвиг; в – чистый сдвиг

Рассмотрим пластические деформации при резании (рис. 3.35).

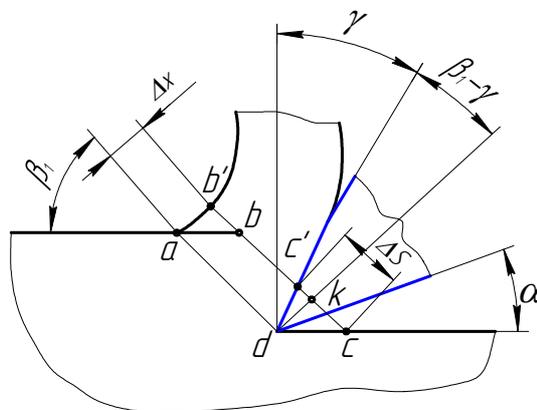


Рис. 3.35. Схема к определению относительного сдвига

При перемещении лезвия инструмента из точки c в точку d элемент срезаемого слоя $abcd$ произвольной толщины ΔX сдвигается и превращается в элемент стружки $ab'c'd'$. Отрезок cc' характеризует абсолютную величину сдвига ΔS . Тогда относительный сдвиг будет равен:

$$\varepsilon = \frac{\Delta S}{\Delta X} = \frac{cc'}{dk} = \frac{c'k + kc}{dk}. \quad (3.22)$$

Выразим каждый отрезок числителя формулы (3.22) через dk . Из $\Delta dc'k$ и Δdkc :

$$\varepsilon = \frac{dk \cdot \operatorname{tg}(\beta_1 - \gamma) + dk \cdot \operatorname{ctg}\beta_1}{dk} = \operatorname{tg}(\beta_1 - \gamma) + \operatorname{ctg}\beta_1. \quad (3.23)$$

Формула (3.23), связывающая относительный сдвиг с углом сдвига и передним углом, имеет те же особенности, что и формула (3.20), т.е. она трудоемка для практического использования, и при оценке влияния переднего угла на относительный сдвиг следует учитывать как прямое влияние переднего угла, так и его косвенное влияние через угол β_1 . Более удобной формулой для расчета относительного сдвига является формула, связывающая относительный сдвиг с коэффициентом K_a . Проведем некоторые преобразования формулы (3.23):

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{\operatorname{tg}\beta_1 - \operatorname{tg}\gamma}{1 + \operatorname{tg}\beta_1 \cdot \operatorname{tg}\gamma} + \frac{1}{\operatorname{tg}\beta_1}, \\ \text{так как } \operatorname{tg}\beta_1 &= \frac{\cos\gamma}{k_a - \sin\gamma}, \text{ то} \\ \varepsilon &= \frac{\frac{\cos\gamma}{k_a - \sin\gamma} - \frac{\sin\gamma}{\cos\gamma}}{1 + \frac{\cos\gamma}{k_a - \sin\gamma} \cdot \frac{\sin\gamma}{\cos\gamma}} + \frac{k_a - \sin\gamma}{\cos\gamma} = \\ &= \frac{\cos^2\gamma - k_a \cdot \sin\gamma + \sin^2\gamma}{k_a \cdot \cos\gamma - \sin\gamma \cdot \cos\gamma + \cos\gamma \cdot \sin\gamma} + \frac{k_a - \sin\gamma}{\cos\gamma} = \\ &= \frac{1 - k_a \cdot \sin\gamma}{k_a \cdot \cos\gamma} + \frac{k_a - \sin\gamma}{\cos\gamma} = \\ &= \frac{1 - k_a \cdot \sin\gamma + k_a^2 - k_a \cdot \sin\gamma}{k_a \cdot \cos\gamma} = \frac{k_a^2 - 2k_a \cdot \sin\gamma + 1}{k_a \cdot \cos\gamma}. \end{aligned} \quad (3.24)$$

Если подставить в формулу (3.24) значения $\gamma = 0^\circ$ и $K_a = 1$, то получим $\varepsilon = 2$. Т.е., при кажущемся по определению K_a отсутствию деформации, относительный сдвиг имеет значение больше единицы, что свидетельствует о более полном и точном отражении им деформации в зоне резания.

Скорость v_τ , с которой осуществляется сдвиг по плоскости сдвига, можно определить из рис. 3.36. Разложив вектор скорости резания v на векторы скоростей сдвига v_τ и трения v_F по передней поверхности, будем иметь:

$$\frac{v_\tau}{\sin(90^\circ - \gamma)} = \frac{v}{\sin\delta}; \quad \frac{v_\tau}{\cos\gamma} = \frac{v}{\cos(\beta_1 - \gamma)}.$$

Отсюда скорость сдвига:

$$v_{\tau} = v \cdot \frac{\cos \gamma}{\cos(\beta_1 - \gamma)}. \quad (3.25)$$

Скорость деформации v_{ε} , равную отношению относительной деформации к времени деформации, можно определить следующим образом. Время деформации равно величине абсолютного сдвига ΔS , поделенной на скорость сдвига v_{τ} . Тогда скорость деформации

$$v_{\varepsilon} = \varepsilon / \Delta S / v_{\tau} = v_{\tau} / \Delta X. \quad (3.26)$$

В настоящее время отсутствуют точные сведения о численной величине слоя ΔX , в котором протекает деформация. Однако приближенные расчеты позволяют утверждать, что скорости деформации при резании очень велики, и достигают значений порядка $10^4 \dots 10^6$ 1/с. Таким образом, процесс резания характеризуется не только очень высокой степенью деформации, но и огромными скоростями деформации.

Скорость стружки v_c по величине равна скорости трения v_F (см. рис. 3.36), т.е.:

$$\frac{v_c}{\sin \beta_1} = \frac{v}{\sin \delta} = \frac{v}{\cos(\beta_1 - \gamma)}; \quad v_c = \frac{v}{\frac{\cos(\beta_1 - \gamma)}{\sin \beta_1}},$$

но отношение $\frac{\cos(\beta_1 - \gamma)}{\sin \beta_1}$ равно коэффициенту K_{ℓ} , а поэтому:

$$v_c = \frac{v}{K_{\ell}}. \quad (3.27)$$

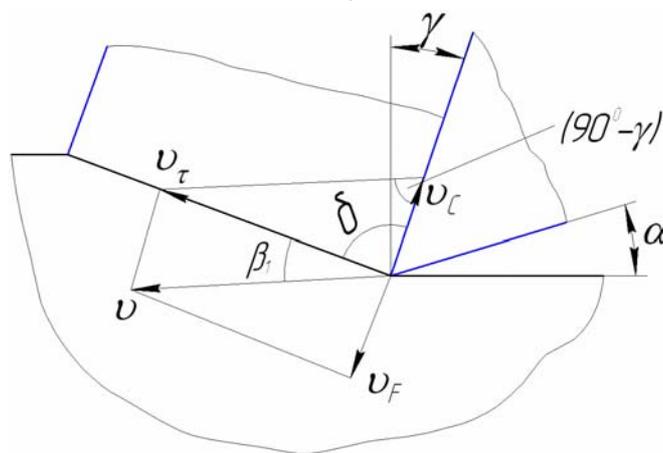
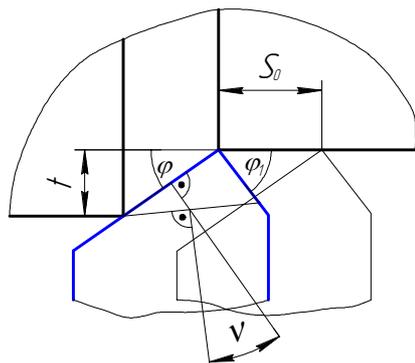


Рис. 3.36. Схема к определению скоростей сдвига и трения

Из формулы (3.28) следует, что скорость стружки всегда меньше скорости резания, увеличиваясь по мере уменьшения коэффициента усадки стружки.

При свободном прямоугольном резании скорости v , v_τ и v_c рассматриваются в плоскости перпендикулярной линии, соединяющей точки на режущих кромках, определяемых величинами глубины резания и подачи (рис. 3.37). Эта плоскость называется *плоскостью стружкообразования*, а угол между ней и главной секущей плоскостью называется *углом схода стружки* ν .

а



б

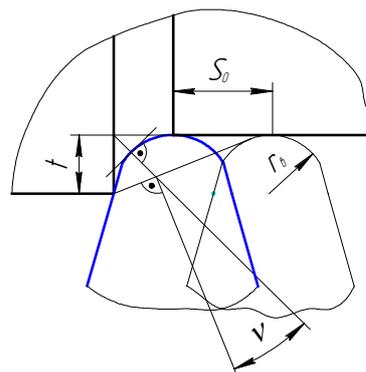


Рис. 3.37. Схемы к расчету угла схода стружки при точении острозаточенным резцом (а) и резцом с радиусом вершины (б)

При работе острозаточенным резцом с передним углом равным 0° (рис. 3.37, а):

$$\nu = \frac{\pi}{2} - \varphi - \arctg \left[\left(t - \frac{\delta_0}{\operatorname{ctg}\varphi + \operatorname{ctg}\varphi_1} \right) / \left(t \cdot \operatorname{ctg}\varphi + \frac{S_0 \cdot \operatorname{ctg}\varphi_1}{\operatorname{ctg}\varphi + \operatorname{ctg}\varphi_1} \right) \right], \quad (3.28)$$

а при работе резцом с радиусом округления режущей кромки (рис. 3.7, б):

$$\nu = \frac{\pi}{2} - \varphi - \arctg \left[\left(t - r_b + \frac{\sqrt{4r_b^2 + S_0^2}}{2} \right) / \left(t \cdot \operatorname{ctg}\varphi + r_b \cdot \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} + \frac{S_0}{2} \right) \right]. \quad (3.29)$$

Если $\gamma \neq 0$, то угол схода стружки:

$$\nu_\gamma = (\pi/2 - \varphi - \nu) \cdot [\cos(40 \cdot \operatorname{tg}\gamma - \operatorname{tg}\nu)]^k, \quad (3.30)$$

где $k = 20$ при $\gamma \geq 0^\circ$, $k = -20$ при $\gamma \leq 0^\circ$.

Из существующих *методов экспериментального определения показателей деформации срезаемого слоя* можно выделить два наиболее простых и распространенных – это метод измерения параметров стружки и ее корня и весовой метод.

Измерение толщины a_1 и ширины b_1 стружки производится в зависимости от требуемой точности с помощью или инструментального мик-

роскопа, или микрометра, или штангенциркуля. Длина стружки l_1 измеряется с помощью проволоки или нити по ее гладкой прирезцовой поверхности. Толщина и ширина срезаемого слоя определяются по известным формулам (3.4) и (3.5). Например, при точении

$$a = S_0 \cdot \sin \varphi, \quad b = t / \sin \varphi,$$

где S_0 – подача, мм/об; t – глубина резания, мм; φ – угол в плане лезвия, град. Длина пути, пройденная резцом, определяется из выражения

$$l = \pi \cdot d / 2 - c,$$

где d – диаметр заготовки, мм; c – ширина продольного паза на заготовке, мм.

Для определения угла сдвига β_1 получают корень стружки, представляющий собой часть срезаемого слоя с неотделенной стружкой. По шлифу корня стружки на инструментальном микроскопе определяют угол наклона предполагаемой плоскости сдвига. Измеренные параметры стружки и ее корня позволяют по приведенным выше формулам (3.20) и (3.21) рассчитать коэффициенты K_a , K_b , K_l .

При весовом методе используется соотношение $K_l = l/l_1 = a_1 b_1 / ab$, в котором площадь поперечного сечения стружки определяется путем взвешивания стружки небольшой длины l'_1 на аналитических весах и расчета по формуле

$$a_1 \cdot b_1 = Q \cdot 10^3 / l'_1 \cdot p,$$

где Q – вес стружки, кГ; p – удельный вес обрабатываемого материала, кГ/м³. Так как $a \cdot b = S \cdot t$, то $K_l = Q \cdot 10^3 / l'_1 \cdot p \cdot S \cdot t$. Следует отметить, что величины K_l , найденные весовым методом и путем измерения параметров стружки или ее корня, близки между собой как для сливных, так и для элементных стружек.

3.6. Контактные процессы при резании

Процессы, происходящие на контактных поверхностях лезвия инструмента, заготовки и стружки, вследствие высоких скоростей деформации срезаемого слоя, давления и температур в зоне резания имеют некоторые особенности по сравнению с обычными контактными процессами трения деталей машин. В этих процессах можно выделить:

1. Механическое срезание макро- и микронеровностей на контактных поверхностях.
2. Адгезию (схватывание) инструментального и обрабатываемого материалов.

3. Диффузию (перенос) одного материала в другой на макро- (налипы, наволакивания) и микро- (фазовые превращения, текстуры, образование новых структур) уровнях.

4. Адсорбцию (поглощение вещества из газовой или жидкой среды поверхностью тела) и химические реакции между элементами контактных поверхностей и внешней среды.

5. Электростатические и электромагнитные явления.

Контактные процессы происходят в тонком слое, называемом *граничным слоем*. Граничный слой служит своего рода основой для других контактных процессов, например, для образования наростов, изменения условий трения и изнашивания и т.д.

3.6.1. Площадки контакта и напряжения в зоне деформации

Контактные процессы в зоне деформации в основном связаны с передней и задней поверхностями лезвия инструмента (рис. 3.38). На передней поверхности лезвия выделяют участок OD пластического контакта и участок DF упругого контакта со стружкой.

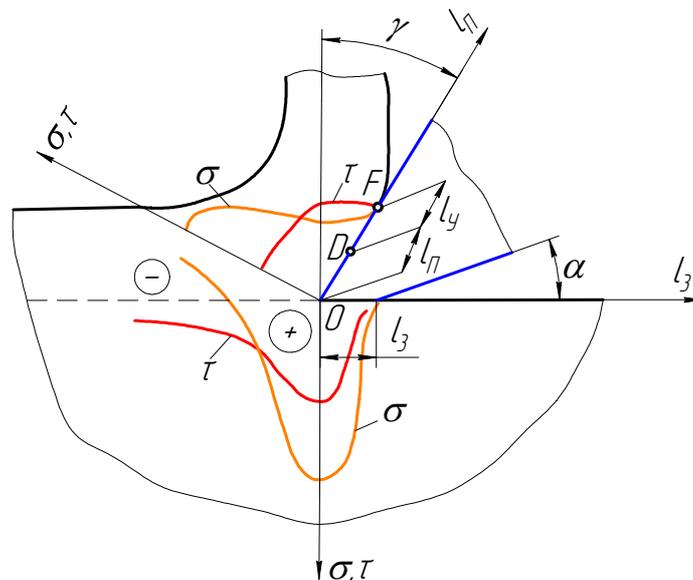


Рис. 3.38. Схема площадок контакта и напряжений в зоне стружкообразования

Длина пластического контакта зависит от переднего угла инструмента, толщины срезаемого слоя и коэффициента усадки стружки и может быть определена по эмпирической зависимости:

$$l_{II} = a[K_l(1 - \operatorname{tg}\gamma) + \operatorname{sec}\gamma], \quad (3.31)$$

где a – толщина срезаемого слоя;

K_l – коэффициент укорочения стружки;

γ – передний угол лезвия.

Из формулы (3.31) видно, что l_n растет при увеличении K_l и a и уменьшается при увеличении угла γ . Отношение l_n/l_{nl} не превышает 0,7 и для конструкционных материалов чаще всего составляет 0,5.

С площадками контакта l_{nl} и l_y на передней поверхности лезвия в основном связаны деформационные процессы в зонах вторичной и первичной деформаций (см. рис. 3.30), а также процессы формирования стружки. Площадка контакта l_z по задней поверхности лезвия связана в основном с процессами изнашивания инструмента и формирования обработанной поверхности.

Сложный характер контактных процессов сказывается на распределении контактных напряжений на передней и задней поверхностях лезвия инструмента и на поверхности сдвига. Распределение нормальных контактных напряжений σ на передней и задней поверхностях лезвия подчиняется экспоненциальному закону, т.е. вблизи режущей кромки напряжения имеют большие значения, достигающие предела прочности инструментального материала, и на удалении от нее по длине l_n и l_z напряжения резко уменьшаются до нуля в точках отрыва стружки и заготовки от соответственно передней и задней поверхностей инструмента. Касательные контактные напряжения τ на участке OD пластического контакта стружки с передней поверхностью лезвия имеют постоянные значения и уменьшаются до нуля на участке DF упругого контакта. Касательные напряжения τ у задней поверхности l_z имеют экспоненциальный закон распределения с максимумом вблизи режущей кромки.

Распределение нормальных напряжений в плоскости сдвига характеризуется большими значениями растягивающих напряжений вблизи режущей кромки и резким падением их с переходом в область сжатия по мере удаления от кромки. Растягивающие напряжения у режущей кромки могут приводить к трещинообразованию в обрабатываемом материале, облегчающему, с одной стороны, процесс резания, а, с другой стороны, создающему скрытую опасность поломки детали в процессе эксплуатации.

3.6.2. Трение на контактных площадках

Существование двух участков контакта на передней поверхности лезвия инструмента приводит к двойкой природе трения при резании. На участке l_{nl} (см. рис. 3.38 и 3.30) расположен заторможенный слой, в пределах которого стружка движется не по передней поверхности, а по заторможенному слою, и сопротивление, оказываемое движению стружки, оп-

ределяется сопротивлением сдвига в контактном слое стружки. На этом участке внешнее трение скольжения отсутствует и заменяется «внутренним» трением между отдельными слоями стружки. На участке l_y стружка контактирует непосредственно с передней поверхностью. Здесь осуществляется внешнее трение скольжения, и сопротивление движению стружки определяется силой трения между стружкой и передней поверхностью. Кроме того, как было показано ранее, контактными процессами при резании присущи механические, адгезионные, диффузионные и химические компоненты, которые усложняют известные представления о трении скольжения двух тел.

Согласно закону Амонтона – Кулона коэффициент внешнего трения скольжения равен $f = F / N = \tau / \sigma$, где F – сила трения, N – сила нормального давления, τ – касательные напряжения, σ – нормальные напряжения и отражает адгезионную составляющую контактных процессов. При резании кроме адгезионной компоненты трения следует учитывать также механическую компоненту. В настоящее время средний коэффициент трения при резании описывается зависимостью $f_{cp} = f_m + f_a$, где f_m – постоянная механическая составляющая коэффициента трения, зависящая от шероховатости поверхности (коэффициент скольжения); f_a – переменная адгезионная составляющая коэффициента трения.

Значения f_{cp} при резании колеблются в пределах 1,2 – 3,0 и определяются обычно экспериментально с использованием «разрезного резца» или аналитически, исходя из схемы действия сил резания на инструменте.

3.6.3. Наростообразование при резании

При резании большинства конструкционных материалов возникает явление, называемое наростообразованием. *Нарост* – это часть материала заготовки, образующаяся в застойной зоне и связанная с поверхностями и режущей кромкой лезвия инструмента (рис. 3.39). Нарост формируется в условиях высоких контактных давлений и температур, поэтому имеет высокую твердость и прочность, превосходящие в 3 ... 4 раза соответствующие характеристики обрабатываемого материала. При оценке параметров нароста выделяют передний угол нароста γ_n , высоту h_n , радиус r_n и основание нароста l_n .

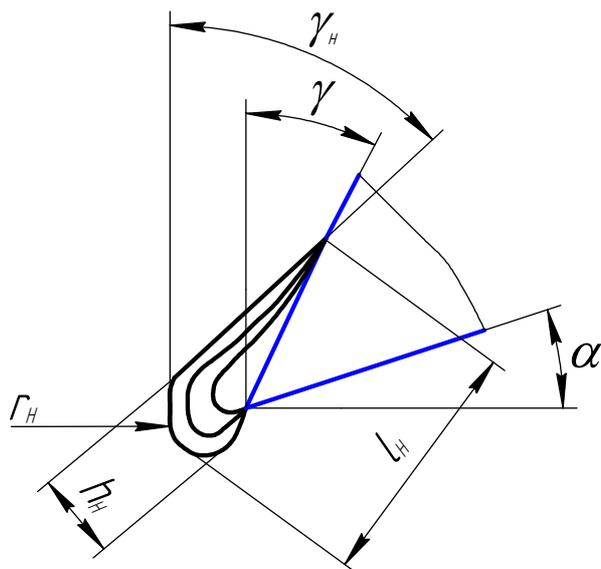


Рис. 3.39. Форма и параметры нароста

Нарост не постоянен в процессе резания. Он появляется и исчезает с частотой от нескольких раз до нескольких тысяч раз в минуту. При определенных условиях, например, при образовании сливной стружки нарост может оставаться на поверхностях лезвия и после прекращения резания.

В процессе образования нароста выделяют четыре основные стадии (см. рис. 3.30 и 3.39):

1. Разрыв волокон стружки на участке контакта OF в направлении поперечном движению стружки.
2. Рост размеров нароста на участке OD.
3. Достижение максимальных размеров нароста.
4. Срыв нароста и переход к первой стадии его образования.

На размеры нароста основное влияние оказывают механические свойства обрабатываемого материала, скорость резания, толщина срезаемого слоя, передний угол лезвия инструмента, смазочно-охлаждающие жидкости. К наростообразованию склонны углеродистые и конструкционные стали, не склонны – медь, латунь, бронза, олово, свинец, титановые сплавы и легированные стали.

Наиболее сложное влияние на размеры нароста оказывает скорость резания (рис. 3.40):

1. При небольших значениях скоростей резания ($v \leq 0,5 \dots 1$ м/мин) нарост не образуется, так как температура и давление в зоне стружкообразования невелики и не способствуют схватыванию материала заготовки с поверхностями лезвия.

2. В диапазоне скоростей $v_1...v_2$ (при обработке конструкционных сталей $v = 15 \dots 30$ м/мин) наблюдается увеличение высоты нароста, что связано в основном с ростом температуры резания.

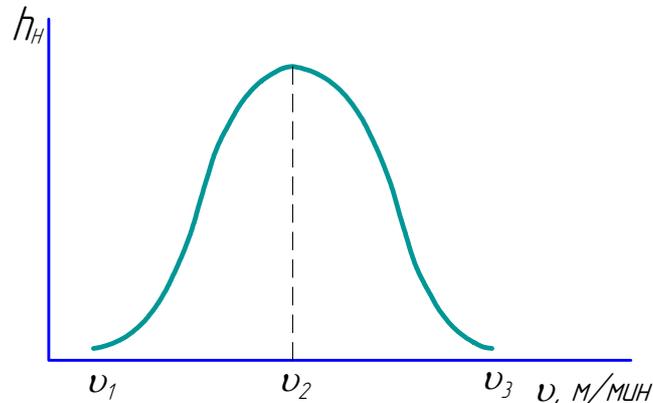


Рис. 3.40. Зависимость высоты нароста от скорости резания

3. В диапазоне скоростей $v_2...v_3$ ($v = 80...100$ м/мин) высота нароста уменьшается, что объясняется достаточно большими значениями температуры резания, приводящими к размягчению приконтактных слоев материала и созданию ювенильных поверхностей, не способствующих образованию нароста.

Нарост при резании играет как положительную, так и отрицательную роль. Он увеличивает передний угол лезвия, облегчая тем самым процесс резания, снижает силу и температуру резания, уменьшает степень деформации стружки, защищает переднюю и заднюю поверхности и режущую кромку лезвия от непосредственного контакта с обрабатываемым материалом и тем самым снижает износ и повышает стойкость инструмента. С другой стороны, образование нароста способствует возникновению вибрации в зоне резания и снижению качества обработанной поверхности. Причины этих отрицательных явлений лежат в периодичности формирования и срыва нароста, изменении глубины резания за счет выступающей части нароста, наличии на обработанной поверхности чешуйчатых продуктов разрушения нароста. Следовательно, при черновых операциях обработки надо стремиться к образованию нароста, а при чистовых – к его устранению. Регулирование процессом наростообразования может осуществляться путем подбора скорости резания, подачи, геометрии инструмента, шероховатости поверхностей инструмента, смазочно-охлаждающих средств, инструментальных материалов. Например, увеличение переднего угла лезвия

инструмента, уменьшение подачи (толщины срезаемого слоя), снижение шероховатости поверхностей инструмента, применение СОЖ и инструментальных материалов, не имеющих одинаковых химических элементов с обрабатываемым материалом, способствуют исключению наростообразования.

3.7. Динамика резания

3.7.1. Сила резания и ее составляющие

В связи с возникающими в зоне резания деформациями, трением и напряжениями инструмент испытывает сопротивление резанию, выражаемое действием на него сил резания. Знание сил резания необходимо, во-первых, для объяснения других явлений процесса резания и, во-вторых, для расчета инструментов, приспособлений и станков при их проектировании.

В процессе резания на переднюю и заднюю поверхности лезвия инструмента действуют нормальные силы давления N_n и N_z и F_n и F_z , которые рассматриваются при рассечении зоны резания главной секущей плоскостью (рис. 3.41). Если сложить эти силы геометрически, то получим равнодействующую силу сопротивления резанию P . Экспериментально измерить силы N_n , N_z , F_n , F_z и P затруднительно, потому что в общем случае они являются внутренними силами системы резания и имеют неопределенное пространственное расположение.

Для облегчения экспериментального определения сил резания равнодействующую силу P раскладывают на составляющие по осям, направление которых определено кинематической схемой резания. В главной секущей плоскости силу P раскладывают на главную составляющую P_z , действующую по направлению оси OZ вдоль вектора скорости главного движения v , и на нормальную составляющую P_n по нормали n к поверхности резания. В основной плоскости составляющую P_n раскладывают на осевую составляющую P_x , действующую вдоль оси главного вращательного движения OX , и радиальную составляющую P_y вдоль оси OY по радиусу главного вращательного движения (см. рис. 3.41). Зная составляющие P_z , P_y , P_x , рассчитывают величину равнодействующей силы резания по формуле:

$$P = \sqrt{P_z^2 + P_y^2 + P_x^2} \quad (3.32)$$

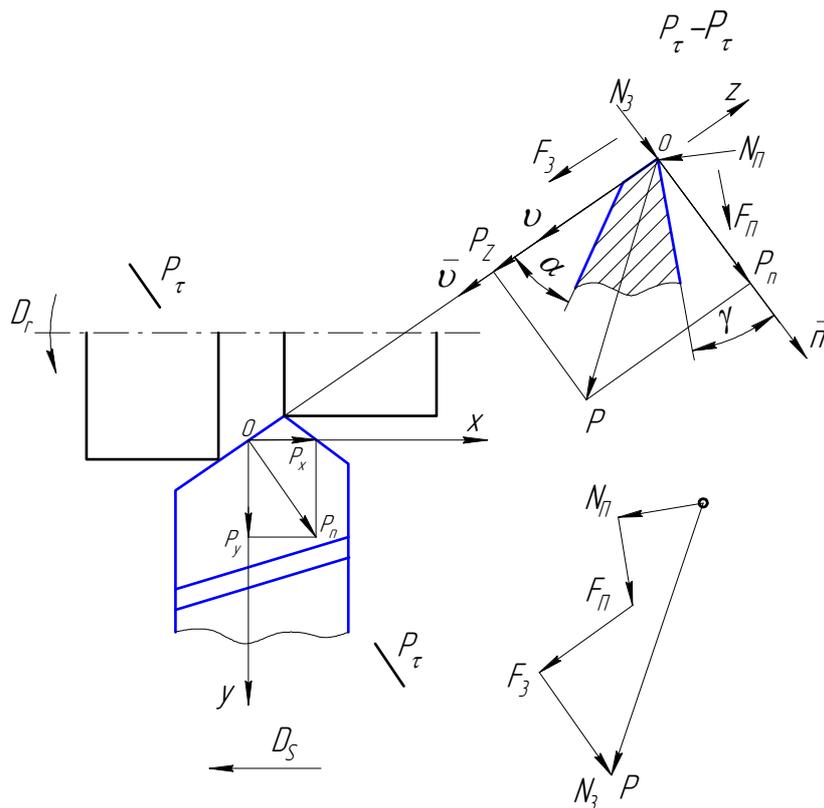


Рис. 3.41. Схема действия силы резания и ее составляющих

Составляющую P_z называют главной в связи с тем, что она определяет мощность привода главного движения и крутящий момент на шпинделе станка, влияет на прочность механизма коробки скоростей и инструмента, изгиб детали, на другие параметры обработки. Например, при лезвийной обработке численные соотношения между составляющими силы резания следующие: $P_x = (0,2 \dots 0,5)P_z$, $P_y = (0,3 \dots 0,6)P_z$.

3.7.2. Работа и мощность резания

Работа, затрачиваемая на процесс резания, расходуется на пластическую и упругую деформацию срезаемого слоя (55 %), трение на передней (35 %) и задней (10 %) поверхностях инструмента. В общем случае работа резания определяется действием составляющих силы резания:

$$A_{рез} = A_{PZ} + A_{PY} + A_{PX} = P_Z l_Z + P_Y l_Y + P_X l_X \cong P_Z l_Z, \quad (3.33)$$

где l_Z, l_Y, l_X – расстояния,

тогда мощность резания

$$N_{рез} = A_{рез} / \tau = P_Z \cdot l_Z / \tau = P_Z \cdot v, \quad (3.34)$$

где τ – время.

3.7.3. Аппаратура для измерения составляющих силы резания

Аппаратура, предназначенная для измерения силы резания, называется динамометрами. По количеству измеряемых составляющих силы резания динамометры делятся на одно-, двух-, и трехкомпонентные; по принципу действия применяемых в них датчиков – на механические, гидравлические и электрические. Конструктивно динамометры состоят из датчика, воспринимающего нагрузку, деформацию или перемещение и преобразующего их в электрический сигнал; приемника, регистрирующего сигнал, и звеньев, связывающих датчик и приемник. При обработке заготовки 1 режущим инструментом 2 нагрузка воспринимается датчиком 3 и фиксируется прибором 4 (рис. 3.42).

В механических динамометрах (рис. 3.42, а) в качестве датчика 3 используется пружина, упругая пластина и т.п., по величине прогиба которых судят о величине составляющей силы резания. Прогиб измеряется индикатором часового типа 4. Эти динамометры просты по конструкции, надежны, но в силу большой инерционности применяются при небольших скоростях резания (2 ... 3 м/мин).

В гидравлических динамометрах (рис. 3.42, б) используются гидравлические месдозы (глицерин). О величине силы резания судят по давлению на манометре 4, создаваемому силой, давящей на поршень гидравлической месдозы 3. Эти динамометры так же, как и механические просты по конструкции и надежны в работе. К недостаткам следует отнести их большие габаритные размеры, невысокую точность, большую инерционность. Применяются эти динамометры при скоростях резания до 80 м/мин.

Наибольшее распространение получили электрические динамометры, в которых используются датчики, преобразующие деформацию или перемещение упругих элементов в электрический сигнал.

В качестве датчиков используются емкостные (рис. 3.42, в), индуктивные (рис. 3.42, г), пьезоэлектрические, магнитоупругие датчики и тензодатчики 3. Эти динамометры обладают высокой точностью, жесткостью, малой инерционностью, компактны и применяются практически при любых скоростях резания.

Примером электрических динамометров может служить универсальная динамометрическая установка (рис. 3.43), которая состоит из динамометра датчика 1, усилителя электрических сигналов 2, приборного щита 3 и осциллографа 4. Динамометр-датчик включает жесткую плиту 1, на которой монтируется держатель для инструмента или детали 2 (рис. 3.44). Плита установлена на шестнадцати горизонтально и вертикально расположенных опорах 3, представляющих собой тонкостенные втулки на ножках-шарнирах. Такая конструкция опор обеспечивает восприятие нагрузки только вдоль оси опоры, а их количество и расположение позволяют фиксировать составляющие силы резания P_x , P_y , крутящий момент в горизон-

тальной плоскости и составляющую P_z в вертикальной плоскости. На образующие втулок опор наклеены электросопротивления (тензодатчики), соединенные в соответствующие электрические схемы и имеющие выводы на усилитель 2, приборный щит 3 и осциллограф 4 (см. рис. 3.43).

При резании, действующие на инструмент или заготовку силы деформируют опоры как наименее жесткие детали динамометра. Наклеенные на них тензодатчики также деформируются, что приводит к изменению их сопротивления и величины проходящего тока. Этот сигнал с измерительной схемы поступает на усилитель 2, усиливается и затем передается на микроамперметры приборного щита 3 и осциллограф 4, с помощью которых регистрируются показания динамометра-датчика 1 (см. рис. 3.43).

Для перевода величины электрического сигнала в единицы силы необходимо провести тарирование динамометра. Тарирование проводится с использованием стандартного динамометра путем нагружения через него динамометра-датчика силой, имитирующей действие составляющих силы резания P_x , P_y , P_z и крутящего момента $M_{кр}$, с помощью, например, механизма подач станка или специального устройства.

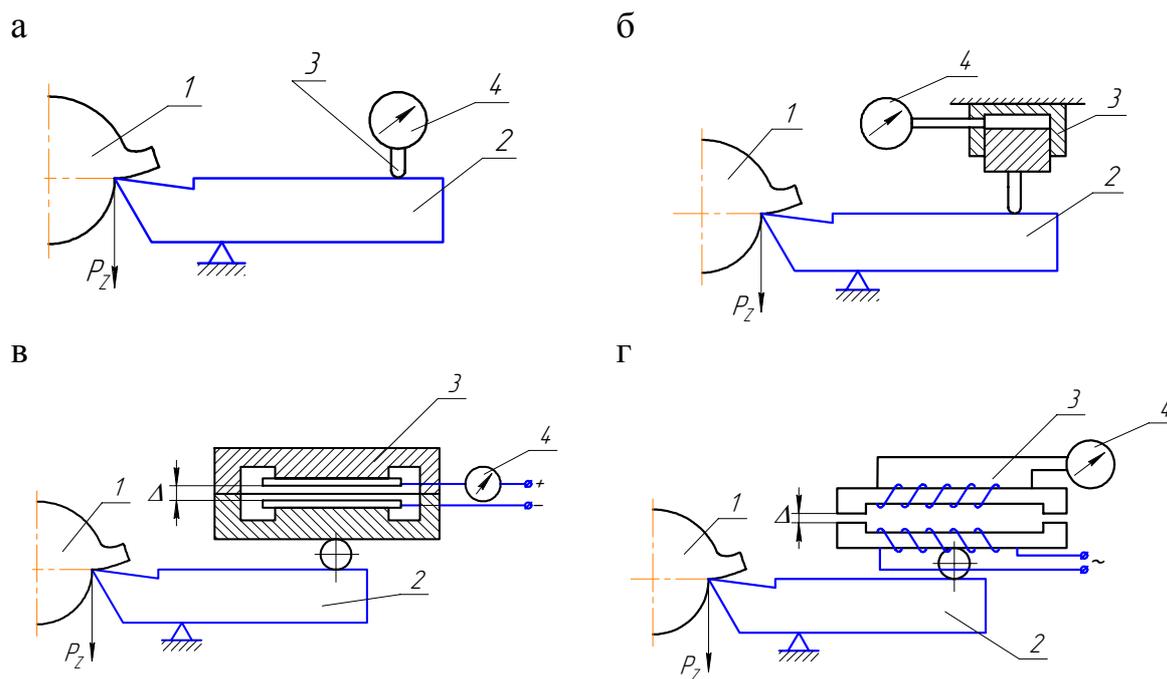


Рис. 3.42. Схемы динамометров:
а – механический; б – гидравлический; в – емкостной; г – индуктивный
1 – заготовка; 2 – режущий инструмент; 3 – датчик; 4 – прибор

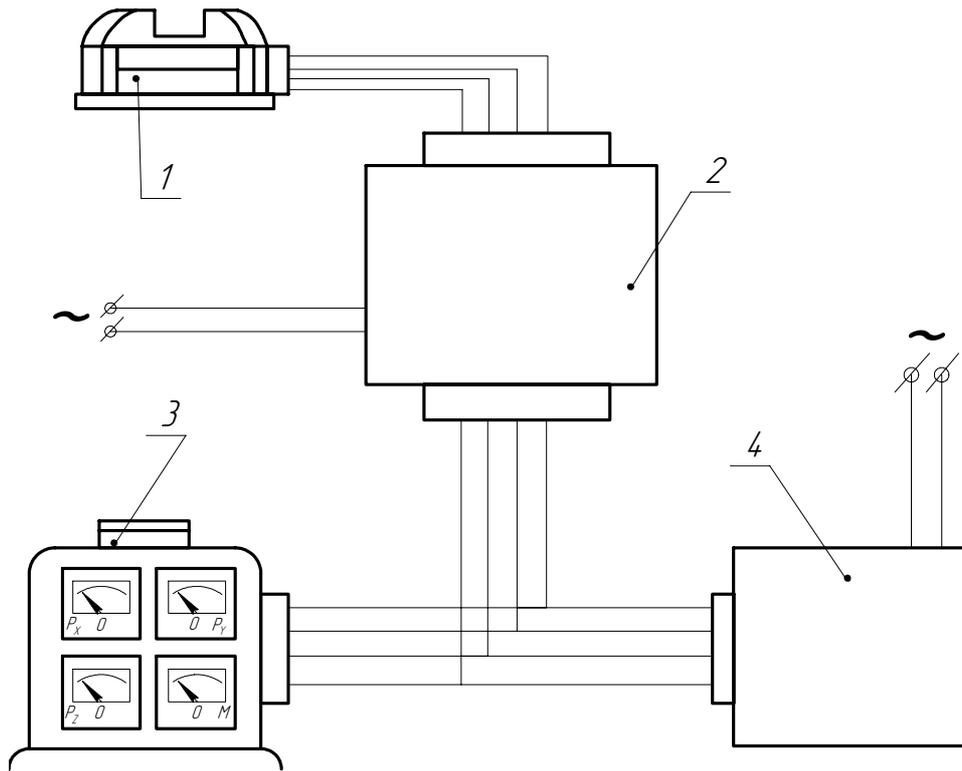


Рис. 3.43. Схема динамометрической установки:
 1 – динамометр-датчик; 2 – усилитель; 3 – приборный щит; 4 – осциллограф

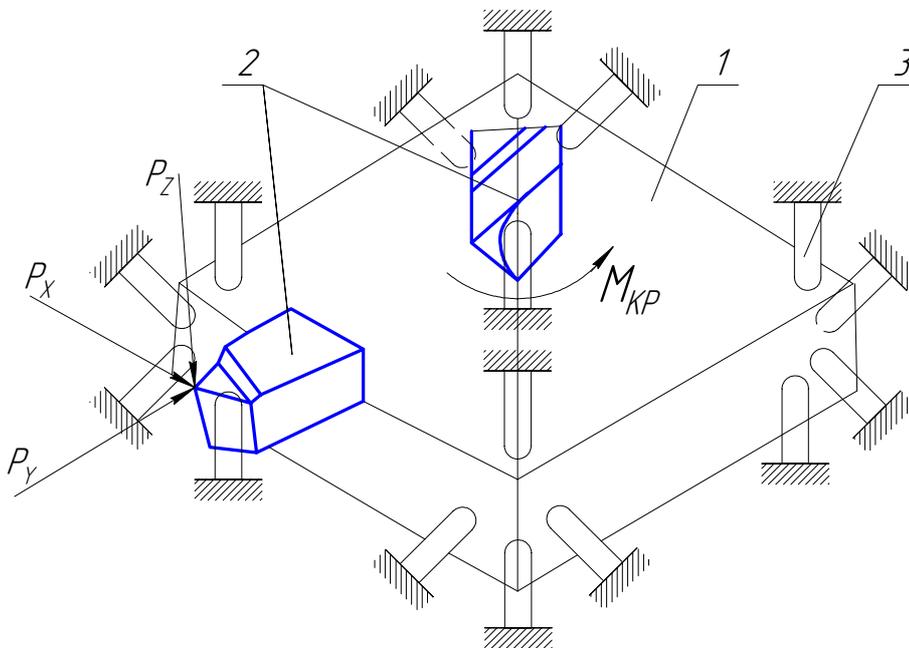


Рис. 3.44. Схема тензометрического динамометра-датчика:
 1 – плита; 2 – инструмент; 3 – опора

3.7.4. Аналитическое определение силы резания

При теоретическом определении силы резания исходят из различных представлений о процессе резания. Например, процесс взаимодействия инструмента и заготовки рассматривают как механическую систему, как процесс скалывания, сдвига или сжатия срезаемого слоя, как процесс течения жидкости и т.п. В настоящее время насчитывается порядка двадцати формул для расчета главной составляющей силы резания, отличающихся различной степенью приближения к реальному процессу резания и точностью. Рассмотрим некоторые из этих подходов и расчетные формулы.

Расчет силы резания, исходя из условия равновесия инструмента

Из условия равновесного состояния лезвия инструмента в процессе резания (рис. 3.45) следует, что сила резания P равна сумме проекций нормальных сил и сил трения, приложенных к передней и задней поверхностям лезвия, на прямую, вдоль которой действует сила P :

$$P = N_n \cdot \cos \gamma + f_{cp} \cdot N_n \cdot \sin \gamma + f_{cp} \cdot N_3.$$

В свою очередь $N_3 = N_n \cdot \sin \gamma - f_{cp} \cdot N_n \cdot \cos \gamma$,

тогда $P = N_n \cdot \cos \gamma + f_{cp} \cdot N_n \cdot \cos \gamma + f_{cp} \cdot N_n \cdot \sin \gamma - f_{cp}^2 \cdot N_n \cdot \cos \gamma$

$$\text{или} \quad P = N_n \left[(1 - f_{cp}^2) \cdot \cos \gamma + 2 f_{cp} \cdot \sin \gamma \right] \quad (3.35)$$

Формулу (3.35) впервые получил К.А. Зворыкин.

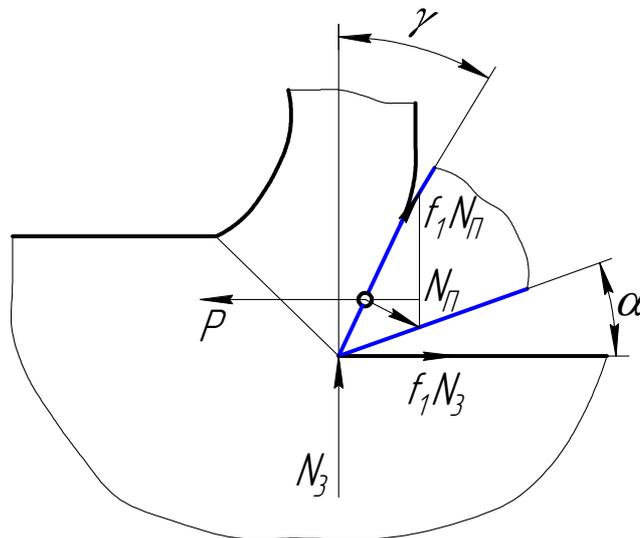


Рис. 3.45. Схема к расчету силы резания из условия равновесия инструмента

Расчет силы резания на основе теории пластического сжатия

Расчет основан на физическом законе политропного сжатия, согласно которому (рис. 3.46):

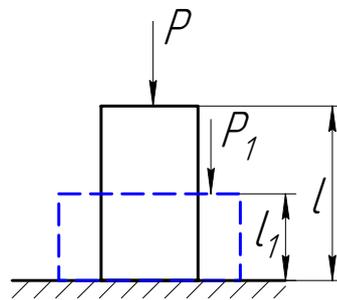
$$P \cdot l^m = P_1 \cdot l_1^m = \dots = const$$

где m – показатель политропы сжатия;

P и P_1 – сжимающая сила соответственно до и после сжатия образца;
 l и l_1 – высота образца соответственно до и после сжатия.

Сравнивая схемы простого сжатия образца (рис. 3.46, а) и сжатия срезаемого слоя в процессе резания (рис. 3.46, б), можно преобразовать политропы сжатия к условиям процесса резания. Для этого примем силу P_1 за силу резания, в результате которой образовалась стружка (за главную составляющую силы резания P_z), за силу P примем ту максимальную силу сопротивления срезаемого слоя, при которой начинаются пластические деформации сжатия срезаемого слоя.

а



б

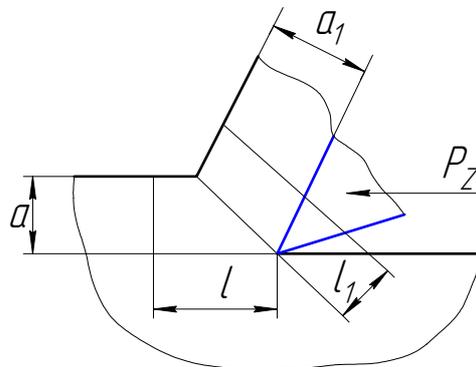


Рис. 3.46. Схемы к расчету силы резания на базе теории пластического сжатия:
 а – схема сжатия образца; б – схема сжатия срезаемого слоя

Выразим эту силу через нормальные напряжения в срезаемом слое и площадь сечения среза:

$$P_1 = P_z = P(l/l_1)^m = \sigma \cdot a \cdot b \cdot (l/l_1)^m .$$

Учитывая, что $l/l_1 = K_l$, и, используя экспериментально полученное выражение:

$$K_l = \frac{C_\kappa \cdot \delta^{uk}}{a^{yk} \cdot v^{zk}} ,$$

где δ – угол резания;

a – толщина срезаемого слоя;
 v – скорость резания;
 C_k – постоянный коэффициент, зависящий от прочих условий обработки, не указанных в формуле;

u_k, y_k, z_k – дробные показатели степени, получим:

$$P_z = \sigma \cdot a \cdot b \cdot K_\ell^m = \sigma \cdot a \cdot b \cdot \frac{C_k^m \cdot \delta^{m u_k}}{a^{m y_k} \cdot v^{z_k m}} = \sigma \cdot C_k^m \cdot \delta^{m u_k} \cdot a^{1 - m y_k} \cdot b \cdot v^{-m z_k}$$

или

$$P_z = C_{pz} \cdot \delta^{u_{pz}} \cdot a^{y_{pz}} \cdot b \cdot v^{z_{pz}}, \quad (3.36)$$

где $C_{pz} = \sigma \cdot C_k^m$, $u_{pz} = m \cdot u_k$, $y_{pz} = 1 - m y_k$, $z_{pz} = -m \cdot z_k$.

Формула (3.36) впервые получена А.Н. Челюсткиным и носит его имя. В этой формуле коэффициент C_{pz} выражает механические свойства обрабатываемого материала, так как включает в себя предел его прочности σ и прочие условия резания, учитываемые коэффициентом C_k . Формула (3.36) удобна для теоретического описания процесса резания при одинаковых площадях сечения срезаемого слоя, а также тем, что она включает геометрию инструмента в виде угла резания. Для практического применения на производстве формула (3.36) получала иную запись, в которой вместо параметров сечения срезаемого слоя a и b введены подача S и глубина резания t . Например, при точении $a = S \cdot \sin \varphi$ и $b = t / \sin \varphi$, тогда:

$$P_z = C_{pz} \cdot \delta^{u_{pz}} \cdot \frac{S^{y_{pz}} \cdot \sin^{y_{pz}} \varphi \cdot t}{\sin \varphi} \cdot v^{z_{pz}}.$$

Объединяя угловые параметры δ и $\sin \varphi$ и введя поправочный коэффициент K_{pz} , а также введя при глубине резания показатель x_{pz} для случаев несвободного резания, можно записать:

$$P_z = C_{pz} \cdot S^{y_{pz}} \cdot t^{x_{pz}} \cdot v^{z_{pz}} \cdot K_{pz}. \quad (3.37)$$

По аналогии

$$P_y = C_{py} \cdot S^{y_{py}} \cdot t^{x_{py}} \cdot v^{z_{py}} \cdot K_{py} \quad (3.38)$$

$$P_x = C_{px} \cdot S^{y_{px}} \cdot t^{x_{px}} \cdot v^{z_{px}} \cdot K_{px}, \quad (3.39)$$

где C_{px}, C_{py}, C_{pz} – коэффициенты, зависящие от вида обрабатываемого материала и других условий резания;

t, S и v – соответственно глубина, подача и скорость резания;

x_{pz}, y_{pz}, z_{pz} – показатели степени при соответствующих переменных;

K_{pz} , K_{py} , K_{px} – коэффициенты, учитывающие отличия условий обработки от тех, при которых были получены данные формулы.

Данные о численных значениях коэффициентов и показателей степеней приводятся в справочной литературе и чаще всего имеют следующие пределы изменений:

$$C_{pz} = 8...300; x_{pz} = 0,85...1,0; y_{pz} = 0,5...0,8; z_{pz} = -0,1...-0,3;$$

$$K_{pz} = 0,5...1,2.$$

Формулы (3.37) ... (3.39) имеют следующие достоинства:

1) выражают влияние элементов режима резания на составляющие силы резания; 2) удобны для экспериментального определения и практических расчетов. Их недостатки: 1) отсутствие физического смысла и несоблюдение правил размерности; 2) взаимосвязь постоянных величин.

Расчет силы резания через удельную силу

Для определения силы резания часто используется ее зависимость от площади сечения срезаемого слоя, как определяющей нагрузочной характеристики, и удельной силы резания:

$$P = q \cdot F \cdot K, \quad (3.40)$$

где q – удельная сила резания;
 F – площадь сечения срезаемого слоя;
 K – поправочный коэффициент.

Удельная сила резания представляется как функция прочностных свойств обрабатываемого материала, например, σ_g и показателей деформации срезаемого слоя, например, K_a . Она может быть определена при сжатии образца или резании с площадью срезаемого слоя, равной l . Поправочный коэффициент K учитывает отличия условий обработки в различных опытах и представляет собой произведение ряда коэффициентов, вносящих поправку, например, по геометрии лезвия, шероховатости его поверхностей, применению смазочно-охлаждающих жидкостей и т.д.

3.7.5. Влияние условий обработки на составляющие силы резания

Приведенные выше формулы для определения составляющих силы резания позволяют определить влияние на них различных факторов. Влияние элементов режима резания может быть оценено по численным значениям показателей степеней в формулах (3.37) ... (3.39). Для этого используется следующая методика эксперимента и обработки экспериментальных данных. Проводятся серии опытов с последовательным изменением одного из элементов режима резания t , S и v и измерением с помощью динамо-

метра составляющих силы резания P_z, P_y, P_x . В каждой серии опытов формула для расчета, например, составляющей силы резания будет иметь следующий вид: для серии глубины резания – $Pz_t = Cp_{Zt} \cdot t^{x_{pz}}$, где $Cp_{Zt} = Cp_z \cdot S^{y_{pz}} \cdot v^{z_{pz}}$; для серии подачи – $Pz_s = Cp_{Zs} \cdot S^{y_{pz}}$, где $Cp_{Zs} = Cp_z \cdot t^{x_{pz}} \cdot v^{z_{pz}}$; для серии скорости резания – $Pz_v = Cp_{Zv} \cdot v^{z_{pz}}$, где $Cp_{Zv} = Cp_z \cdot t^{x_{pz}} \cdot S^{y_{pz}}$. Аналогично вид имеют зависимости для P_y и P_x .

Установлено, что эти степенные зависимости составляющих силы резания в определенных диапазонах изменения t, S и v могут быть приведены к прямолинейным путем их логарифмирования. Например,

$$\begin{aligned} \lg Pz_t &= \lg Cp_{z_t} + x_{P_z} \lg t, \quad \lg Pz_s = \lg Cp_{z_s} + y_{P_z} \lg S, \\ \lg Pz_v &= \lg Cp_{z_v} + z_{P_z} \lg v. \end{aligned}$$

Графическая интерпретация этих зависимостей для конкретных условий обработки представлена на рис. 3.47. Степень влияния элементов режима резания на P_z оценивается по тангенсу угла наклона полученных прямых графиков: $x_{P_z} = \operatorname{tg} \alpha_t$, $y_{P_z} = \operatorname{tg} \alpha_s$, $z_{P_z} = \operatorname{tg} \alpha_v$. Как видно из графиков (рис. 3.47, а и б), с увеличением $t(b)$ и $S(a)$ составляющая силы резания P_z возрастает, причем пропорционально t , но отстает от увеличения S . Отставание роста силы резания от увеличения толщины среза можно объяснить возрастанием нагрузки на единицу длины лезвия, увеличением температуры резания, уменьшением сил трения и снижением сопротивления обрабатываемого материала пластическому деформированию. Зависимость силы от скорости резания при обработке материалов склонных к наростообразованию имеют немонотонный характер и тенденцию к снижению P_z при увеличении v (рис. 3.47, в). Такой характер зависимости P_z от v объясняется изменением размеров нароста (рис. 3.40) и увеличением температуры резания, приводящим к облегчению процесса резания.

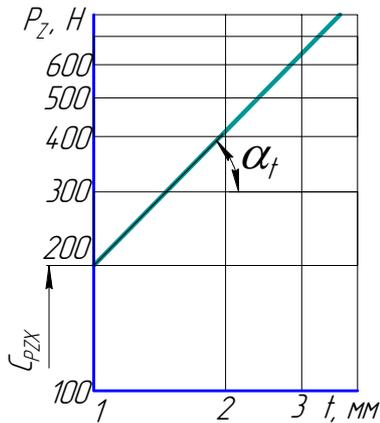
Влияние свойств обрабатываемого материала на силу резания можно определить через коэффициент Cp при значении переменной равной единице. Например, при $t=1: Cp_{Z_t} = Pz_t$, при $S=1: Cp_{Z_s} = Pz_s$, при $v=1: Cp_{Z_v} = Pz_v$ (см. рис. 3.47.), или из формул (3.36) ... (3.38) в каждой серии для повторяющегося опыта:

$$\begin{aligned} Cp_{Z_t} &= Pz_t / Cp_z \cdot S^{y_{pz}} \cdot v^{z_{pz}}, \quad Cp_{Z_s} = Pz_s / Cp_z \cdot t^{x_{pz}} \cdot v^{z_{pz}}, \\ Cp_{Z_v} &= Pz_v / Cp_z \cdot t^{x_{pz}} \cdot S^{y_{pz}} \end{aligned}$$

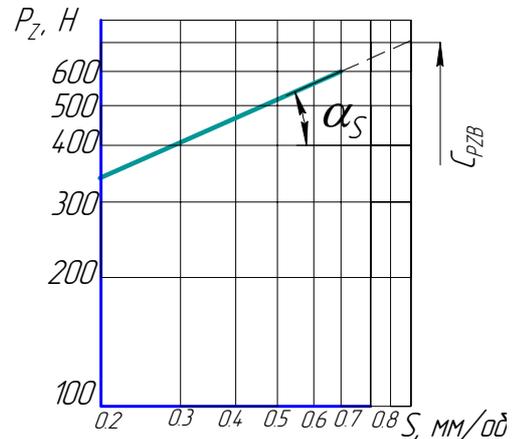
и, в конечном итоге, $Cp_Z = Cp_{Zt} + Cp_{Zs} + Cp_{Zv}/3$.

Установлено, что силы резания возрастают при увеличении σ_ϵ , твердости, пластичности и вязкости обрабатываемого материала. Влияние свойств инструментального материала сказывается через изменение коэффициента трения между ним и обрабатываемым материалом.

а



б



в

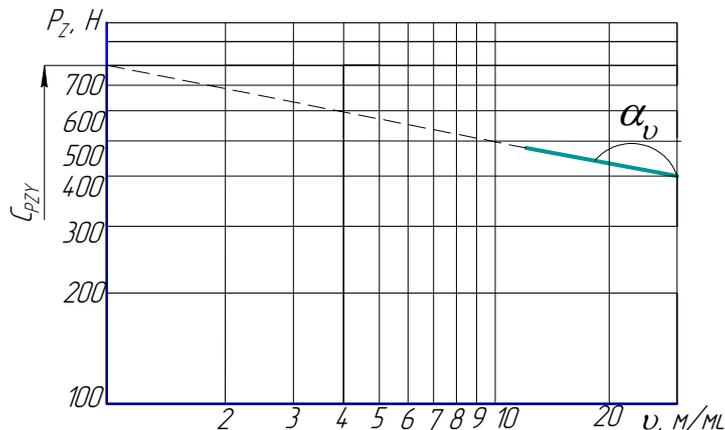


Рис. 3.47. Зависимости составляющей силы резания Pz от глубины резания t (а), подачи S (б) и скорости резания v (в)

3.7.6. Колебания и вибрации в процессе резания

Причины возникновения вынужденных колебаний и автоколебаний

В процессе резания в элементах системы резания могут возникать колебания, называемые *вибрациями*. Наблюдаются два основных вида колебаний: *вынужденные* и *самовозбуждающиеся (автоколебания)*.

Вынужденные колебания возникают из-за периодичности действия возмущающей силы в следствие: 1) прерывистого характера процесса резания; 2) дисбаланса вращающихся деталей станка, заготовки и инструмента; 3) дефектов в механизмах станка (в зубчатых и ременных переда-

чах, гидросистеме и т.п.); 4) неравномерности припуска на обработку; 5) передачи колебаний станку от других работающих станков или машин. Для устранения этих колебаний достаточно ликвидировать причины их возникновения.

Автоколебания при резании возникают вследствие одновременного или доминирующего действия нескольких физических явлений. Физическая модель возникновения и развития автоколебаний при резании может быть представлена следующей схемой (рис. 3.48): 1) любое случайное возмущение (толчок) выводит из равновесия упругую систему СПИД и приводит к изменению толщины среза a ; 2) установление равновесного состояния зоны вторичной деформации и длины контакта l (рис. 3.48, а) не поспевает за изменением толщины среза a . Например, при увеличении a длина контакта l достигает несколько меньшей величины, а при уменьшении a – несколько большей величины по сравнению с той длиной l , которая была бы при резании с постоянной толщиной срезаемого слоя; 3) при врезании лезвия инструмента в заготовку толщина среза a возрастает, а при отталкивании – уменьшается. Поскольку изменение a однозначно связано с изменением силы резания, то сила P при врезании будет несколько меньше, а при отталкивании несколько больше величины силы P_0 , соответствующей мгновенной толщине срезаемого слоя (рис. 3.48, б); 4) наличие отставания изменения силы резания P от изменения толщины среза a переводит возникшие собственные затухающие колебания в незатухающие автоколебания, где энергию, поддерживающую их, создает изменяющаяся синхронно, но сдвинутая по фазе сила резания; 5) возникающие при этом на поверхности резания вибрационные следы будут при каждом колебании передавать дополнительную энергию и усиливать колебания; 6) через определенный промежуток времени наступает равновесие между энергией возбуждения, поступающей в систему, и энергией, рассеиваемой при колебаниях, и устанавливается определенный уровень автоколебаний. Таким образом, первичным источником энергии возбуждения автоколебаний является неоднозначность силы резания вследствие запаздывания ее изменения при изменении толщины срезаемого слоя. Вторичными или второстепенными источниками автоколебаний могут быть: 1) изменение углов лезвия инструмента при колебаниях; 2) изменения размеров сечения среза при упругом закручивании стержневого инструмента (сверл, зенкеров, метчиков и др.); 3) неустойчивость процесса резания из-за нароста, налипов, образования элементной стружки и других явлений; 4) изменения силы трения.

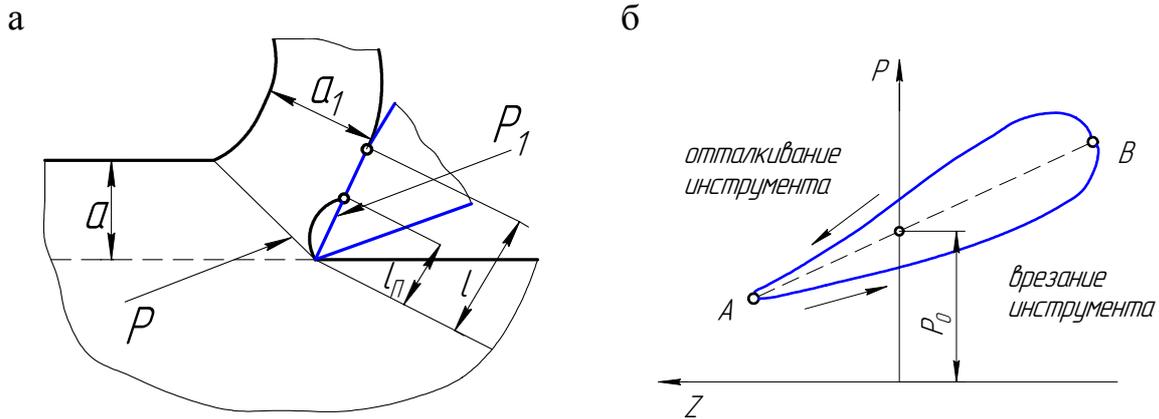


Рис. 3.48. Схемы возбуждения автоколебаний при резании:

а – схема расположения внешних и внутренних сил;

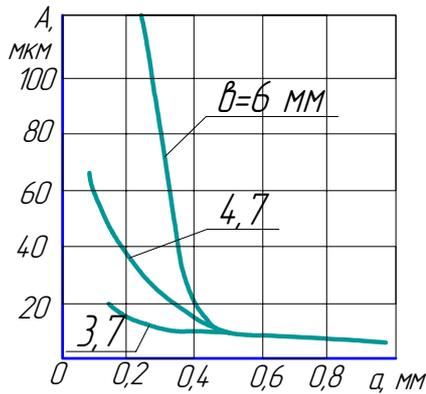
б – схема изменения силы резания при врезании и отталкивании инструмента

Зависимость частоты и амплитуды колебаний от условий обработки

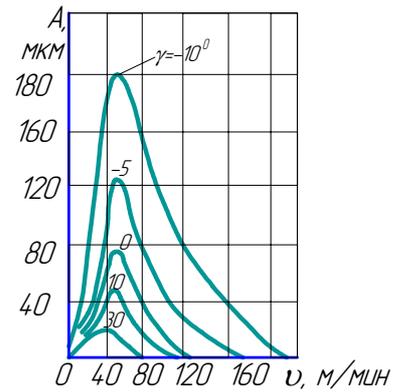
Автоколебания характеризуются постоянством частоты и переменностью амплитуды. На амплитуду колебаний оказывает влияние ряд факторов. С увеличением толщины срезаемого слоя или подачи амплитуда колебаний уменьшается, а с увеличением ширины срезаемого слоя или глубины резания – увеличивается (рис. 3.49, а). С увеличением скорости резания амплитуда колебаний вначале возрастает, а после достижения определенного значения скорости начинает уменьшаться (рис. 3.49, б). Уменьшение переднего угла с переходом его значения в отрицательную область приводит к резкому возрастанию амплитуды колебаний. Чем меньше передний угол, тем больше зона скоростей резания, при которых возникают вибрации. С увеличением главного угла в плане амплитуда колебаний уменьшается (рис. 3.49, в), что связано с уменьшением ширины срезаемого слоя и увеличением его толщины. Задний угол при значениях его больших $8 \dots 10^\circ$ существенного влияния на вибрации не оказывает, а при значениях меньших 3° уменьшает амплитуду колебаний. На амплитуду колебаний оказывают определенное влияние свойства обрабатываемого материала.

Вибрации оказывают существенное влияние на показатели и характеристики процесса резания, например, на производительность и качество обработки, интенсивность изнашивания и стойкость режущего инструмента и т.п. Роль колебаний при этом может быть как положительной, так и отрицательной.

а



б



в

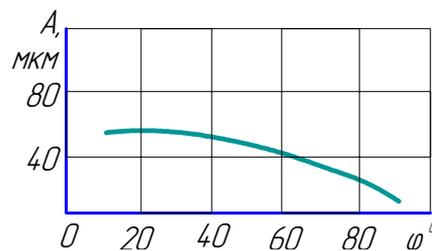


Рис. 3.49. Зависимость амплитуды колебаний A от толщины среза a (а), скорости резания v (б) и угла в плане φ (в) при различных значениях ширины среза b и переднего угла γ

Положительные свойства колебаний системы СПИД используются в вибрационном резании (см. раздел 3.20), а отрицательные их последствия устраняют путем: 1) повышения виброустойчивости станков и их узлов; 2) применением виброгасящих устройств, в том числе и режущих и вспомогательных инструментов; 3) выбором виброустойчивых диапазонов режимов резания; 4) управлением уровнем интенсивности автоколебаний и контролем технического состояния оборудования.

3.8. Тепловые процессы в технологических системах

3.8.1. Основные виды теплообмена

В связи с постоянным обновлением марок конструкционных материалов, повышением требований к качеству деталей машин и интенсификацией режимов обработки на первый план выходят вопросы, связанные с тепловыми процессами в технологических системах. Чтобы учитывать эти процессы при проектировании технологического оборудования, уметь управлять ими, необходимо знать, прежде всего, как происходит теплообмен в элементах технологической системы.

Различают три вида теплообмена: теплопроводность, конвекцию и тепловое излучение. *Теплопроводность* – это процесс распространения тепловой энергии при непосредственном соприкосновении тел или отдельных частей тела, имеющих разные температуры, например, заготовки, инструмента и деталей технологического оборудования. *Конвекция* – это процесс перемещения объемов жидкости или газа в пространстве из одной области в другую, отличающихся разной температурой. Конвекция тепла всегда сопровождается теплопроводностью, так как при движении жидкости или газа неизбежно соприкосновение их частиц, имеющих различные температуры. Совместный процесс конвекции и теплопроводности называется *конвективным теплообменом*. *Тепловое излучение* – это процесс распространения тепла в виде электромагнитных волн с взаимным превращением тепловой энергии в лучистую и обратно. Пример видов теплообмена при резании представлен на рис. 3.50, где T – теплопроводность, I – излучение, K – конвекция, $KЖ$ – конвекция с жидкостью, KB – конвекция с воздухом; ON , OL и OS – участки тепла от деформации, трения по передней и по задней поверхностям режущего инструмента.

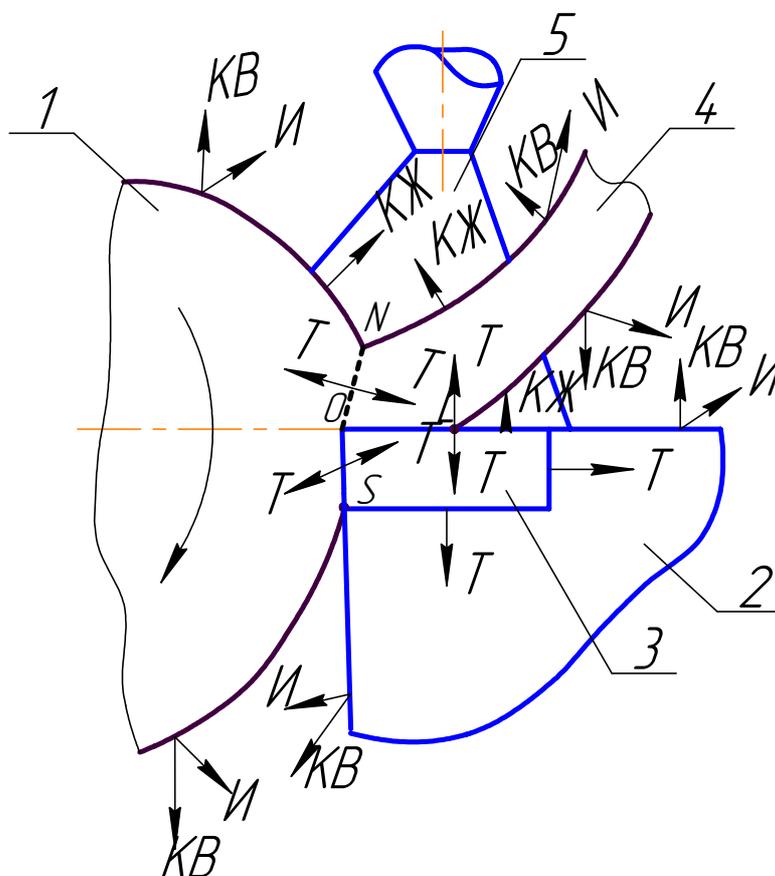


Рис. 3.50. Виды теплообмена в зоне резания:
 1 – заготовка; 2 – режущий инструмент; 3 – режущая пластина;
 4 – стружка; 5 – смазочно-охлаждающая жидкость

В твердых телах энергию частиц вещества характеризует такой параметр, как *температура*. Если в твердом теле распространяется тепло, то температура в различных точках тела с координатами (x, y, z) и в разное время τ описывается выражением $\theta = f(x, y, z, \tau)$. Совокупность значений температур в различных точках тела в данный момент времени называется *температурным полем*. Если температура зависит от длительности нагрева или охлаждения, то для этого поля характерен *неустановившийся* теплообмен, и температурное поле называется *нестационарным*. И наоборот, если температура не изменяется, то поле называется *стационарным*, а теплообмен – *установившимся*. При анализе тепловых процессов в технологических системах часто приходится встречаться с так называемым *квазистационарным* температурным полем («квази» – как бы). Например, температурное поле от движущегося источника тепла в неподвижной системе координат будет нестационарным, т. е. $\frac{\partial \theta}{\partial \tau} \neq 0$. Если рассматривать температурное поле в движущейся системе координат, связанной с источником тепла, то оно будет якобы (квази) стационарным, так как не меняется, перемещаясь вместе с источником тепла.

Если температура является функцией трех координат, то температурное поле называется *трехмерным*, если двух – *двухмерным* или плоским. Соединив точки в теле с одинаковой температурой, получим *изотермические поверхности* или поверхности равных температур. Сечение изотермической поверхности плоскостями дает семейство изотермических линий – *изотерм* (рис. 3.51). При переходе от одной изотермы к другой температура в теле изменяется, причем наибольший перепад на единицу длины имеет место по направлению нормали к данной изотерме в данной точке. Этот перепад характеризуется величиной $\Delta\theta/\Delta n$, а предел этого от-

ношения $\lim_{\Delta n \rightarrow 0} \frac{\Delta\theta}{\Delta n} = \frac{\partial\theta}{\partial n}$ называется *градиентом температуры*:

$$\text{grad}\theta = \frac{\partial\theta}{\partial n} \quad (3.41)$$

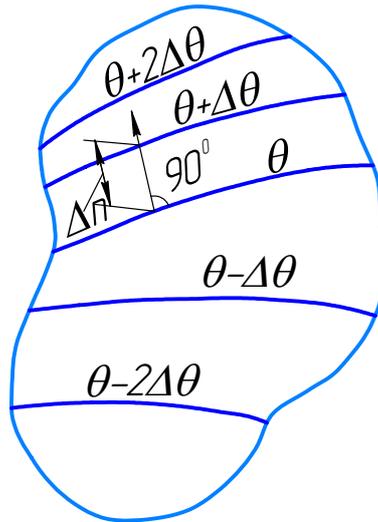


Рис. 3.51. Изотермы и градиент температур

Градиент температуры характеризует интенсивность изменения температуры внутри тела и является векторной величиной, направленной по нормали в сторону возрастания температуры.

Ж.-Б. Фурье высказал гипотезу о том, что количество теплоты dQ , проходящей через изотермическую поверхность площадью dF за время $d\tau$ пропорционально градиенту температур (рис. 3.52): $dQ = -\lambda \text{grad}\theta dF \cdot d\tau$.

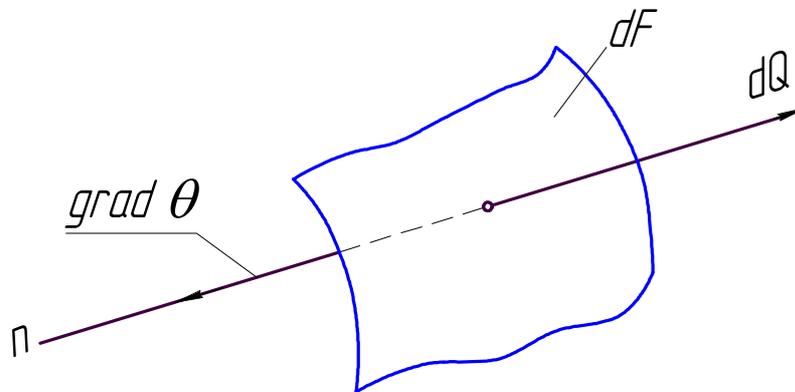


Рис. 3.52. Элемент изотермической поверхности и тепловой поток

Количество тепла, проходящего через единицу площади изотермической поверхности в единицу времени (плотность теплового потока), определяется соотношением:

$$q = \frac{dQ}{dF \cdot d\tau} = -\lambda \text{grad}\theta, \quad (3.42)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, выражающий количество тепла, проходящего в единицу времени через единицу площади при градиенте температуры в один градус на единицу длины.

Коэффициент теплопроводности характеризует способность данного материала проводить теплоту и зависит от состава вещества, его структуры, плотности, влажности и температуры. Знак минус в формуле (3.42) показывает, что вектор теплового потока направлен в сторону, обратную направлению вектора $\text{grad}\theta$. Выражением (3.42) обычно представляют основной закон теплопроводности или *закон Фурье*, утверждающий, что плотность теплового потока прямо пропорциональна градиенту температуры.

3.8.2. Дифференциальное уравнение теплопроводности

При нестационарном режиме перераспределение теплоты сопровождается изменением температуры отдельных элементов тела. Изменение температурного поля твердого тела при нестационарной теплопроводности описывается *дифференциальным уравнением теплопроводности*. Для вывода этого уравнения выделим в теле элементарный объем $\Delta x \Delta y \Delta z$ (рис. 3.53) и рассмотрим процесс распространения теплоты в нем по направлению одной из осей координат, например Ox .

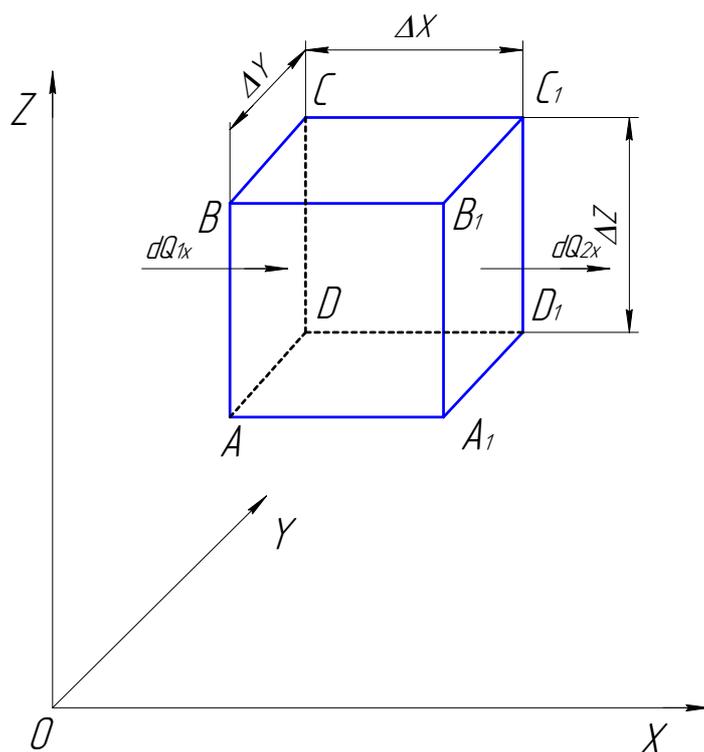


Рис. 3.53. Схема к выводу дифференциального уравнения теплопроводности

За малостью площади $\Delta y \Delta z$ положим, что температура не каждой грани тела распределена равномерно. Пусть на грани $A_1B_1C_1D_1$ температура равна θ , а на грани $ABCD$ — $\theta' = \theta + \Delta\theta_x$, где $\Delta\theta_x$ — изменение температу-

ры вдоль оси OX. Изменение теплового потока от одной грани к другой по направлению OX рассматриваемого тела опишется выражением:

$$dQ_{2x} = \lambda \text{grad}_x \theta \cdot \Delta y \Delta z \cdot d\tau$$

или

$$dQ_{2x} = \lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \cdot \Delta y \Delta z \cdot d\tau .$$

Температура грани ABCD:

$$\theta' = \theta + \Delta x \frac{\partial \theta}{\partial x} ,$$

тогда

$$\text{grad}_x \theta' = \frac{\partial \theta'}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\theta + \Delta x \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) ,$$

и тепловой поток

$$dQ_{1x} = \lambda \frac{\partial}{\partial x} \left(\theta + \Delta x \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \Delta y \Delta z d\tau ,$$

так как $dQ_{1x} > dQ_{2x}$, то в объеме

$$\begin{aligned} dQ_x &= dQ_{1x} - dQ_{2x} = \lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \Delta y \Delta z d\tau + \lambda \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \Delta y \Delta z \Delta x d\tau - \lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \Delta y \Delta z d\tau = \\ &= \lambda \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \Delta x \Delta y \Delta z d\tau \end{aligned}$$

или

$$dQ_x = \lambda \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} dV d\tau . \quad (3.43)$$

Аналогично для координатных осей OY и OZ:

$$dQ_y = \lambda \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} dV d\tau , \quad (3.44)$$

$$dQ_z = \lambda \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} dV d\tau . \quad (3.45)$$

Изменение теплового потока во всем теле опишется выражением:

$$dQ = dQ_x + dQ_y + dQ_z = \lambda \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right) dV d\tau . \quad (3.46)$$

Количество теплоты можно определить также через теплоемкость:

$$dQ = \rho \cdot c \cdot dV \left(\frac{\partial \theta}{\partial \tau} \right) d\tau , \quad (3.47)$$

где ρ – плотность материала;
 c – массовая теплоемкость;

$\rho \cdot c$ – объемная теплоемкость;

$\frac{\partial \theta}{\partial \tau}$ – скорость изменения температуры тела во времени.

Приравняв выражения (3.46) и (3.47), получим дифференциальное уравнение теплопроводности Фурье:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \omega \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right), \quad (3.48)$$

где $\omega = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}$ – коэффициент температуропроводности, характеризующий

теплоинерционные свойства тела.

Это уравнение является общим и справедливо для любой формы тела и любых условий теплообмена.

3.8.3. Схематизация элементов технологической системы

При решении практических задач, когда имеют дело с конкретными условиями, для описания теплопроводности прибегают к *схематизации элементов технологической системы*. Схематизация предусматривает рассмотрение частных особенностей, дополняющих и конкретизирующих дифференциальное уравнение теплопроводности применительно к тому или иному случаю, и называемых условиями однозначности или краевыми условиями. Эти условия включают:

- 1) начальные условия, т.е. распределение температуры в данном теле до того, как начался изучаемый процесс;
- 2) граничные условия, т.е. описание условий теплообмена поверхностей интересующего нас тела с окружающей средой и другими телами;
- 3) описание формы, размеров и теплофизических характеристик тела, в котором происходит процесс теплопроводности;
- 4) описание формы, размеров и мощности источников или стоков тепла, действующих в рассматриваемом процессе (сток – источник, у которого плотность потока $q < 0$).

Начальные условия отвечают на вопрос о том, какое было температурное поле в рассматриваемом теле в момент времени, принятый за начало отсчета, т.е. $\tau = 0$; $\theta(x, y, z) = \theta_0$.

Различают *граничные условия* первого, второго, третьего и четвертого рода. Условия первого рода предполагают, что известен закон распределения температур на граничных поверхностях тела, т.е. $\theta_s(x, y, z, \tau)$ и

$\theta = \theta_s$. Условия второго рода предусматривают, что известен закон распределения плотности тепловых потоков, т.е. $q = \varphi(x, y, z, \tau)$. Условия третьего рода используют в том случае, когда теплообменом поверхности с окружающей средой пренебречь нельзя. Если θ_0 – температура окружающей среды, а α – коэффициент теплообмена между средой и поверхностью, то $q = \alpha(\theta_s - \theta_0)$ или $q = -\lambda \text{grad} \theta_s = -\lambda \frac{\partial \theta_s}{\partial n}$, тогда $\alpha(\theta_s - \theta_0) = -\lambda \frac{\partial \theta_s}{\partial n}$ или

$$\frac{\partial \theta_s}{\partial n} = -\frac{\alpha}{\lambda}(\theta_s - \theta_0).$$

Условия четвертого рода возникают тогда, когда рассматриваемое твердое тело находится в безззорном контакте с другим твердым телом и между ними происходит теплообмен:

$$\theta_{s1}(x_1, y_1, 0, \tau) = \theta_{s2}(x_2, y_2, 0, \tau), \text{ т.е. средние температуры равны } \theta_{s1} = \theta_{s2}.$$

Схематизация формы тел заключается в представлении их в виде (рис. 3.54): неограниченного пространства (а) или полупространства (б); неограниченной пластины (в); неограниченного в одном направлении клина (г); неограниченного (д) или ограниченного с одной стороны (е) стержня; тел, имеющих замкнутый объем и простую форму, например, параллелепипеда (ж), шара (з), цилиндра (и).

Схематизация теплофизических характеристик материалов состоит в том, что при анализе тепловых процессов не учитывается неоднородность этих материалов, а в некоторых случаях и их многокомпонентная структура. Например, абразивный круг включает зерна, связку и воздушные поры, имеющие различные коэффициенты теплопроводности – $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$. В этом случае рассматривают эквивалентный коэффициент теплопроводности:

$$\lambda = \lambda_1^{P1} \cdot \lambda_2^{P2} \dots = \prod_{i=1}^{i=n} \lambda_i p_i, \text{ где } \lambda_1 - \text{коэффициент теплопроводности от-}$$

дельного компонента; p_i – объемная концентрация компонента ($\sum_{i=1}^m p_i = 1$).

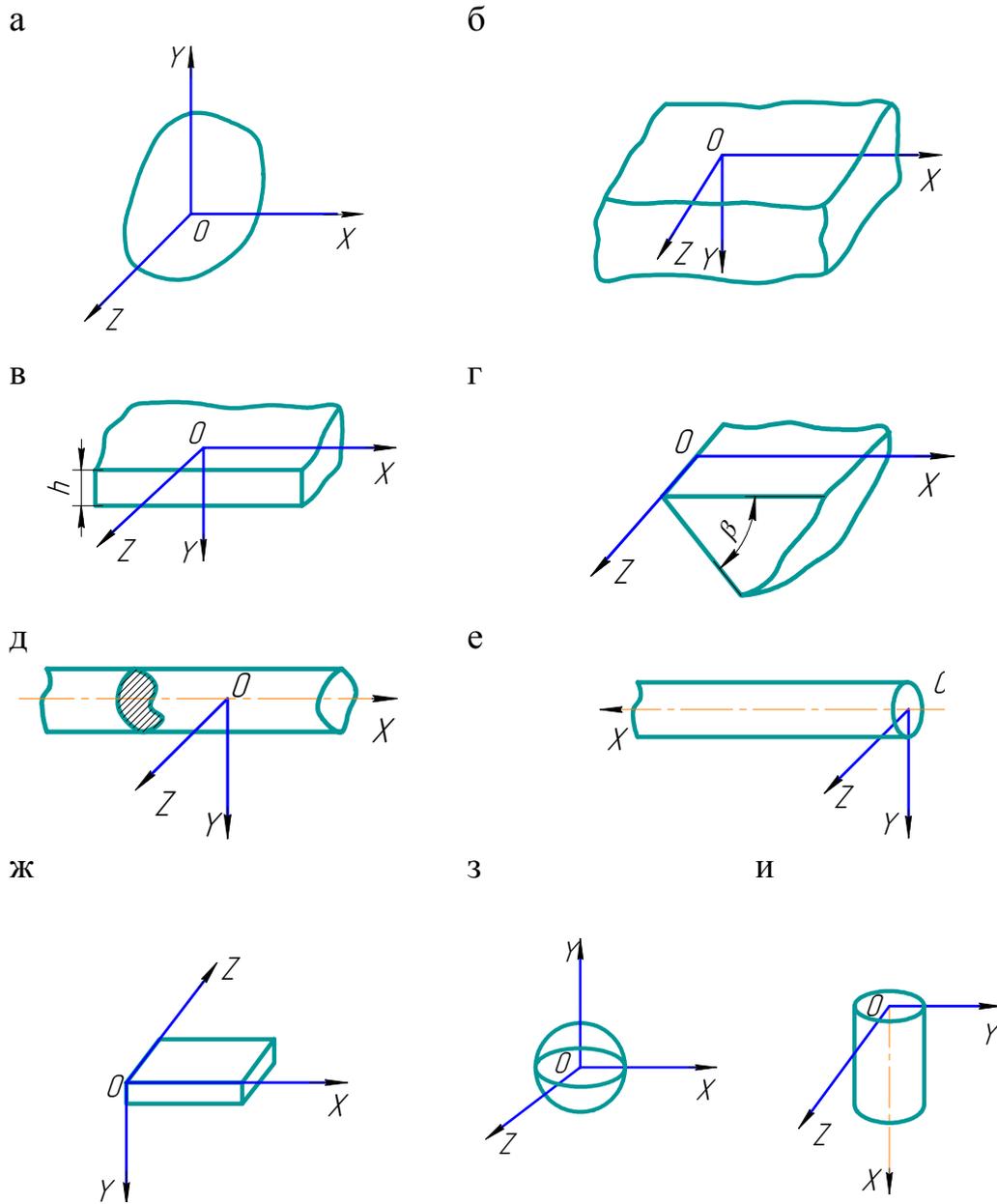


Рис. 3.54. Схематизация формы тел, участвующих в теплообмене

Источники тепла схематизируются: по форме (рис. 3.55) и могут быть трех-, двух- и одномерные, а также точечные; по скорости перемещения – неподвижные, движущиеся, быстро движущиеся; по времени функционирования – мгновенные, действующие в течение конечного отрезка времени, действующие периодически и стационарные.

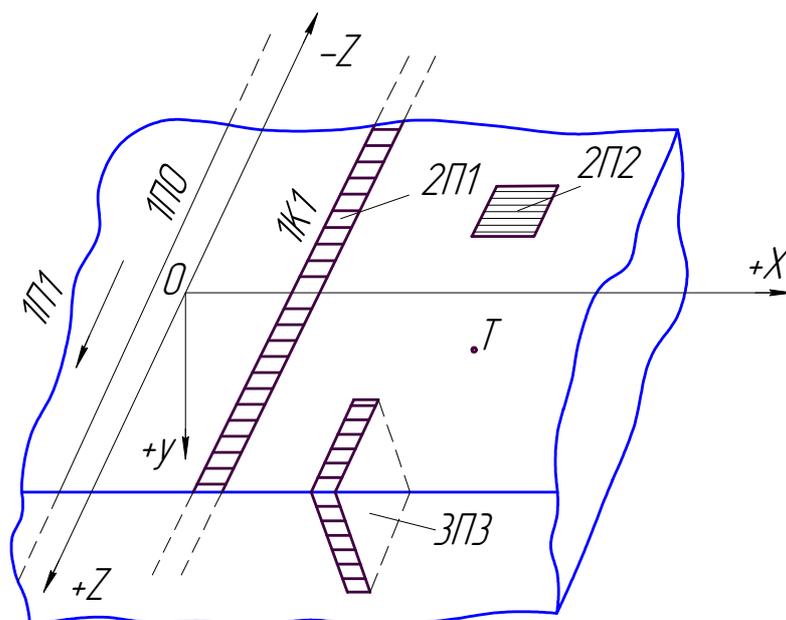


Рис. 3.55. Схематизация источников тепла по форме

Скорость перемещения источника оценивается по критерию Пекле: $P_e = \frac{v \cdot l}{\omega}$, где v – скорость движения источника теплоты; l – путь перемещения источника; ω – коэффициент теплопроводности. Если $P_e > 8 \dots 10$, то источник – быстро движущийся.

3.8.4. Методы решения уравнения теплопроводности

С учетом вышеприведенных допущений уравнение теплопроводности может быть решено одним из следующих методов: классическим, операционным, численным, источников теплоты и моделированием.

При использовании *классического метода* производится интегрирование дифференциального уравнения (3.48) одним из известных математических способов. В *операционных методах*, например, в методе интегрального преобразования Лапласа изучается не интересующая нас функция, а ее видоизменение, полученное путем умножения на экспоненциальную функцию. При использовании *численных методов* дифференциальное уравнение теплопроводности решается методом конечных разностей. Он основан на замене производных в уравнении (3.48) их приближенными значениями, выраженными разностями функций $\theta(x, y, z, \tau)$ в отдельных дискретных точках-узлах сетки (предварительно тело разбивается на элементарные объемы правильной формы). Дифференциальное уравнение в этом случае заменяется эквивалентным соотношением конечных разностей, решение которого в виде алгебраических операций реализуется на

компьютере. Чтобы определить температуру в любой точке тела в данный момент времени, достаточно знать температуру соседних точек в предыдущий момент времени. Если известно начальное распределение температуры в теле и на его граничных поверхностях, то постепенно, шаг за шагом, перемещаясь от одной точки тела к другой или рассматривая один промежуток времени за другим, можем рассчитать температурное поле в интересующем нас объекте.

Наибольшее распространение в различных областях техники получил *метод источников тепла*. Сущность этого метода определяется двумя основными положениями:

1) температурное поле, возникающее в теплопроводном теле под действием источника тепла любой формы, движущегося или неподвижного, действующего временно или непрерывно, можно получить как результат той или иной комбинации температурных полей, возникающих под действием системы точечных мгновенных источников;

2) процесс распространения теплоты в теле представляется в виде части распространения теплоты в теле неограниченных размеров путем дополнения к фактически действующим источникам некоторой системы фиктивных источников или стоков теплоты.

Если предположить, что в теле, все точки которого имеют одинаковую температуру, а теплообмен с окружающей средой отсутствует, вспыхнул и мгновенно погас точечный источник, выделивший q_T тепла, то решение дифференциального уравнения теплопроводности (3.48) для этих условий запишется в виде:

$$\theta_T(x, y, z, \tau) = \frac{q_T}{\lambda \sqrt{\omega} (4\pi\tau)^{3/2}} \exp \frac{-(x_u - x)^2 + (y_u - y)^2 + (z_u - z)^2}{4\omega\tau}, \quad (3.49)$$

где $\theta_T(x, y, z, \tau)$ – температура любой точки тела;

x, y, z – координаты точки тела;

x_u, y_u, z_u – координаты источника тепла;

τ – время действия источника;

λ и ω – коэффициенты соответственно теплопроводности и температуропроводности материала тела.

Решения дифференциального уравнения для других условий получаются путем интерпретации формы, времени и движения источников теплоты. Например, источник в виде прямой линии может быть представлен как совокупность бесконечно большого числа точечных, поставленных рядом и действующих одновременно. В этом случае температура от линейного источника теплоты будет вычисляться по следующей формуле:

$$\begin{aligned}
\theta_{,l}(x, y, \tau) &= \frac{q_l}{\lambda\sqrt{\omega}(4\pi\tau)^{3/2}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left[\frac{-(x_u - x)^2 + (y_u - y)^2 + (z_u - z)^2}{4\omega\tau} \right] dz_u = \\
&= \frac{q_l}{\lambda\sqrt{\omega}(4\pi\tau)^{3/2}} \exp \left[\frac{-(x_u - x)^2}{4\omega\tau} \right] \times \\
&\times \exp \left[\frac{-(y_u - y)^2}{4\omega\tau} \right] \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left[\frac{-(z_u - z)^2}{4\omega\tau} \right] dz_u = \\
&= \frac{q_l}{4\pi\lambda\tau} \exp \left[\frac{-(x_u - x)^2 + (y_u - y)^2}{4\omega\tau} \right].
\end{aligned} \tag{3.50}$$

Аналогично можно представить источник любой формы как ту или иную систему точечных источников теплоты. Например, для плоского источника теплоты выражение (3.49) приводится к виду:

$$\theta_{,l}(y, \tau) = \frac{q_l\sqrt{\omega}}{\lambda\sqrt{4\pi\tau}} \exp \left[\frac{-(y_u - y)^2}{4\omega\tau} \right]. \tag{3.51}$$

Если источник действует в течение времени τ , то его можно представить в виде системы мгновенных точечных источников, вспыхивающих и гаснущих с весьма большой частотой, когда период времени между вспышкой и гашением $\Delta\tau \rightarrow 0$. В этом случае импульсы следуют друг за другом с бесконечно малыми промежутками времени и в пределе образуется непрерывно функционирующий источник.

Движение источника можно имитировать рядом последовательных вспышек и гашений мгновенных импульсов в различных точках траекторий перемещения источника. Это легко уяснить, если представить, что ряд последовательно зажигающихся и гаснущих лампочек создают иллюзию движения светового луча.

Вышеприведенные рассуждения и формулы относятся к описанию температурных полей в неограниченных твердых телах. Для перехода от неограниченного тела к ограниченному используют второе положение метода источников тепла. Для того чтобы учесть ограниченность твердых тел надо выполнить отражение источников и стоков теплоты, мысленно прикладывая к основному (реальному) телу ряд подобных ему тел с фиктивными источниками или стоками теплоты. Причем каждое из последующих тел является зеркальным отражением предыдущего тела относительно плоскости их соприкосновения. В результате отражения можем получить бесконечный ряд двойных источников. И, в конечном итоге, любой из элементарных источников в процессе отражения превращается в одномерный

неограниченный, для которого уже есть решение дифференциального уравнения теплопроводности.

Моделирование тепловых процессов осуществляют в основном в двух видах:

1) физическое моделирование, когда изучение процесса теплообмена в реальном теле производится на основе анализа сходного процесса распространения теплоты в модели;

2) математическое моделирование, когда изучение теплообмена в реальном теле производится на основе анализа принципиально другого физического явления, отличающегося от процесса распространения теплоты, но имеющего подобное математическое описание.

В качестве примера, иллюстрирующего первую разновидность, можно привести замену фактического источника теплоты на источник в виде лазера. При этом необходимо обеспечить подобие между моделью и реальным процессом, условия которого состоят в следующем: 1) модель должна быть геометрически подобна реальному объекту; 2) должно быть обеспечено равенство безразмерных координат точек модели и реального объекта; 3) должно иметь место равенство критериев подобия для модели и оригинала.

Второй вид моделирования может быть проиллюстрирован одинаковым математическим описанием разных по физической природе процессов, например, распространения теплоты и электрического тока. Дифференциальное уравнение, описывающее процесс распространения электрического тока в твердом теле, выглядит следующим образом:

$$\frac{\partial U}{\partial \tau_1} = \frac{\gamma}{c_0} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y_1^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z_1^2} \right), \quad (3.52)$$

где U – потенциал в точке твердого тела с координатами x_1, y_1, z_1 ;

γ – электропроводность;

c_0 – удельная электрическая емкость.

Выражение (3.52) аналогично дифференциальному уравнению (3.48), описывающему процесс распространения теплоты. Уравнением типа (3.52) могут быть описаны процессы движения жидкости в вихревом потоке, распространения звука и т.п.

При анализе тепловых процессов в технологических системах наибольшее распространение получили модели, в которых используется электротепловая аналогия, т.е. аналогия между математическим описанием процессов распространения теплоты и электрического тока. Метод электрической аналогии предусматривает применение моделей двух типов:

1) со сплошной электропроводящей средой; 2) с сеткой, состоящей из активных сопротивлений (резисторов) и емкостей. В качестве сплошной среды чаще всего применяют графитизированную электропроводную бумагу. На бумаге изображается модель тела, к поверхностям которой подводят ток заданной величины, имитирующий тепловой поток. В различных точках модели определяют безразмерный потенциал, по которому затем с использованием метода подобия рассчитывают температуру сходной точки на нагреваемом объекте. Возможно построение на модели эквипотенциалей, которые в известном масштабе представляют собой изотермы на нагреваемом теле. На рис. 3.56 показана схема интегратора для моделирования на электропроводной бумаге тепловых процессов в резце.

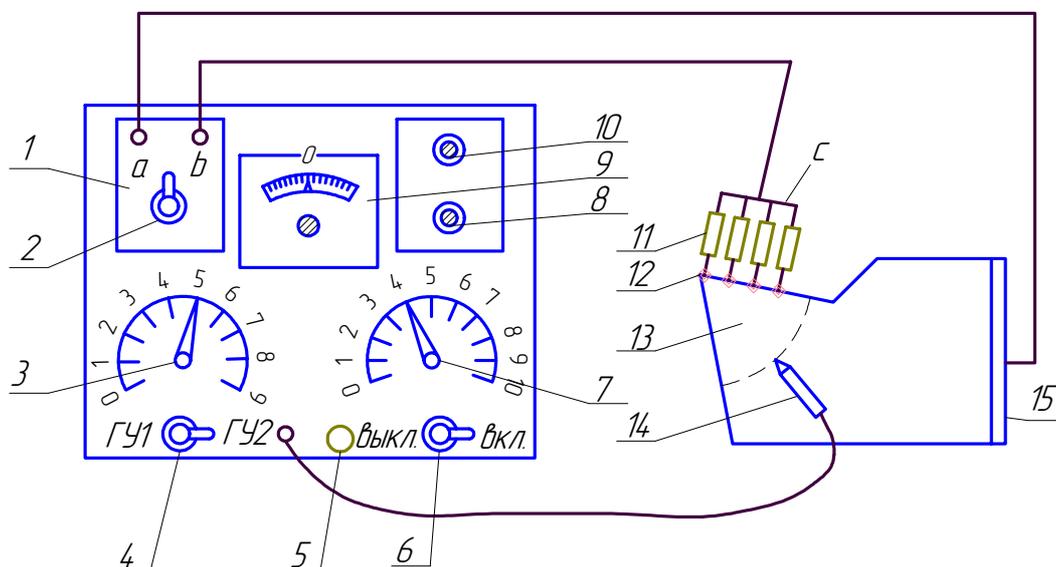


Рис. 3.56. Устройство для моделирования тепловых явлений на электропроводной бумаге

Интегратор включает блок питания 1, через контакты *a* и *b* которого подается напряжение на резисторы 11, контакты 12, модель 13 и шину 15. Резисторы 11 служат для подвода к поверхности модели тока заданной плотности, имитирующего тепловой поток, например, со стороны стружки в резец. Блок и установка включаются контактами 2 и 6. Измерительное устройство 9 настраивается с помощью кнопки 4, переключателя декад 3 и реохорды 7. Сопротивление резисторов 11 регулируется настройкой ручек 8 и 10. Иглу 14 устанавливают в точке модели, в которой определяется безразмерный потенциал, переводимый затем в температуру.

При использовании моделей в виде электрических сеток разбивают твердое тело любой формы на элементарные объемы, в каждом из которых термическое сопротивление заменяют резистором соответствующего сопротивления. При необходимости учета теплоемкости тел к сеточной модели из резисторов подключаются электрические конденсаторы. Затем, как и в случае электропроводной бумаги, определяют потенциалы в отдельных узлах сетки. Например, для процесса плоского шлифования устройство моделирования тепловых явлений на электрической сетке представлено на рис. 3.57.

Чтобы смоделировать процесс теплообмена, последовательно подключаются узлы сетки заготовки $СЗ$ ($1, 2, 3 \dots m$) к узлам сетки абразивного круга $СК$ ($a, b, c \dots R$) в порядке, соответствующем ходу процесса шлифования (на рис. 3.57 показано в увеличенном виде). Каждая пара узлов подключается к соответствующему истоку $A, B \dots K$, включающим резисторы $R_A \dots R_K$. Блок питания $БП$ обеспечивает создание на узлах моделей $СК$ и $СЗ$ потенциалов, измеряя которые можно с использованием правила подобия определить температуру на поверхностях заготовки и абразивного круга.

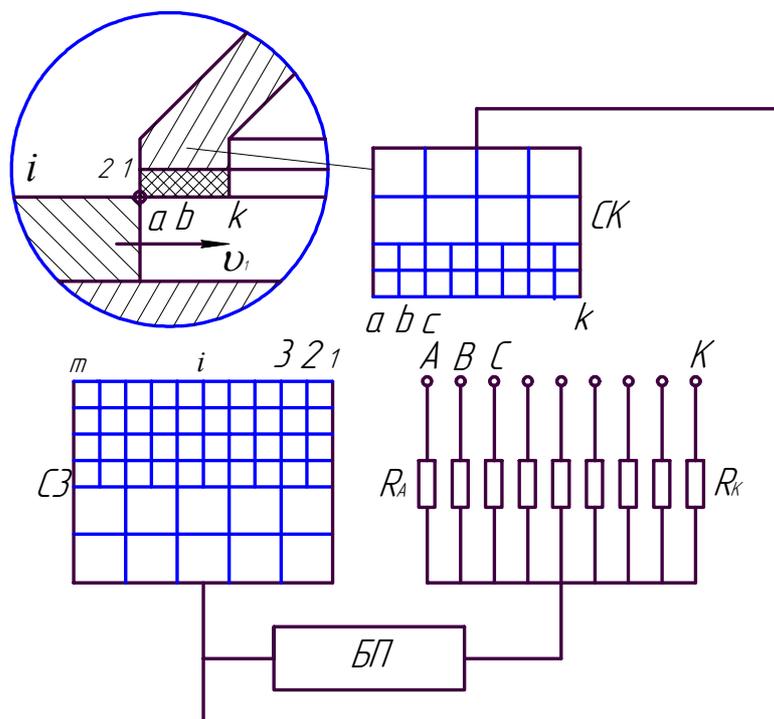


Рис. 3.57. Устройство для моделирования тепловых явлений на электрической сетке

3.9. Теплота и температура при резании

3.9.1. Тепловой баланс при резании

Экспериментами установлено, что при резании конструкционных материалов более 99,5 % работы резания переходят в тепло. Количество тепла, выделяющегося в процессе резания, определяется по формуле:

$$Q = P_z \cdot v, \quad (3.53)$$

где P_z – тангенциальная составляющая силы резания;
 v – скорость резания.

Эта теплота образуется в следующих очагах (рис. 3.58): 1) в плоскости деформации Q_δ ; 2) в приконтактных областях инструмента со стружкой $Q_{ТП}$; 3) в приконтактных областях инструмента с заготовкой $Q_{ТЗ}$. Теплота расходуется на нагрев стружки Q_c , нагрев заготовки $Q_з$, нагрев инструмента Q_u , нагрев окружающей среды Q_o . Уравнение, связывающее образующуюся теплоту с расходной, называется *уравнением теплового баланса*:

$$Q = Q_\delta + Q_{ТП} + Q_{ТЗ} = Q_c + Q_з + Q_u + Q_o. \quad (3.54)$$

При обработке конструкционных материалов величины составляющих теплоты, входящих в уравнение (3.54), по отношению к общему количеству теплоты колеблются в следующих пределах: $Q_\delta = (60 \dots 90 \%)Q$; $Q_{ТП} = (20 \dots 30 \%)Q$; $Q_{ТЗ} = (5 \dots 10 \%)Q$; $Q_c = (60 \dots 90 \%)Q$; $Q_з = (30 \dots 60 \%)Q$; $Q_u = (5 \dots 15 \%)Q$; $Q_o = (2 \dots 3 \%)Q$.

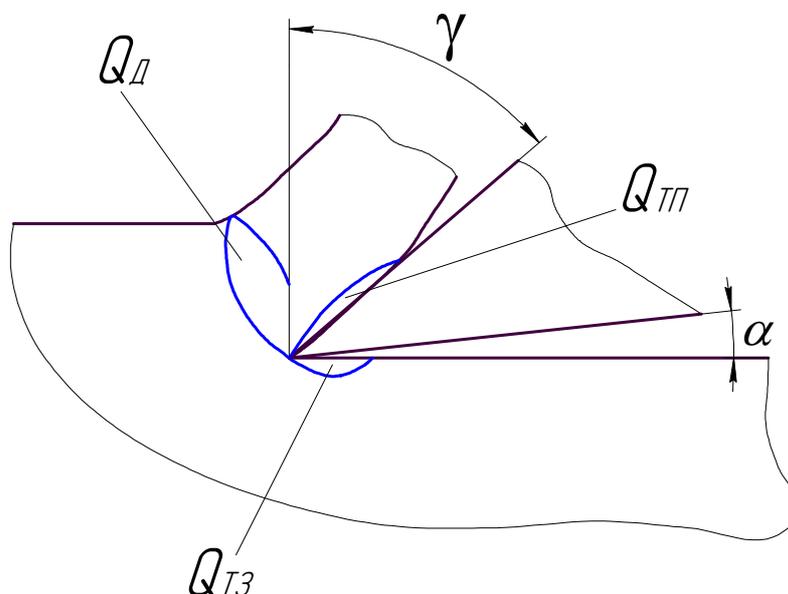


Рис. 3.58. Схема очагов образования тепла при резании

Как видно из этих соотношений, количество тепла, выделяемого в зоне деформации, наибольшее, так как в этой зоне совершается основная

работа резания. Образующее тепло в большей части расходуется на нагрев стружки, что связано, прежде всего, с более высокой теплопроводностью материала заготовки по сравнению с инструментальным материалом и малыми объемами стружки. Однако температура на передней поверхности лезвия инструмента высока и примерно равна температуре стружки.

3.9.2. Тепловые потоки в зоне резания

В зоне резания тепловые потоки от источников теплообразования устремляются в стружку, инструмент и заготовку (рис. 3.59, а). При этом стружка и поверхностные слои заготовки оказываются под одновременным воздействием двух источников тепла: стружка – от источников деформации и трения о переднюю поверхность; заготовка – от источников деформации и трения о заднюю поверхность. В этих условиях стружка оказывается более нагретой, чем инструмент и заготовка.

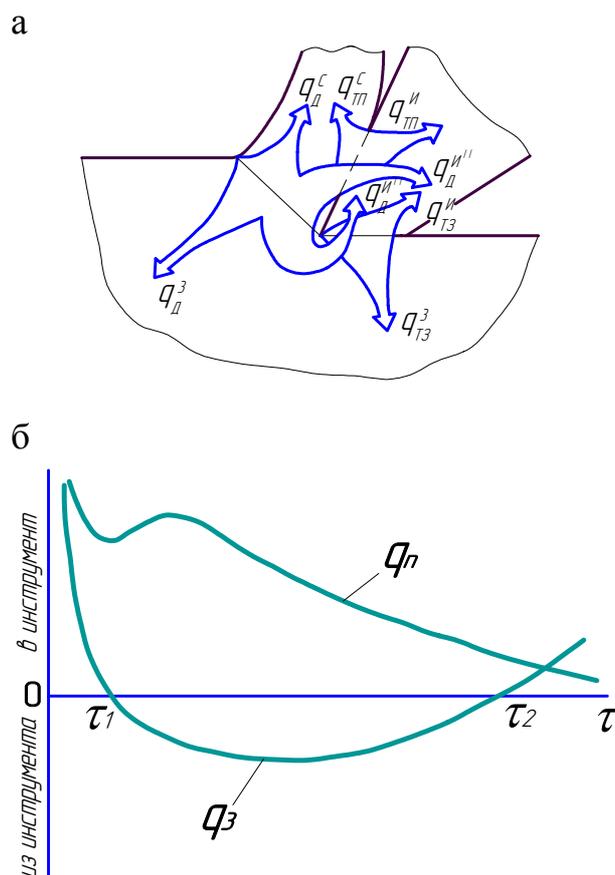


Рис. 3.59. Схема тепловых потоков в зоне резания (а) и их изменение (б) в течение времени обработки

Как видно из схемы распространения тепловых потоков (см. рис. 3.59, а), существует два вида тепловых потоков: 1) тепловые потоки от непосредственного нагрева за счет источников тепла, называемые *теплообразующими потоками* – $q_{\partial}^c, q_{\partial}^3, q_{ТП}^c, q_{ТП}^u, q_{ТЗ}^3, q_{ТЗ}^u$; 2) тепловые потоки, вызванные дополнительным распределением тепла в результате неравномерного нагрева, называемые *теплообменными потоками* – $q_{\partial}^{u'}, q_{\partial}^{u''}$.

Теплообразующий $q_{ТП}^u$ и теплообменный $q_{\partial}^{u'}$ потоки на передней поверхности, а также аналогичные потоки на задней поверхности инструмента, действующие на одних и тех же площадках, можно обозначить:

$$q_n = q_{mn}^u + q_{Д}^{u'}, \quad q_3 = q_{ТЗ}^u + q_{Д}^{u''}$$

На рис. 3.59, б показана типичная картина изменения во времени плотности тепловых потоков $q_{П}$ и q_3 при обработке заготовок из конструкционных материалов инструментами из быстрорежущей стали и твердого сплава. В начальный короткий промежуток времени резания (меньше τ_1) тепловые потоки $q_{П}$ и q_3 направлены в инструмент. Это объясняется тем, что вначале резания холодное лезвие соприкасается с мгновенно нагревающимися стружкой и заготовкой и энергично отводит тепло в тело инструмента. Поэтому температура на контактных площадках более низкая, чем при установившемся резании.

Однако с течением времени тепло, поступающее в инструмент, быстро нагревает режущее лезвие, и плотности потоков $q_{П}$ и q_3 снижаются. К моменту времени $\tau_1(0,1 \dots 0,2 \text{ с})$ инструмент нагревается настолько, что тепловой поток q_3 меняет свое направление ($q_3 < 0$) в сторону заготовки. С этого момента времени заготовка является своеобразным охладителем инструмента, о чем свидетельствует некоторое возрастание итогового потока в сторону заготовки. Далее наступает период установившегося теплообмена ($\tau_1 \leq \tau \leq \tau_2$), в течение которого плотности потоков $q_{П}$ и q_3 мало изменяются.

По мере изнашивания инструмента температура на его задней поверхности возрастает. Поэтому при сохранении направления потока $q_3 < 0$ абсолютное значение его плотности постепенно уменьшается.

Дальнейшее увеличение износа и температуры на задней поверхности инструмента, сопровождающееся снижением плотности потока q_3 , приводит к тому, что в режущем лезвии накапливается все большее количество теплоты. Плотность потока $q_{П}$ медленно снижается, в связи с чем температура резания возрастает. В момент времени τ_2 поток q_3 становится равным нулю, а затем меняет направление ($q_3 > 0$) – теплота идет в инструмент и это поступление тем больше, чем больше износ инструмента. Ко времени $\tau > \tau_2$ режущее лезвие насыщено теплотой и ее дальнейшее посту-

пление создает условия, в которых инструмент теряет свои режущие свойства, т.е. наступает его катастрофический износ.

Анализ изменения плотности тепловых потоков q_{Π} и q_3 во времени позволяет сделать следующие выводы:

1. Желательно как можно дольше поддерживать период $0 \leq \tau \leq \tau_1$, соответствующий минимальным значениям температуры на поверхностях лезвия инструмента.

2. При износе лезвия инструмента по передней поверхности желательно интенсифицировать тепловой поток q_{Π} , а при износе лезвия по задней поверхности – снижать плотность теплового потока q_3 .

3. Поскольку заготовка является охладителем инструмента, целесообразно отводить максимальное количество теплоты через заднюю поверхность лезвия.

3.9.3. Влияние режима резания и геометрии инструмента на температуру резания

Классическое представление о влиянии режима резания, геометрии инструмента и других факторов обработки на температуру резания можно проиллюстрировать на примере эмпирической зависимости:

$$\theta = C_{\theta} \cdot t^{x_{\theta}} \cdot S^{y_{\theta}} \cdot v^{z_{\theta}} \cdot k_{\theta}. \quad (3.55)$$

Анализ этой зависимости показывает, что с увеличением v возрастает количество тепла в зоне резания, а также температура нагрева заготовки, стружки и инструмента. Однако рост температуры в зоне резания отстает от роста скорости резания (рис. 3.60, а). Это отставание особенно усиливается в зоне высоких скоростей и характеризуется показателем степени $z_{\theta} < 1$.

С ростом глубины резания t или ширины среза b прямо пропорционально растет сила, работа резания и количество выделяющегося тепла. Во столько же раз увеличивается и длина активной части режущего лезвия, а соответственно и отвод тепла. Поэтому с увеличением b температура резания $\theta_{рез}$ изменяется незначительно и характеризуется показателем $x_{\theta} \approx 0,1$.

С увеличением подачи S или толщины среза a сила резания P_z растет примерно в степени 0,75, возрастают также работа резания и количество выделяемого тепла. Одновременно растет площадь контакта стружки с передней поверхностью резца. Это улучшает условия отвода тепла, поэтому рост $\theta_{рез}$ отстает от роста a и показатель степени $y_{\theta} \approx 0,2...0,3$.

С ростом прочности, твердости и пластичности обрабатываемого материала (коэффициент C_{θ}) возрастает температура резания. Чем выше теплопроводность обрабатываемого материала, тем ниже θ , т.е. отвод тепла более интенсивен.

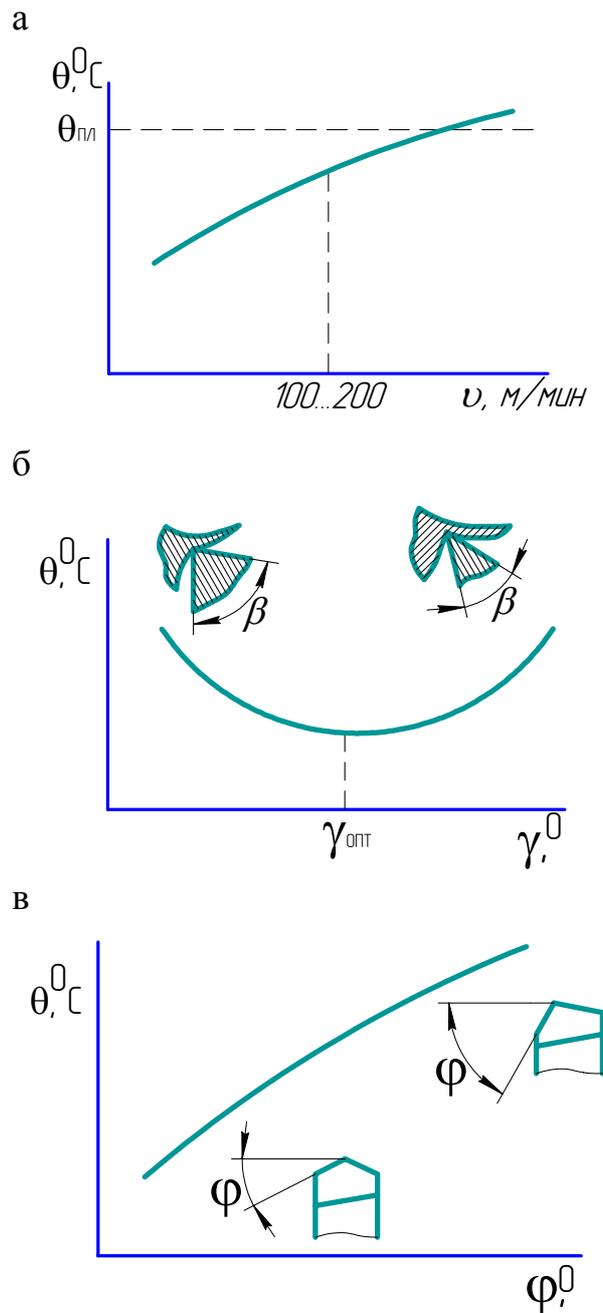


Рис. 3.60. Зависимости температуры резания от скорости резания (а), переднего угла (б) и угла в плане (в)

Влияние геометрии режущего лезвия на температуру резания определяется коэффициентом K_θ . Например, с увеличением переднего угла лезвия γ снижается сила резания P_z , работа резания и количество тепла (рис. 3.60, б). Однако при этом ухудшаются условия отвода тепла, т.к. уменьшается величина угла заострения β . С увеличением γ выше $\gamma_{\text{опт}}$ снижается массивность лезвия резца, ухудшаются условия отвода тепла, что приводит к повышению θ .

С уменьшением угла в плане φ увеличивается угол при вершине ε , что приводит к возрастанию массы режущего лезвия и улучшению теплоотвода, а, следовательно, к снижению θ и наоборот (рис. 3.60, в).

3.9.4. Управление тепловыми явлениями при резании

Целью управления тепловыми явлениями при резании является общее изменение температуры в зоне обработки и направленное изменение температуры отдельных участков инструмента и заготовки. Достижение этой цели позволяет создать оптимальные условия контакта инструмента с заготовкой, снизить температурные деформации элементов технологической системы, повысить стойкость инструмента и т.д. Для общего изменения температуры резания применяются способы регулирования мощности теплообразования и длительности контакта инструмента с обрабатываемым материалом; ротационной обработки; комбинирования различных видов энергии; подачи СОЖ. Для направленного изменения температуры применяются способы регулирования размеров контактных площадок; дополнительные теплоотводящие кромки и фаски; различное размещение и размеры режущих пластин, а также использование материалов режущих пластин с различным коэффициентом теплопроводности. Рассмотрим примеры реализации этих способов.

Регулирование мощности тепловыделения может быть достигнуто изменением режима резания, геометрии и конструкции инструмента.

Уравнение (3.53) с учетом эмпирической зависимости силы резания от элементов режима резания может быть представлено в виде формулы:

$$Q = C_{pz} b^{x_{pz}} \cdot a^{y_{pz}} \cdot v^{z_{pz}}, \quad (3.56)$$

где b и a – соответственно ширина и толщина среза;

C_{pz} – коэффициент, зависящий от свойств материала заготовки;

$x_{pz} = 1, y_{pz} = 0,7 \dots 0,8, z_{pz} = -(0,1 \dots 0,2)$ – показатели степени при соответствующих аргументах (численные значения приведены для случая обработки конструкционных материалов).

Несмотря на большое значение показателя степени x_{pz} влияние b на количество теплоты резания невелико, т.к. с увеличением b возрастает длина контакта инструмента с заготовкой и стружкой и улучшается теплоотвод, что практически не изменяет удельную мощность тепловыделения. Поэтому наибольшее влияние на удельную мощность тепловыделения оказывают v и a . Управление скоростью резания и подачей для поддержания необходимого уровня мощности тепловыделения широко применяется при

обработке торцовых и конических поверхностей заготовок на лоботокарных и карусельных станках, сложных контуров на станках с ЧПУ.

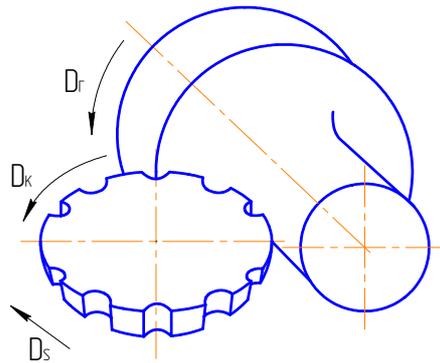
Увеличивая скорость резания на 2 ... 3 порядка ($v = 200 \dots 1000$ м/с) по сравнению с обычно применяемыми значениями v , можно не только поддерживать постоянное тепловыделение, но и снижать температуру резания при одновременном повышении производительности процесса резания. Достигается это за счет того, что при *сверхскоростном резании* отделение срезаемого слоя происходит в результате не пластического, а хрупкого разрушения, требующего меньшей работы деформирования металла в зоне резания.

Эффективным способом регулирования мощности тепловыделения является *распределение работы резания между несколькими инструментами или зубьями, работающими последовательно или одновременно*. Наглядным примером является замена расточного резца зенкером с числом зубьев z . При одинаковой подаче на один оборот заготовки или инструмента толщина среза, приходящегося на одно лезвие зенкера, в z раз меньше, чем при работе резцом. Поэтому и тепловыделение в зоне резания каждого зуба зенкера меньше, чем в зоне резания расточного инструмента. Вместе с тем мощность тепловыделения при работе многолезвийным инструментом, по сравнению с мощностью тепловыделения при работе однолезвийным, снижается непропорционально изменению толщины среза, т.к. вследствие особенностей процесса пластического деформирования удельные энергозатраты на удаление 1 мм^3 материала заготовки, а значит и тепловыделение, повышаются с уменьшением толщины среза одним лезвием.

Регулирование длительности контакта инструмента с заготовкой как фактор изменения температуры резания основано на выводе (см. рис. 3.59, б) о более низких температурах на поверхностях инструмента при неустановившемся теплообмене, чем при стационарном. Неустановившийся теплообмен характерен, например, для процесса строгания, где средний уровень температур можно регулировать соотношением между скоростями рабочего и вспомогательного ходов. При торцовом фрезеровании оптимальное соотношение между временем резания и холостого пробега фрезы можно получить, рассчитав диаметр инструмента при заданной ширине фрезерования.

Преимущества теплового режима прерывистого резания можно использовать и при обтачивании, например, фрезоточении и ротационном точении заготовок (рис. 3.61).

а



б

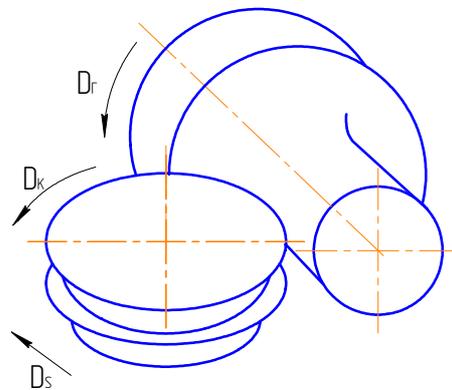


Рис. 3.61. Схемы фрезерокарной (а) и ротационной (б) обработки

При фрезеровании (рис. 3.61, а) используется специальный инструмент с расположенными по окружности лезвиями, которому помимо движения подачи D_s сообщается дополнительное вращательное движение D_k . При этом достигается снижение температуры в зоне резания и повышение стойкости инструмента. Кроме того, обеспечивается устойчивое стружкодробление и повышение производительности обработки, так как глубина резания в этом случае не связана с шириной среза.

При ротационном точении круглым одним или двумя коаксиально установленными резцами (рис. 3.61, б) снижение температуры резания связано не только с нестационарностью теплообмена, но и с частичной заменой трения скольжения на трение качения, что снижает мощность тепловыделения. Этот фактор наряду с удлинением активного участка режущей кромки приводит к значительному повышению стойкости вращающегося резца по сравнению с традиционным токарным резцом.

Управлять тепловыми явлениями при резании можно также путем рационального использования смазочно-охлаждающих сред, комбиниро-

ванием различных видов энергии, выбором рациональной конструкции режущей части инструмента и другими методами, которые будут рассмотрены в соответствующих разделах курса.

3.10. Методы экспериментального определения теплоты и температуры в элементах технологической системы

Экспериментальное определение теплоты и температуры в технологической системе необходимо при решении тепловых задач опытным путем и для проверки теоретических расчетов температуры.

Методы определения температуры делятся на косвенные и прямые. К *косвенным* относятся методы оценки значений температуры по некоторым ее косвенным проявлениям. Например, по изменению составляющей силы резания P_z , т.к. количество тепла определяется по формуле $Q = P_z \cdot v$. *Прямые методы* основываются на сравнительно более точном определении температуры с использованием температурных датчиков. Прямые методы, в свою очередь, подразделяются на *контактные* и *бесконтактные*. К *контактным* относят методы и устройства, в которых между датчиком температуры и объектом измерения имеется непосредственный контакт. К *бесконтактным* относят методы, при которых датчики измерительных устройств находятся на некотором удалении от объекта, температура которого подлежит определению.

3.10.1. Контактные методы

При контактных методах используются термометры, термоиндикаторы, термопары; при бесконтактных – радиационные и другие устройства, оптические, акустические и пневматические датчики.

В силу специфики измерения температуры элементов технологической системы термометры (ртутные, монометрические и механические) применяются в основном для определения температуры жидкостей, расплавов и при тарировании. Также ограниченное применение находят термоиндикаторы, которые подразделяют на химические, термохимические и плавления. Термоиндикаторы выпускаются в виде термокарандашей, термотаблеток, термокрасок, термолаков и термобумаги. Термоиндикаторы имеют диапазон измерения температуры от 20 °С до 1500 °С и несколько изменений цвета (от 1 до 6). Каждый из цветов показывает определенную температуру. Например, фторид кобальта CoF_2 по цвету оранжевый, а при температуре 85 °С становится светло-розовым.

Термоиндикаторы в виде плавких вставок представляют собой вещества, которые в определенном интервале температур переходят в жидкое кристаллическое состояние. В качестве таких веществ чаще всего используют олово ($\theta_{пл} = 231,9 \text{ }^\circ\text{C}$), кадмий ($\theta_{пл} = 320,9 \text{ }^\circ\text{C}$), цинк ($\theta_{пл} = 419,5 \text{ }^\circ\text{C}$), серебро ($\theta_{пл} = 960 \text{ }^\circ\text{C}$), медь ($\theta_{пл} = 1083 \text{ }^\circ\text{C}$).

Из прямых методов наиболее широкое применение получили методы с использованием термопар, calorиметров и радиационных пирометров.

Термопарой называется спай двух разнородных металлов, общая точка которых С называется горячим спаем, а все остальные соединения разнородных металлов А и В в цепи термопары называются холодными спаями (рис. 3.62).

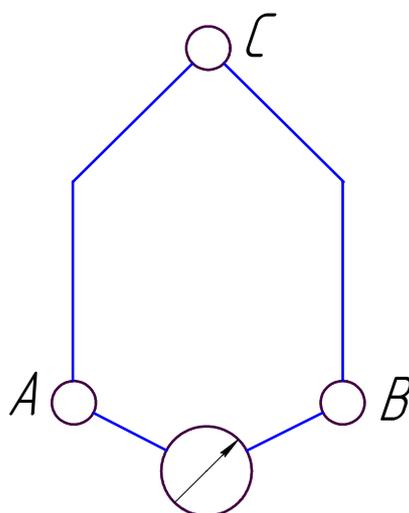


Рис. 3.62. Принципиальная схема термопары

В термопарах используют явление, которое состоит в том, что в замкнутой цепи из двух разнородных металлических проводников при нагреве одного из спаев возникает электрический ток или так называемая термоэлектродвижущая сила (термо-ЭДС). Термопара фиксирует разность температур между горячим и холодным спаями. Холодные спаи могут поддерживаться при комнатной температуре или нулевой температуре, которая обеспечивается за счет размещения холодных спаев в сосуде с таящим льдом.

К термопаре, используемой для измерения температуры резания, предъявляются следующие требования: 1) термо-ЭДС сплава должна быть достаточно большой; 2) температура плавления термоэлектродов должна

быть выше, чем измеряемая температура тела; 3) материалы сплава должны быть коррозионно-стойкие, прочные и пластичные; 4) характеристики термоэлектродов должны быть неизменны в процессе эксплуатации. Термопары при измерении температуры резания делятся на искусственные, полуискусственные или полустественные, естественные (рис. 3.63). Искусственная термопара состоит из двух проводников, не являющихся инструментом и заготовкой (рис. 3.63, а). Достоинство искусственной термопары – это возможность использования стандартных термопар с известными термоэлектрическими характеристиками. Недостаток – измеряемая термопарой температура ниже температуры на контактных поверхностях инструмента и зависит от расстояния термопары до указанных поверхностей. Искусственные термопары могут быть прижимные, закладные, бегущие, напыленные, перерезаемые. Например, бегущие термопары применяются для изучения закона распределения температуры на контактных поверхностях инструмента (рис. 3.64). Обработка выполняется в виде винтового гребня с отверстием под электроды из проволоки диаметром 0,1 мм и материала – медь, константант. До начала резания проводники не замкнуты и их контакты К1-К2 и К3-К4 подсоединены к измерительным приборам. При перерезании электроды замыкаются, и приборы фиксируют изменение температуры резания на передней и задней поверхностях режущего инструмента. В *полуискусственной термопаре* только один из проводников не принадлежит компонентам технологической системы, а второй присутствует в ней естественно, выполняя какую-либо функцию в процессе обработки (рис. 3.63, б). Полуискусственная термопара имеет следующие преимущества: 1) проще искусственной; 2) позволяет уменьшить объем термочувствительной зоны термопары до площади поперечного сечения электрода; 3) сравнительно просто закладывать термоэлектрод в объект; 4) применение одного стандартного термоэлектрода (медь, хромель, константант, алюмель). Недостатки этой термопары: 1) необходимость изготовления специальных гнезд и отверстий для закрепления электродов; 2) необходимость тарировки стандартного термоэлектрода с материалом резца или заготовки.

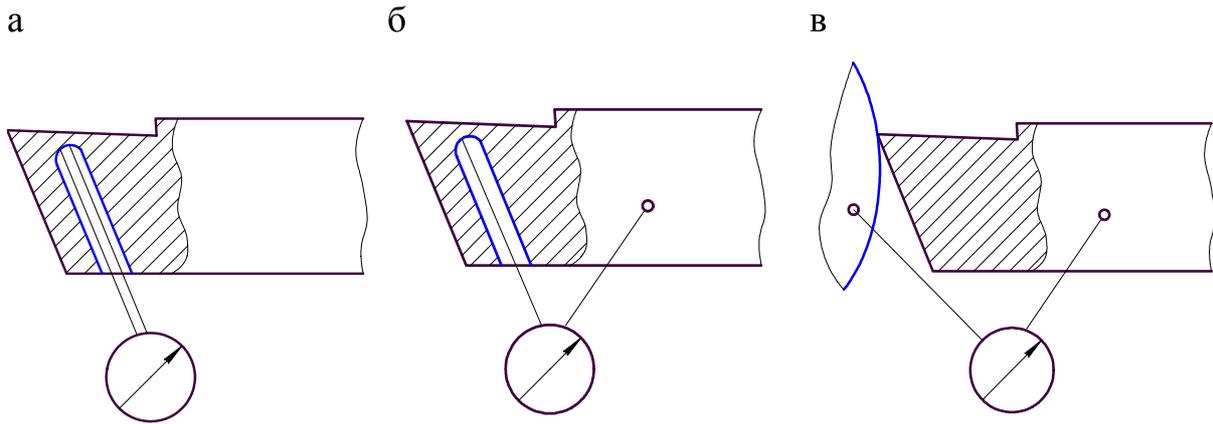


Рис. 3.63. Схемы искусственной (а), полуискусственной (б) и естественной (в) термопар

В естественной термопаре оба проводника, образующие спай, естественно присутствуют в технологической системе, участвуя в ней в качестве необходимых компонентов (рис. 3.63, в).

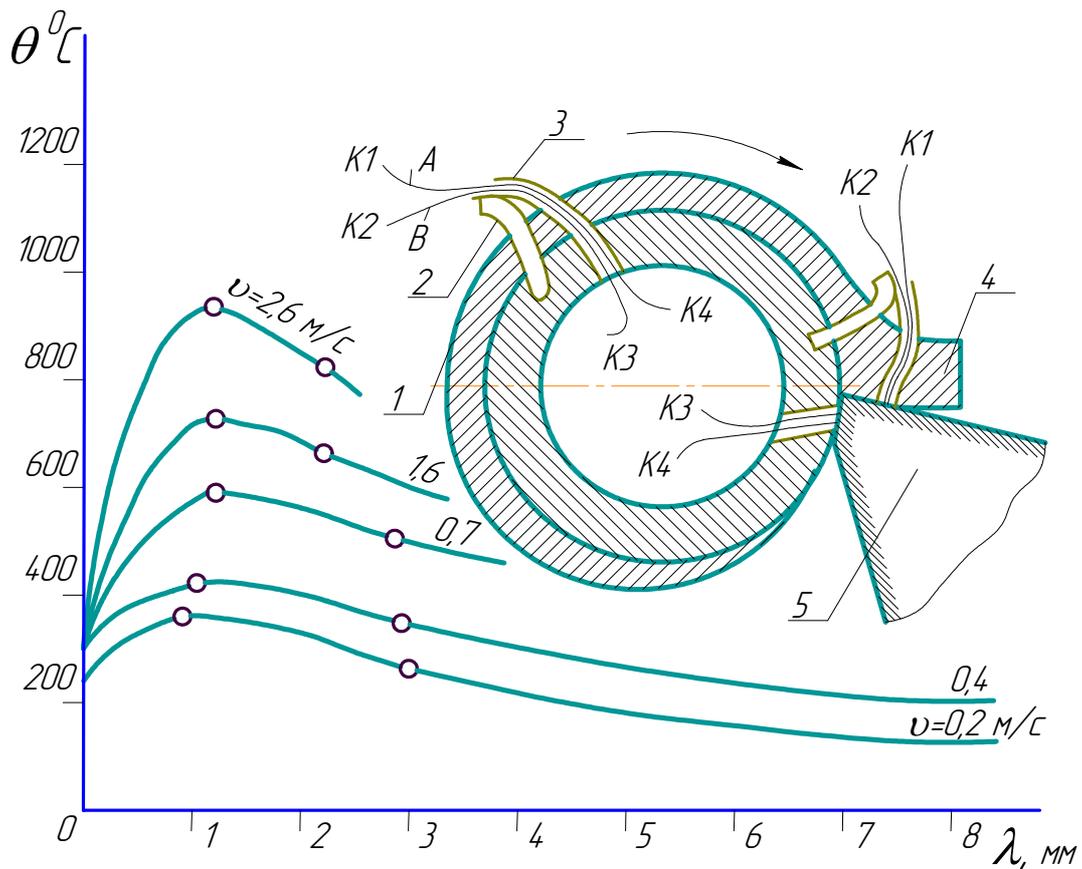


Рис. 3.64. Перерезаемая (бегущая) искусственная термопара и зависимость распределения температуры θ на прирезковой поверхности стружки λ при точении заготовки из стали 45 (резец ВК8, сечение среза $6 \times 0,5 \text{ мм}^2$)

Преимущества естественной термопары: 1) простота использования; 2) дает информацию о температуре нагрева непосредственно контактных площадок инструмента, т.е. о той температуре, которая наиболее опасна для инструмента. Недостатки: 1) необходимость тарирования любой вновь образуемой термопары, например, при замене изношенного резца; 2) термопара дает среднюю температуру на контактных площадках инструмента; 3) невозможность в процессе тарирования воссоздать реальные условия контакта термоэлектродов.

Примером естественно образуемой термопары может служить контакт резца и заготовки при обработке на токарном станке (рис. 3.65). Схема измерения включает миллиамперметр 1, ртутную ванночку 2, гибкий контакт 3, изолирующую заглушку 4, токопровод 5, заготовку 6, инструмент 7 и изолирующие прокладки 8.

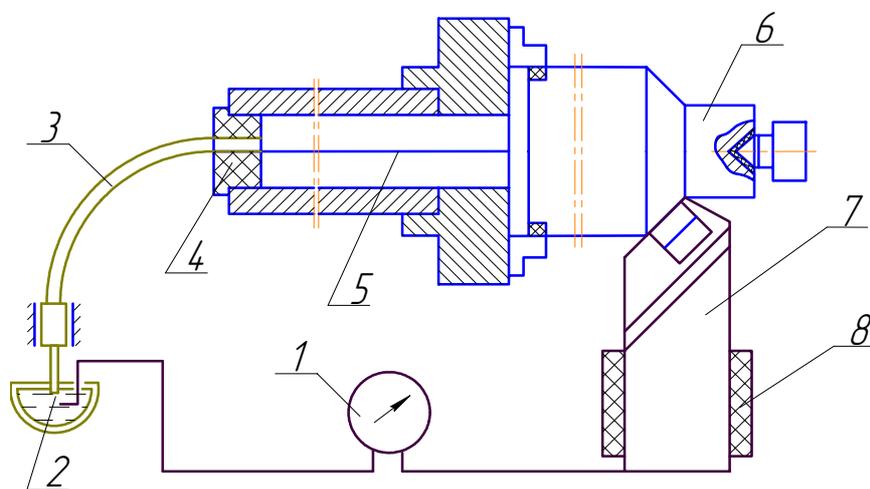


Рис. 3.65. Схема измерения температуры резания естественной термопарой

Еще одним примером схемы измерения температуры резания естественной термопарой является метод двух резцов. В этом случае в качестве термоэлектродов используются резцы из разных материалов. Термо-ЭДС, возникающая вследствие отличия термоэлектронных свойств инструментальных материалов резцов по закону аддитивности не зависит от материала заготовки, которая в этом случае выполняет функцию только электропроводника. По точности этот метод уступает однорезцовому, т.к. предполагает одинаковые температуры контактных поверхностей обоих резцов, что невозможно.

Эффективны термопары в виде напыленных или пластинчатых термоэлектродов, которые могут использоваться в зависимости от их количества и схемы размещения как искусственные, полуискусственные и естест-

венные при различных видах обработки, в том числе при нетокопроводящих материалах заготовки и инструмента (рис. 3.66). Металлические пластины- термоэлектроды 4 толщиной $a_{тн}$ зажимаются гайкой 3 через изолирующие прокладки 5 толщиной $a_{ип}$ между двумя частями заготовки 1 и 2, установленными на полу оправку. К термоэлектродам 4 посредством проводников, находящихся в полости оправки, подсоединен прибор 7. В процессе резания режущий инструмент 6 перерезает термоэлектроды 4 и замыкает их между собой, создавая “горячий” спай термопары. Возникающая в цепи термоэлектродов термоЭДС за счет их нагрева в зоне резания фиксируется прибором 7. При такой схеме измерения можно получить зависимости изменения температуры резания от ширины контакта B или глубины резания t за один проход режущего инструмента.

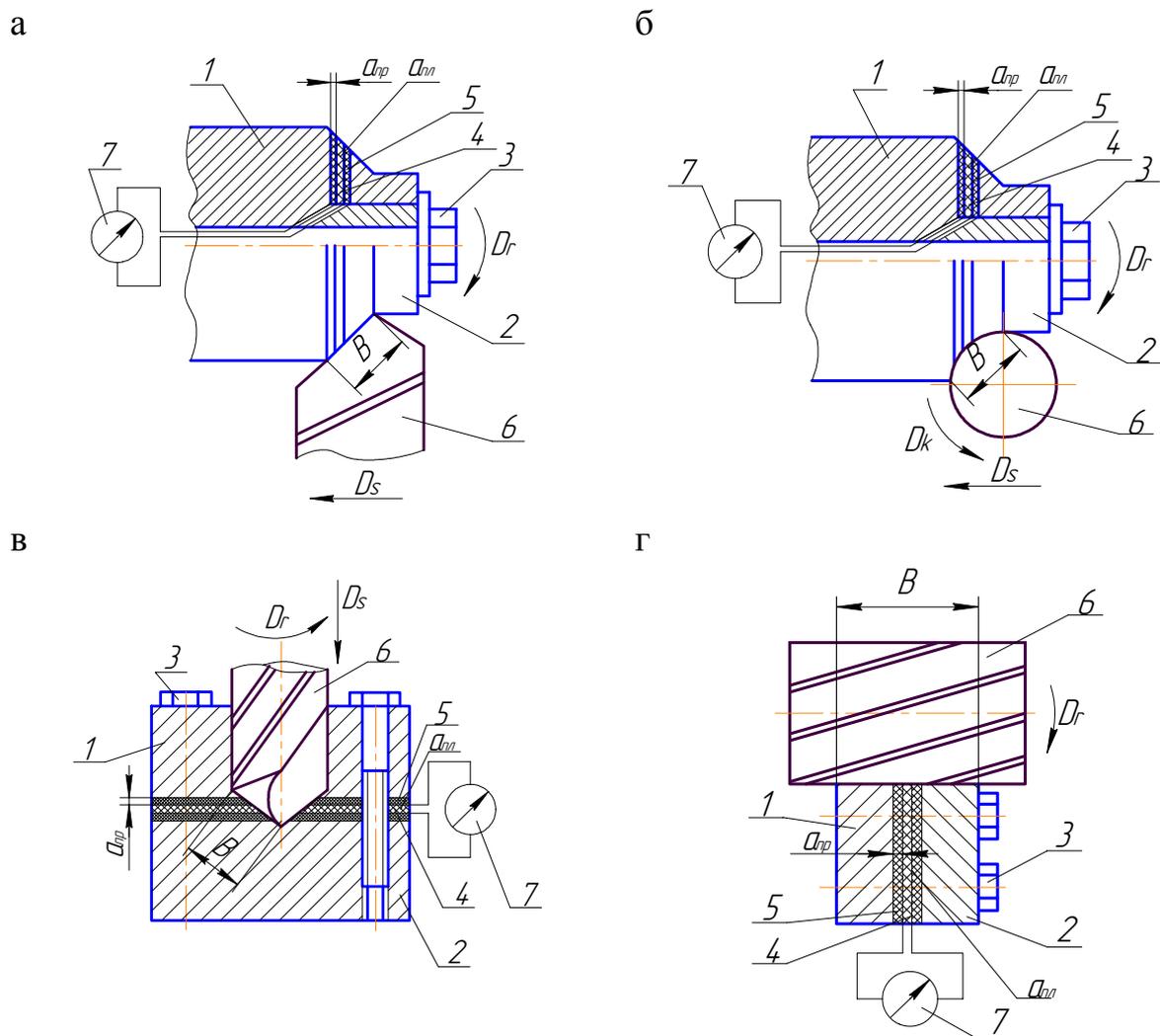


Рис. 3.66. Схемы измерения температуры резания с использованием пластинчатых термопар при обтачивании (а), ротационном точении (б), сверлении (в) и фрезеровании (г):

1 и 2 – части заготовки; 3 – гайка; 4 – термоэлектрод; 5 – изолятор;
6 – режущий инструмент; 7 – прибор

3.10.2. Бесконтактные методы

Калориметрический метод заключается в применении емкостей с жидкостью (водой) 1 и для улавливания отлетающей стружки 2, которые устанавливаются под зоной обработки (рис. 3.67, а).

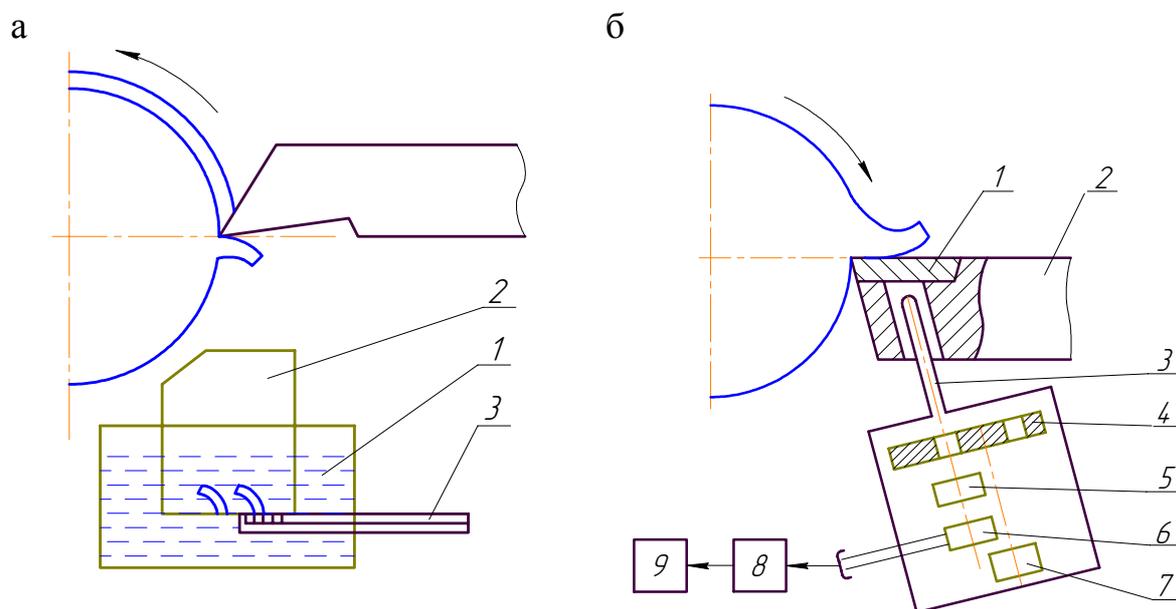


Рис. 3.67. Схемы измерения температуры резания калориметром (а) и радиационным пирометром (б)

После попадания стружки в калориметр вода в нем перемешивается для выравнивания температуры. После перемешивания воды с помощью термометра 3 измеряется ее температура. Затем стружка взвешивается на аналитических весах и по массе стружки, температуре воды в калориметре рассчитывается теплосодержание стружки в калориях и ее среднеобъемная температура:

$$\theta = \theta_{см} + \frac{G_B(\theta_{см} - \theta_B)}{c \cdot G}, \quad (3.57)$$

где $\theta_{см}$ – температура воды после попадания стружки;

θ_B – начальная температура воды;

G_B – масса воды в калориметре;

G – масса стружки или резца;

c – теплоемкость стружки или резца.

Радиационный метод основан на измерении уровня инфракрасного излучения в зоне резания радиационными пирометрами (рис. 3.67, б). Резущая пластина 1 резца 2 должна быть прозрачной, например, алмазной, для инфракрасных лучей, которые через светопровод 3 попадают на моду-

лятор 4 и далее через светофильтр на приемник излучения 6. Для привода модулятора 4 используется микродвигатель 7. Инфракрасное излучение усиливается усилителем 8 и регистрируется прибором 9. Этот метод эффективен, однако его применение при резании ограничивается малыми площадями зоны излучения тепла и ее закрытостью.

3.11. Температурные деформации элементов технологической системы

3.11.1. Температурные деформации станочного оборудования

Точность деталей и надежность элементов технологической системы (ТС) зависит от температурных полей и вызванных ими тепловых деформаций в узлах и механизмах оборудования. Изучение тепловых процессов в узлах технологического оборудования и отыскание путей управления этими процессами привлекает все большее внимание конструкторов, технологов и исследователей, поскольку требования к точности изделий и надежности работы станочного оборудования непрерывно возрастают.

Анализ тепловых явлений в технологическом оборудовании состоит из трех этапов: определение мощности источников тепловыделения; расчет или экспериментальное определение температурных полей в узлах и элементах конструкции оборудования; расчет или экспериментальное определение термических деформаций узлов и определение их влияния на точность взаимного расположения инструмента и заготовки, а также на работу механизмов станка.

Для упрощения решения задачи об оценке влияния температурных деформаций на точность обработки обычно рассматривают два периода в работе станка: первый период – от начала пуска станка до достижения теплового равновесия, соответствующий нестационарному тепловому состоянию системы, и второй – от момента теплового равновесия до окончания обработки – стационарное тепловое состояние. Температурные деформации узлов станка определяются их конструкцией, характером нагрева и т.п.

Общий порядок расчета включает следующие основные этапы.

Определение мощности источников тепловыделения, например для вращающихся деталей:

$$Q = 2\pi Mn, \quad (3.58)$$

где M – момент трения;

n – частота вращения.

Определение плотности теплового потока q исходя из мощности тепловыделения Q и размеров детали:

$$q = b \cdot \frac{Q_0(1 - \rho\theta) - (c\rho)_c \theta W}{\pi dl}, \quad (3.59)$$

Определение температуры θ исходя из плотности q и теплофизических характеристик материала и времени действия теплоты:

$$\theta = Q_0 \sqrt{\tau} / (A + B \sqrt{\tau}), \quad (3.60)$$

где $A = \frac{\pi^{3/2}}{2} \cdot \frac{\lambda_1}{\sqrt{\omega_1}} \cdot \frac{dl}{bL_B}$.

С учетом расчетов температуры определяются температурные деформации в деталях и узлах станков, в том числе в станинах, стойках, коробках и т.д. Например, для плоскошлифовального станка с вертикальным шпинделем (рис. 3.68) наиболее нагретыми узлами являются шпиндельная бабка 2, станина 5 и стол 4. Под действием тепловых потоков q_1 и q_2 произойдет деформирование стойки 1 и изменение положения круга 3 относительно стола 4. Плотности тепловых потоков q_1 и q_2 рассчитываются путем независимого рассмотрения теплообмена в бабке и станине.

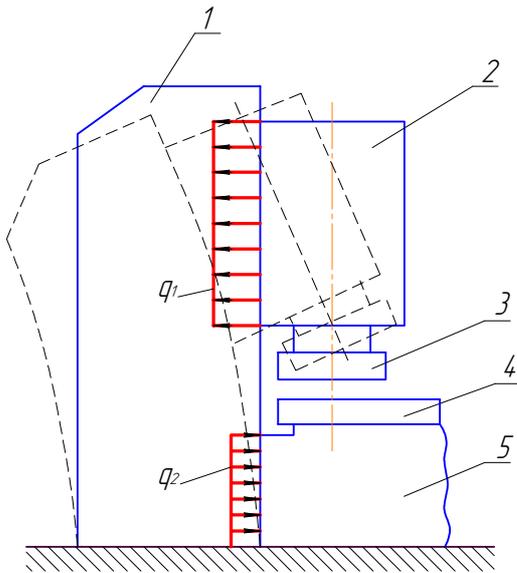


Рис. 3.68. Температурная деформация стойки плоскошлифовального станка, вызванная тепловым потоком плотностью q_1 на шпиндельной бабке и потоком плотностью q_2 на станине

Температурные деформации узлов станков под воздействием внутренних источников могут достигать значительных величин. Например, разность температур в шпиндельной бабке может изменяться от 10 до 15 °С (рис. 3.69, а), а смещение шпинделя в вертикальной и горизонтальной плоскостях – от нескольких сотых до десятых долей миллиметра. Температура валов и шпинделей обычно на 30 – 40 % выше средней температуры корпуса, в котором они смонтированы.

Существенное влияние на температурные деформации станка оказывает окружающая среда и внешние источники теплоты. Например, нагрев солнечными лучами бабки круглошлифовального станка в течение двух часов приводит к отклонению от прямолинейности перемещений стола на

4 ... 5 мкм. Аналогичное воздействие могут оказывать стоящие рядом станки или установки, имеющие мощные источники теплоты. Для уменьшения этого влияния наиболее эффективна установка оборудования в термokonстантных помещениях.

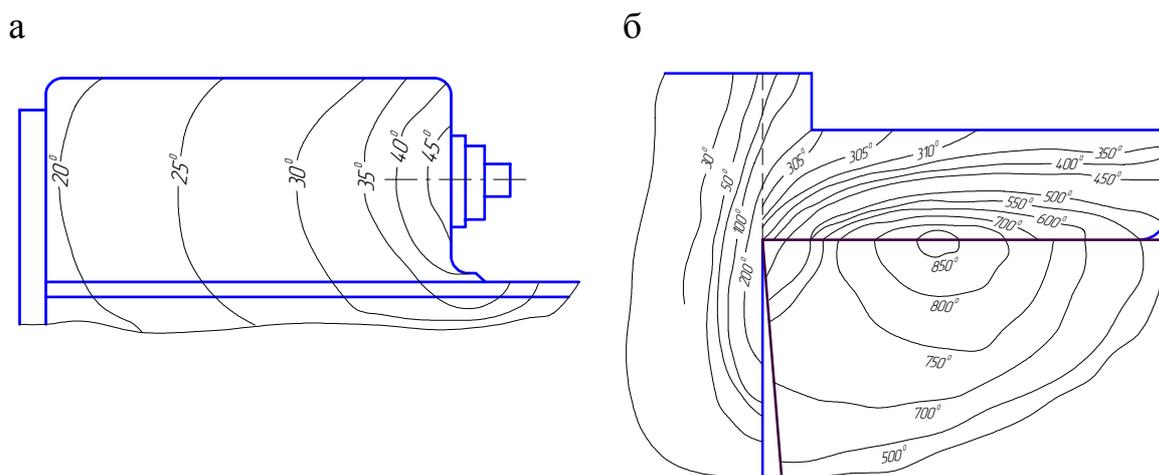


Рис. 3.69. Температурные поля и деформации в шпиндельной бабке станка (а), заготовке и инструменте (б)

3.11.2. Температурные деформации заготовок

На температурные деформации и напряжения заготовки наибольшее влияние оказывает теплота, образуемая при резании (рис. 3.69, б).

При обработке массивных заготовок этими деформациями можно пренебречь, а при изготовлении тонкостенных деталей – эти деформации сопоставимы с допусками 7-го качества.

В процессе обработки наблюдаются три периода распространения теплоты и развития температурных деформаций заготовки: 1) сравнительно небольшой нагрев заготовки с холодным слоем металла перед резцом (неустановившийся теплообмен); 2) установившийся теплообмен, когда температурные деформации возрастают до определенного уровня и остаются постоянными; 3) завершающий этап, когда температура необработанного участка заготовки повышается из-за отражения тепловой волны и температурные деформации растут.

Для устранения температурных деформаций заготовок наиболее эффективно применение СОЖ и их охлаждение в холодильнике.

3.11.3. Температурные деформации инструмента

Температурные деформации, например, резца проявляются в его удлинении, которое можно определять по формуле:

$$\Delta L = C(L/A)\sigma_B t S^{0.75} v^{0.5}, \quad (3.61)$$

где C – постоянный коэффициент, при $t \leq 1,5$ мм, $S \leq 0,2$ мм/об, $v = 100 \dots 200$ м/мин, $C = 45$;

L – вылет резца;

A – площадь поперечного сечения державки резца;

σ_B – временное сопротивление материала державки.

Удлинение резца может достигать 30 ... 50 мкм. Характерный вид температурного поля в инструменте представлен на рис. 3.69, б.

Уменьшение тепловых деформаций в элементах ТС можно обеспечить путем: 1) снижения тепловыделения; 2) интенсификацией отвода тепла; 3) рационализацией взаимного расположения элементов ТС; 4) применения системы компенсаторов. Снижение тепловыделения в узлах оборудования достигается, например, заменой подшипников скольжения на аэростатические опоры. Интенсифицировать отвод тепла позволяет применение СОЖ. Снижению тепловых деформаций способствует рациональное расположение шпиндельного узла, как правило, симметричное по отношению к колонне. Компенсация тепловых деформаций осуществляется путем использования некоторых конструктивных решений и адаптивных устройств.

3.12. Изнашивание и износ режущего инструмента

3.12.1. Виды изнашивания инструмента

Действующие на инструмент в процессе резания силы, напряжения и температура приводят к потере им режущих свойств. Потеря режущей способности инструмента вызывается *изнашиванием* его контактных (передней и задней) поверхностей. Изнашивание проявляется в *износе* лезвия инструмента. Под *износом* понимают изменение формы и размеров режущего инструмента (лезвия) вследствие изнашивания при резании.

Неисправный инструмент снижает качество обработки, в частности увеличивает шероховатость и ухудшает состояние поверхностного слоя детали. Поэтому важно знать момент снятия инструмента со станка для его восстановления. С точки зрения себестоимости (C) процесса резания существует оптимальное время (τ_0) работы инструмента до потери им режущих свойств и восстановления (рис. 3.70). До значения τ_0 , когда инструмент сохраняет режущую способность и обеспечивает требования к качеству и количе-

ству выпускаемых деталей, затраты на инструмент окупаются, а дальнейшая эксплуатация инструмента (после τ_0), когда он теряет режущую способность, приводит к снижению производительности и удорожанию процесса обработки.

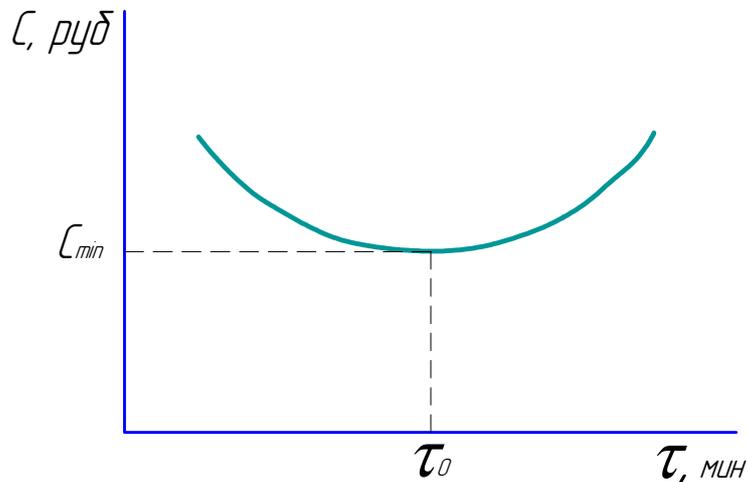


Рис. 3.70. Зависимость себестоимости обработки от времени работы инструмента

Следует отметить, что пока еще нет строгой теории изнашивания режущих инструментов. Достигнутые на настоящее время результаты исследований в этой области основываются на существующих представлениях науки о трении и износе (трибологии). Чаще всего при резании выделяют следующие виды изнашивания инструмента: абразивно-механическое, адгезионно-диффузионное, окислительное, термоусталостное. Рассмотрим механизм проявления этих видов изнашивания.

Абразивно-механическое изнашивание

Модель абразивно-механического изнашивания представлена на рис. 3.71, а. При движении стружки по передней поверхности инструмента микровыступы приконтактной поверхности стружки взаимодействуют с аналогичными микровыступами передней поверхности. Вследствие большого давления и высокой температуры на площадке контакта происходит разрушение взаимодействующих микровыступов. Это разрушение проявляется в пластическом деформировании и срезании. Наиболее вероятное срезание выступов имеет место на стружке, однако за счет циклического воздействия на микровыступы передней поверхности инструмента имеют место разрушения инструментального материала. С течением времени происходит сглаживание микровыступов инструмента, вследствие чего увеличивается фактическая площадь контакта инструмента со стружкой и заготовкой. Снижается контактное давление, и интенсивность изнашива-

ния уменьшается. Продукты износа, попадая между стружкой и инструментом, измельчаются в порошок и, окисляясь под действием температуры, превращаются в «абразив», который определяет дальнейший износ инструмента.

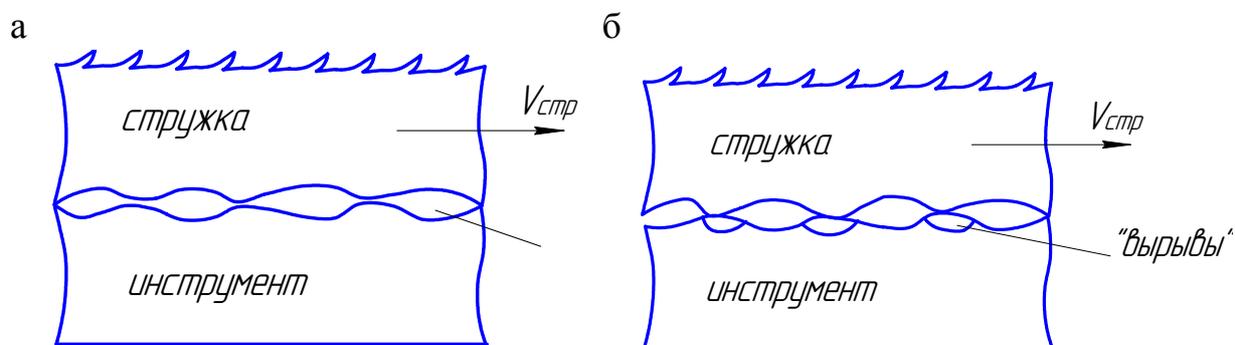


Рис. 3.71. Схемы механизмов абразивного (а) и адгезионно-диффузионного (б) изнашивания лезвия инструмента при контакте со стружкой

В зависимости от времени работы различают три этапа изнашивания инструмента (рис. 3.72):

- 1 этап – интенсивное изнашивание;
- 2 этап – равномерное изнашивание за счет воздействия окислов;
- 3 этап – катастрофическое изнашивание.

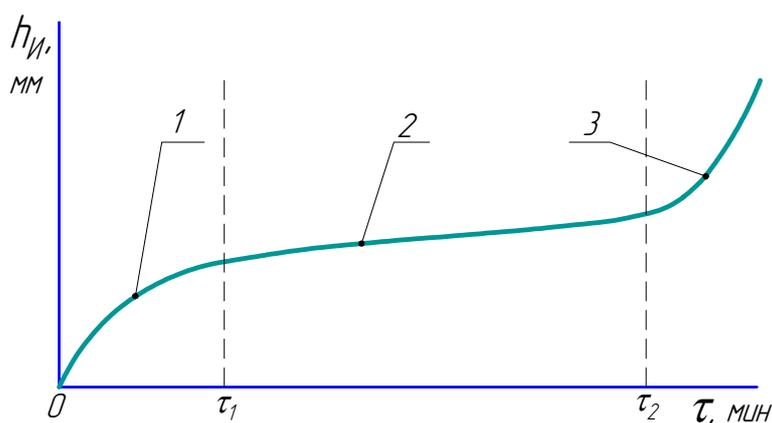


Рис. 3.72. Зависимость величины фаски износа лезвия инструмента от времени обработки:
1 – интенсивное изнашивание, 2 – равномерное изнашивание,
3 – катастрофическое изнашивание

На первом этапе наблюдается ускоренное изнашивание, являющееся следствием истирания выступающих участков исходных неровностей на заточенной поверхности инструмента. На втором этапе, когда шерохова-

тость рабочих поверхностей инструмента становится небольшой, износ постепенно увеличивается приблизительно пропорционально времени работы инструмента. Это наиболее продолжительный период работы. Этап быстрого (катастрофического) изнашивания сопровождается выкрашиванием и даже поломками инструмента. Этот вид изнашивания недопустим для нормальной работы инструмента. Режущий инструмент целесообразно эксплуатировать до наступления катастрофического износа.

Адгезионно-диффузионное изнашивание

Адгезионно-диффузионное изнашивание – это два вида изнашивания (адгезионное и диффузионное), объединенных одновременным воздействием на инструмент в процессе резания.

Адгезией называется молекулярное схватывание взаимодействующих тел под влиянием высокой температуры и большого давления. Под *адгезионным изнашиванием* лезвия понимают отрыв силами адгезии мельчайших частиц инструментального материала в процессе трения инструмента с обрабатываемым материалом.

Диффузией называется взаимное проникновение атомов двух взаимодействующих тел. Высокие температуры, большие пластические деформации и адгезия в зоне контакта при высоких скоростях резания в сильной степени способствуют взаимному диффузионному растворению инструментального и обрабатываемого материалов. Диффузионное изнашивание проявляется в следующем: 1) в удалении стружкой диффундирующих частиц инструментального материала; 2) в проникновении частиц обрабатываемого материала в инструментальный, что уменьшает прочность инструмента; 3) во взаимном растворении частиц инструментального и обрабатываемого материалов, что увеличивает степень их химического «родства» и влияние адгезии (к адгезии более склонны «родственные» материалы).

Рассмотрим механизм адгезионно-диффузионного изнашивания (рис. 3.71, б). На взаимодействующих микровыступах передней поверхности инструмента и стружки возникает явление адгезии. Это явление приводит к дополнительным разрушениям в материалах стружки и инструмента при их относительном движении. Разрушения происходят чаще всего в плоскости схватывания и в материале стружки, однако разрушения наблюдаются и в поверхностных слоях лезвия инструмента вследствие циклического воздействия сходящей стружки. В результате адгезионного износа на поверхности инструмента появляются «вырывы». С повышением температуры резания число очагов схватывания увеличивается, что, казалось бы, должно привести к усилению адгезионного износа. Однако «размягчение» обрабатываемого материала уменьшает разрушения инструмен-

тального материала. И, тем не менее, при больших температурах (более 800 °С) наблюдается интенсивное увеличение износа инструмента. Этот износ определяется влиянием диффузии. Диффузия увеличивается с увеличением температуры и времени контакта. Степень влияния температуры на диффузию значительно выше степени влияния времени контакта, поэтому с увеличением скорости резания диффузия резко увеличивается.

3.12.2. Характер износа различных инструментов

Износ инструмента проявляется в виде лунки на его передней поверхности, фаски на задней поверхности и радиуса режущей кромки. Образование лунки на передней поверхности и ее последующее развитие несколько увеличивает передний угол и поэтому влечет за собой уменьшение деформации и сил на передней поверхности инструмента. Однако это уменьшение невелико и на технологических характеристиках процесса стружкообразования почти не сказывается.

Увеличение фаски износа на задней поверхности способствует интенсификации на этой поверхности адгезионных процессов, увеличению силы трения и силы нормального давления. При этом возрастают деформация, упрочнение поверхностного слоя изделия, ухудшается качество, повышается температура резания.

Увеличение радиуса режущей кромки ведет к увеличению толщины слоя, подминаемого под заднюю поверхность, что повышает нормальные контактные напряжения и силу. В итоге наблюдаются те же явления, что и при увеличении фаски износа.

В зависимости от условий резания различным оказывается внешний вид изношенного инструмента (рис. 3.73). Например, инструменты, работающие при низких скоростях резания (протяжки, фасонные и строгальные резцы) изнашиваются в основном по режущей кромке. Изнашивание сверл наблюдается по задней поверхности (рис. 3.73, б). Фрезы изнашиваются по режущей кромке и задней поверхности (рис. 3.73, в).

Высокоскоростной фрезерный инструмент изнашивается в основном за счет абразивно-механического воздействия. Адгезионно-диффузионное изнашивание на фрезах не проявляется, т.к. температура резания при фрезеровании в одинаковых с точением условиях меньше в 2 ... 3 раза.

Наиболее сложным образом изнашиваются токарные резцы (рис. 3.73, г ... е). У токарных резцов изнашивание проявляется в виде радиуса режущей кромки, площадки (фаски) износа по задней поверхности и лунки на передней поверхности.

Закругление режущей кромки происходит по причине ее осыпания в результате вибраций в процессе резания и механического изнашивания. Износ по задней поверхности является результатом абразивно-механического изнашивания. Появление лунки обусловлено максимальной температурой на передней поверхности, значения которой могут достигать 1000 – 1500 °С. Это и приводит к интенсификации адгезионно-диффузионного изнашивания инструмента.

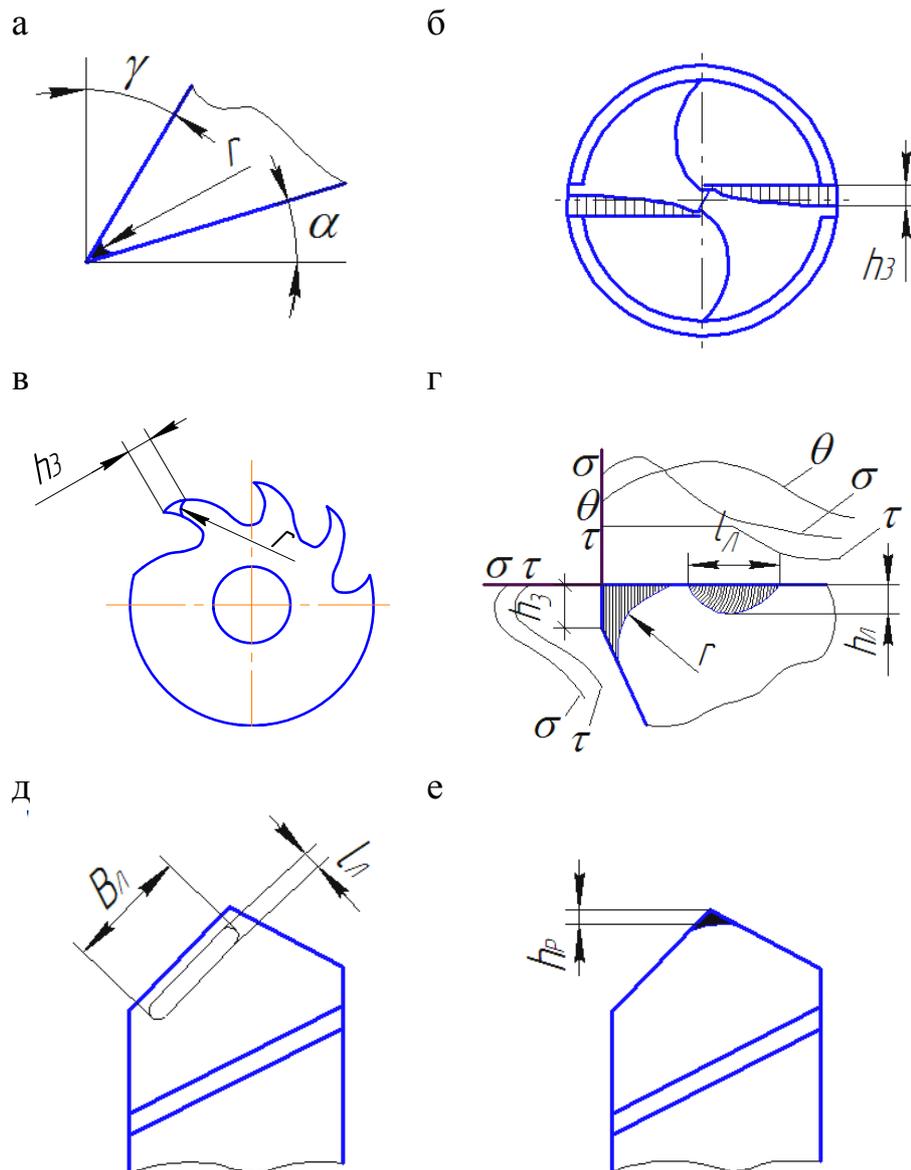


Рис. 3.73. Схемы износа инструментов в виде закругления режущей кромки с радиусом r , фаски h_3 , лунки l_l :
а – работающих при низких скоростях резания; б – сверл; в – фрез;
г, д, е – токарных резцов

Мерой изношенности инструмента могут служить линейный и массовый износы. Линейный износ оценивается по величине площадки износа на задней поверхности h_u и глубине h_l лунки износа на передней поверхности.

При чистовой обработке наибольший интерес представляет износ инструмента, измеряемый в направлении перпендикуляра к обработанной поверхности. Такой характер износа называется *размерным*. Величина размерного износа определяет увеличение или уменьшение размера обрабатываемой поверхности детали по мере изнашивания инструмента. Критерий линейного износа достаточно надежен при разработке промышленных норм допускаемых износов и норм расхода инструмента на переточки. Для исследования физической природы изнашивания более объективной характеристикой является *массовый износ*, который определяется как произведение объема изношенной части инструмента на плотность инструментального материала.

3.13. Работоспособное состояние режущего инструмента

3.13.1. Предельное состояние инструмента

При эксплуатации инструмента по мере его изнашивания наступает такой момент, когда дальнейшее резание инструментом должно быть прекращено, а инструмент отправлен на переточку. *Работоспособное состояние режущего инструмента (лезвия)* характеризуется таким состоянием, при котором он способен выполнять обработку резанием, согласно установленным в нормативно-технической документации условиям. При наступлении предельного состояния инструмента происходит изменение некоторых показателей процесса резания, например, изменение силы и температуры резания, появление вибраций, ухудшение качества обработки и т.д. Численные значения этих показателей процесса, по которым можно определить степень изношенности инструмента, названы *критериями предельного состояния, затупления или отказа*.

Критерий затупления – критерий отказа режущего инструмента (лезвия) характеризуется максимально допустимым значением износа режущего инструмента (лезвия), по мере достижения которого наступает его отказ.

Критерий отказа определяется в зависимости от требований к обработке при выполнении конкретной технологической операции. К критериям отказа относятся:

1. Линейный размер изношенной площадки на лезвии инструмента.
2. Сила резания.
3. Температура резания.

4. Шероховатость обработанной поверхности.
5. Уровень вибраций.
6. Уровень шума.

Наиболее простым и доступным является критерий линейного размера изношенной площадки на лезвии инструмента – $h_u = 0,4 \dots 0,8$ мм для чернового точения.

Силовой и температурный критерии используются в основном в лабораторных условиях. При увеличении износа инструмента увеличиваются сила и температура резания.

При чистовой обработке используется критерий шероховатости, при котором об износе инструмента судят по возникновению блестящих полосок на обработанной поверхности или другим поверхностным дефектам.

Удобными на практике являются вибрационный и шумовой критерии, т.к. они наблюдаются визуально или «на слух», или с использованием соответствующей аппаратуры.

Работоспособность инструмента характеризуется *надежностью*. Надежность режущего инструмента – комплексное свойство, включающее безотказность, долговечность и ремонтпригодность режущего инструмента.

При эксплуатации инструмента используется понятие *стойкости инструмента*. Под стойкостью инструмента понимают его способность работать до наступления катастрофического износа. Стойкость характеризуется периодом стойкости. *Период стойкости* режущего инструмента (лезвия) – время резания новым или восстановленным режущим инструментом (лезвием) от начала резания до отказа.

Период стойкости токарных резцов (стойкость): $T = 40 \dots 80$ мин. Период стойкости фрез: $T = 200 \dots 400$ мин.

Период стойкости:

$$T = f(c_0, c_u, c_{COЖ}, v, s, t, \gamma, \alpha, \lambda, \varphi \dots).$$

Скорость резания:

$$v = f(T, c_0, c_u, c_{COЖ}, s, t, \gamma, \alpha, \lambda, \varphi \dots).$$

3.13.2. Влияние на стойкость инструмента режима резания и геометрии инструмента

На практике установлена следующая связь стойкости с элементами режима резания:

$$T = \frac{C_T \cdot k_T}{v^{z_T} \cdot s^{y_T} \cdot t^{x_T}}, \quad (3.62)$$

где C_T – коэффициент, зависящий от условий обработки;

k_T – поправочный коэффициент на отличие условий экспериментатора от условий технолога;

z_T, y_T, x_T – дробные показатели степени;

v, S и t – скорость, подача и глубина резания.

Обычно из этой зависимости выражают скорость резания:

$$v^{z_T} = \frac{C_T \cdot k_T}{T \cdot s^{y_T} \cdot t^{x_T}},$$

$$v = \frac{C_T^{\frac{1}{z_T}} \cdot k_T^{\frac{1}{z_T}}}{T^{\frac{1}{z_T}} \cdot s^{\frac{y_T}{z_T}} \cdot t^{\frac{x_T}{z_T}}},$$

$$v = \frac{C_v \cdot k_v}{T^m \cdot s^{y_v} \cdot t^{x_v}}, \quad (3.63)$$

где $C_v = C_T^{\frac{1}{z_T}}, k_v = k_T^{\frac{1}{z_T}},$

$y_v = \frac{y_T}{z_T}, x_v = \frac{x_T}{z_T},$

$m = \frac{1}{z_T}$ – показатель относительной стойкости, характеризующий

интенсивность изменения скорости резания в зависимости от изменения стойкости инструмента.

По этой формуле производятся расчёты скорости резания, которая обеспечивает заданную стойкость инструмента.

Для построения зависимости стойкости инструмента от скорости резания определяют износ инструмента при различных значениях скорости резания (рис. 3.74). Затем при заданном оптимальном значении износа h_{opt} определяют период стойкости T для каждого значения скорости.

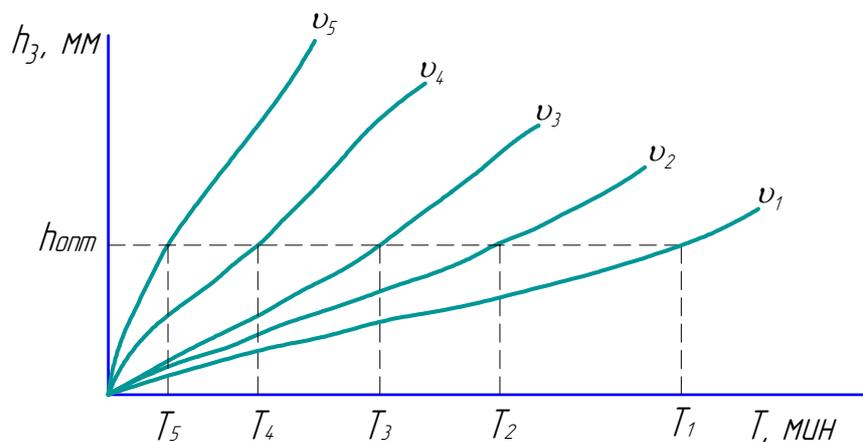


Рис. 3.74. Зависимость износа инструмента от времени обработки

Связь между скоростью резания и периодом стойкости графически имеет характеристику убывающей кривой, напоминающей гиперболу, во многих случаях на ней имеются ярко выраженные экстремумы (рис. 3.75, а).

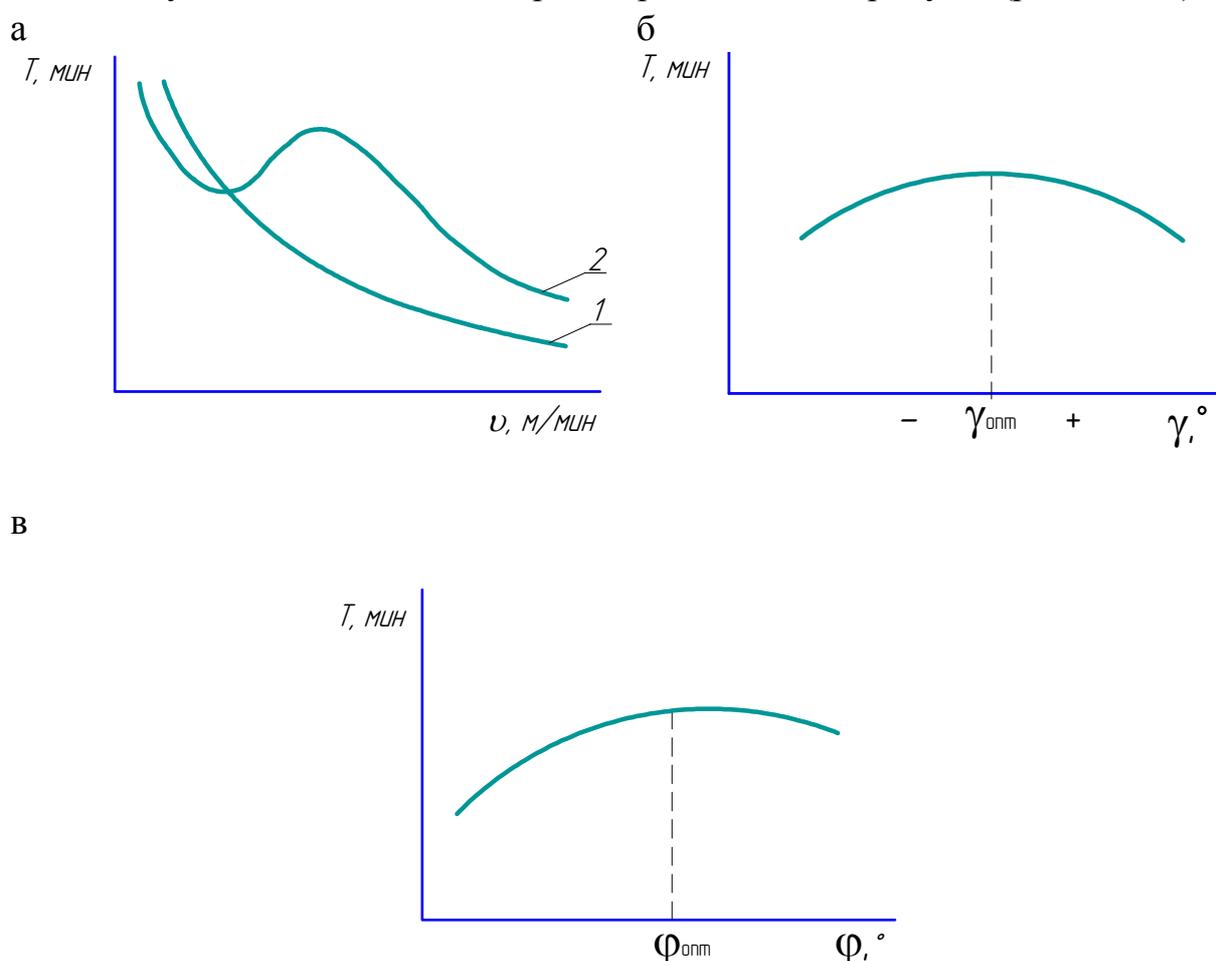


Рис. 3.75. Зависимости периода стойкости инструмента от скорости резания v (а), переднего угла γ (б) и угла в плане ϕ (в): 1 – резание без нароста; 2 – резание с наростом

Для объяснения немонотонности зависимости $T = f(v)$ предложены различные гипотезы, большинство из которых связывают изменение интенсивности изнашивания режущего инструмента с возможными изменениями, которые претерпевают механические свойства обрабатываемого материала и материала режущего инструмента. Так, максимальная стойкость инструмента из ВК8 в интервале $\theta = 1020 \dots 1070$ К объясняется профессором Зоревым Н.Н. снижением интенсивности адгезионно-усталостного изнашивания, вследствие благоприятного изменения соотношения твердостей обрабатываемого и инструментального материалов, уменьшением хрупкости и увеличением сопротивления циклическим и контактными нагрузками твердого сплава. Падение стойкости твердосплав-

ного инструмента при $\theta \geq 1070$ К, связывается с ростом интенсивности диффузионного изнашивания. Рассмотренный механизм уменьшения адгезионно-усталостного изнашивания с постепенным его переходом в диффузионный неприемлем для быстрорежущих сталей, т.к. их максимальная стойкость T отвечает температуре $\theta = 540 - 600$ К, тогда как диффузионный износ начинается с температуры ≈ 900 К.

Пики стойкости инструмента профессором Лоладзе Т.Н. связываются также с изменением механизма адгезионно-усталостного изнашивания, профессором Талантовым Н.В. – с температурно-деформационными условиями пластического деформирования металла в зоне контактного взаимодействия, профессором Макаровым А.Д. – с принципом постоянства оптимальной температуры резания для данной пары инструмент – деталь. Профессор Аваков А.А. указывает на возможность принципиальной общности причин изменения стойкости режущего инструмента при увеличении скорости резания и немонотонного характера зависимости износостойкости от скорости скольжения при обычном трении. Процессы, происходящие при резании в поверхностных слоях режущих кромок инструмента, и приводящие к появлению пиков стойкости, контролируются преимущественно малыми упруго-пластическими деформациями (микропластичностью).

Наибольшее влияние на стойкость T оказывает скорость резания v , затем подача S и глубина резания t через повышение температуры. Из этого следует, что нужно стремиться работать с большим отношением ширины и толщины среза b/a . При больших b увеличивается теплоотвод. С увеличением переднего угла γ падают сила P_z и температура резания θ , но ослабляется лезвие и ухудшаются условия отвода тепла, что приводит к снижению T . При тяжелых условиях обработки угол γ – отрицательный. С увеличением отрицательных значений γ растет P_z и θ . Вначале по мере увеличения переднего угла γ уменьшается коэффициент трения f и силы трения, поэтому растет T (рис. 3.75, б). При дальнейшем увеличении γ угол заострения лезвия β уменьшается, что снижает прочность резца и приводит к снижению стойкости. С изменением угла в плане ϕ изменяется b/a , при увеличении ϕ соответственно уменьшается b/a (рис. 3.75, в). При увеличении ϕ b/a уменьшается и при $\phi = 90^\circ$ b/a – минимально, уменьшение угла при вершине ε приводит к росту θ и падению T . Следовательно, ϕ должен быть также как можно меньше, однако при этом растет составляющая P_y . При малых значениях вспомогательного угла в плане ϕ_1 , увеличивается сила трения и износ, поэтому при увеличении ϕ_1 стойкость растет, однако ухудшаются условия теплоотвода, и уменьшается прочность лезвия. Чем больше угол наклона режущей кромки ($+\lambda$), тем лучше отвод тепла, при $+\lambda$ лезвие инструмента более прочное.

3.13.3. Разрушение инструмента, как результат образования и развития трещин

По современным представлениям макроскопическое разрушение является результатом постепенного развития и накопления микротрещин, которые с увеличением внешней нагрузки сливаются в макротрещину. Процесс зарождения и развития трещин зависит от продолжительности приложения нагрузки.

На практике встречаются два вида хрупкого разрушения режущего инструмента: выкрашивание режущих кромок и сколы режущего лезвия. *Выкрашивание* (pitting) – процесс образования ямок на поверхности трения в результате отделения относительно малых частиц материала при усталостном изнашивании. Выкрашивание – одна из форм катастрофического изнашивания. Выкрашивание в некоторых случаях связано с поверхностными дефектами инструментального материала, неоднородностью структуры, остаточными напряжениями и т.д. Наряду с этим выкрашивание связано с изменением напряженного состояния в переходных процессах резания – при входе и выходе инструмента из контакта.

Сколы проявляются в отделении относительно большого объема режущего лезвия инструмента, соизмеримого с длиной контакта стружки с передней поверхностью, а по ширине соизмеримого с шириной лезвия.

Опыты показали, что для заданного обрабатываемого материала скалывание режущего лезвия инструмента в сильной степени зависит от его формы и главным образом определяется углом заострения β , передним углом γ и главным углом в плане φ . Из режимов резания толщина среза оказывает наибольшее влияние на скалывание. Ширина среза действует в значительно меньшей степени. Скорость резания не оказывает столь существенного влияния, как толщина среза.

Для повышения износостойкости режущих инструментов используются:

- 1) новые инструментальные материалы, в том числе износостойкие покрытия;
- 2) новые конструкции инструментов для станков с ЧПУ, ГАП и т.п.;
- 3) новые стандарты, соответствующие уровню зарубежных фирм;
- 4) повышение точности изготовления инструментов;
- 5) комбинированные инструменты;
- 6) неперетачиваемые пластины;
- 7) ротационные инструменты.

3.14. Качество обработанной поверхности детали

3.14.1. Характеристики качества поверхности детали

Под *качеством детали* понимают свойства ее поверхностного слоя, которые формируются в результате воздействия на поверхность одного или нескольких последовательно применяемых технологических методов обработки. Качество обработанной поверхности характеризуется *шероховатостью и волнистостью*, а также физико-механическими свойствами поверхностного слоя, такими как *наклеп и остаточные напряжения*.

Шероховатостью поверхности называется совокупность неровностей с относительно малыми шагами, образующая рельеф поверхностей детали и рассматриваемая на определенной (базовой) длине.

Под *волнистостью* поверхности понимают совокупность периодически чередующихся возвышенностей и впадин, изменяющихся примерно по синусоидальному закону. Расстояние между смежными возвышенностями или впадинами превышает принимаемую при измерении шероховатости базовую длину.

Поверхность детали характеризуется макрогеометрией, микрогеометрией и субмикрогеометрией. К макрогеометрии можно отнести неровности на больших участках поверхности, к микрогеометрии относятся отклонения на участке примерно 1 мм^2 (шероховатость) и к субмикрогеометрии относятся неровности, обусловленные несовершенством внутреннего строения металла. Субмикроскопический рельеф рассматривается на участках поверхностей от одного до нескольких микрометров.

Шероховатость оценивается критерием R_z или высотой неровностей (рис. 3.76):

$$R_z = \frac{1}{5} \left(\sum_{i=1}^5 H_{i \max} + \sum_{i=1}^5 H_{i \min} \right), \quad (3.64)$$

где $H_{i \max}$ и $H_{i \min}$ – соответственно максимальные и минимальные отклонения профиля в пределах базовой длины;

а также арифметическим отклонением профиля:

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|, \quad (3.65)$$

где y_i – отклонение профиля неровностей от средней линии.

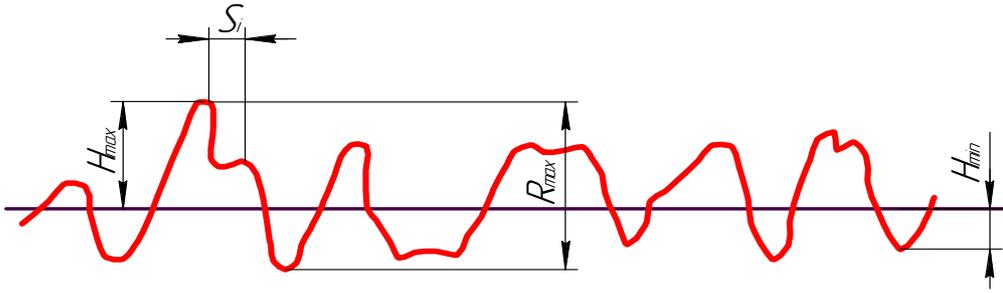


Рис. 3.76. Схема к определению шероховатости поверхности

3.14.2. Влияние на шероховатость поверхности режима резания и геометрических параметров инструмента

Наибольшее влияние на качество обработки оказывают режимы резания и геометрические параметры инструмента. Основные причины образования шероховатости поверхности: 1) геометрия и кинематика процесса резания; 2) упругие и пластические деформации; 3) вибрации.

Определим условия формирования неровностей в связи с геометрическими параметрами обработки.

При обработке поверхностей резцом с острозаточенной вершиной (рис. 3.77, а).

$$S_0 = ac + cb;$$

$$ac = \frac{ec}{\operatorname{tg}\varphi_1}; \quad cb = \frac{ec}{\operatorname{tg}\varphi};$$

$$S_0 = \frac{h}{\operatorname{tg}\varphi_1} + \frac{h}{\operatorname{tg}\varphi} = h\left(\frac{1}{\operatorname{tg}\varphi_1} + \frac{1}{\operatorname{tg}\varphi}\right);$$

высота микронеровностей

$$h = S_0 \frac{\operatorname{tg}\varphi_1 \cdot \operatorname{tg}\varphi}{\operatorname{tg}\varphi_1 + \operatorname{tg}\varphi}. \quad (3.66)$$

Как следует из формулы (3.64), чистовую обработку следует вести на малых подачах и резцом с минимальными углами в плане. В связи с этим новатором Колесовым предложен резец, который снимает остаточные гребешки дополнительной режущей кромкой с $\varphi = 18^\circ$ и производит калибровку поверхности участком режущей кромки с $\varphi = 0^\circ$. Причем длина этого участка превосходит значение подачи S_0 и составляет примерно $1,2S_0$. Высококачественное резание с применением таких резцов получило также название силового резания.

При обработке поверхностей резцом с радиусом вершины (рис. 3.77, б).

$$h = r - of = r - \sqrt{r^2 - \frac{S_0^2}{4}};$$

$$(r - h)^2 = r^2 - \frac{S_0^2}{4}; \quad r^2 - 2rh + h^2 = r^2 - \frac{S_0^2}{4};$$

высота неровностей

$$h = \frac{S_0^2}{8r}. \quad (3.67)$$

Как видно из формулы (3.67), для снижения шероховатости надо стремиться к уменьшению подачи и к увеличению радиуса при вершине резца.

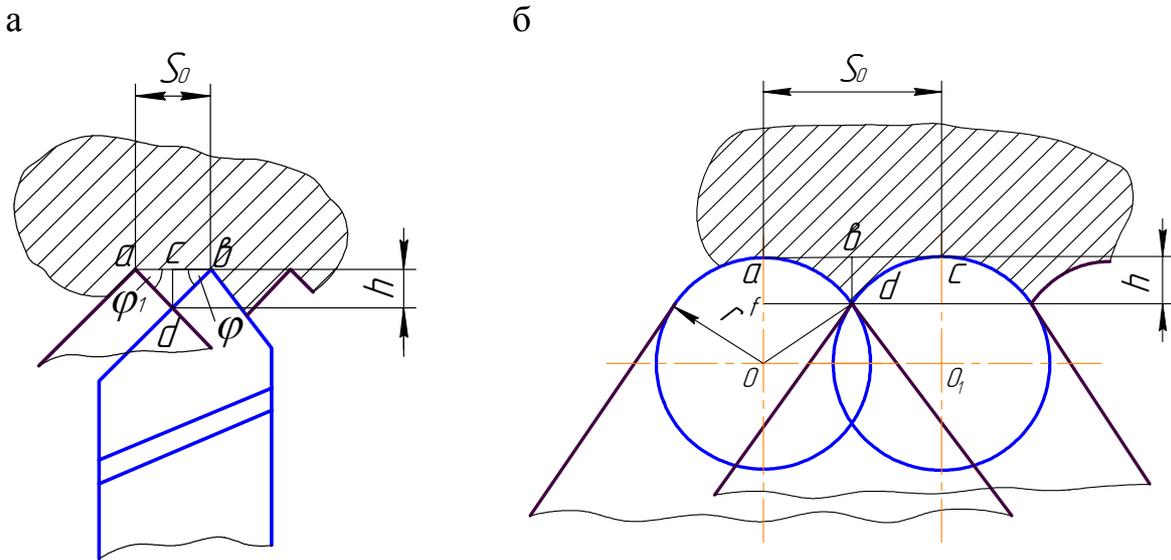


Рис. 3.77. Высота микронеровностей обработанной поверхности при точении:
а – резцом с острозаточенной вершиной; б – резцом с радиусом вершины

Шероховатость поверхности зависит от кинематической схемы обработки (см. раздел 3.8).

Выведенные формулы неточны, т.к. не учитывают процессов, протекающих на передней и задней поверхностях инструмента. Реальное значение R_z с учетом пластического деформирования металла:

$$R_z = R_{z \text{ расч}} + \Delta R_z,$$

где $\Delta R_z = \Delta R_{zn1} + \Delta R_{z \text{ упр}} + \Delta R_{z3}$ – приращение высоты неровностей;

$\Delta R_{z \text{ упр}} \cong 3\%(\Delta R_{zn1} + \Delta R_{z3})$ – приращение от трения по задней поверхности.

Из кинематических параметров обработки наибольшее влияние на высоту неровностей оказывает скорость резания (рис. 3.78, а). С увеличени-

ем скорости резания высота неровностей снижается. В диапазоне скоростей, при котором образуется нарост, характерен рост величины неровностей.

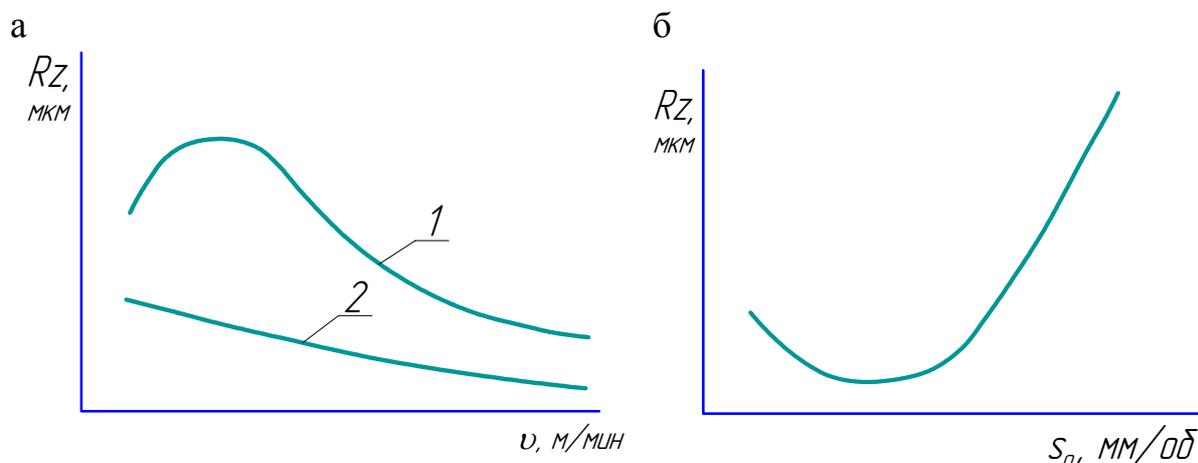


Рис. 3.78. Зависимости шероховатости обработанной поверхности детали от скорости резания (а) и подачи (б): 1 – резание с наростом, 2 – резание без нароста

При увеличении подачи высота неровностей возрастает (рис. 3.78, б). При малых подачах основное влияние оказывают не геометрические факторы, а пластическая и упругая деформации, скорость резания и радиус при вершине резца. При больших значениях подачи на шероховатость оказывают влияние геометрические факторы (следы движения инструмента). Глубина резания почти не влияет на шероховатость обработанной поверхности.

Из геометрических параметров инструмента наибольшее влияние на шероховатость поверхности, как следует из формул (3.66) и (3.67), оказывает угол в плане ϕ и радиус закругления режущих кромок. С увеличением ϕ шероховатость несколько возрастает, а с уменьшением ϕ_1 микронеровности уменьшаются. Передний угол γ влияет на шероховатость постольку, поскольку он влияет на образование нароста. Поэтому изменение γ особенно заметно влияет на шероховатость обработанной поверхности деталей из углеродистых конструкционных сталей в диапазоне скоростей 20...40 м/мин. С уменьшением γ высота нароста возрастает.

Задний угол α влияет на шероховатость значительно меньше, чем γ . Наиболее сильно α влияет в тех случаях, когда обработанная поверхность образуется главной режущей кромкой, например, при протягивании.

На величину шероховатости существенное влияние оказывает структура и твердость обрабатываемого металла (наличие феррита, перлита) через образование нароста, износ инструмента, микронеровности режущей кромки инструмента (копируются), жесткость технологической системы (вибрации), СОЖ (можно уменьшить шероховатость в пределах до одного класса).

3.14.3. Влияние условий обработки на физико-механические свойства поверхностного слоя детали

При обработке заготовок резанием в результате воздействия на поверхностный слой силового и температурного полей в нем возникают пластические деформации и создаются внутренние остаточные напряжения (см. рис. 3.30 и 3.38).

Поверхностная пластическая деформация обуславливает появление *наклепа* (упрочнения) поверхностного слоя. Наклеп обычно характеризуется микротвердостью и рентгенографическими показателями (расширение или размытие интерференционных линий).

Основными причинами возникновения остаточных напряжений являются:

1. Наличие пластической деформации, приводящее к упрочнению и изменению физических свойств металла.
2. Вытягивание кристаллических зерен металла, которые при этом претерпевают упругую и пластическую деформации растяжения в направлении резания.
3. Нагрев и охлаждение детали при резании, приводящие к развитию остаточных напряжений растягивания во внешних слоях и сжатия в нижележащих слоях металла.
4. Структурные превращения в металле.

При различных методах, режимах механической обработки, а также геометрии инструмента степень и глубина распространения наклепа оказываются различными (от 30 до 200 мкм).

С увеличением *подачи и глубины резания* наклеп поверхностного слоя увеличивается (рис. 3.79, а).

То же наблюдается при переходе от положительных значений передних углов лезвия к отрицательным. Это объясняется возрастанием усилий резания.

С увеличением *скорости резания* выделяется больше теплоты и уменьшается продолжительность силового воздействия на металл, это способствует разупрочнению поверхностного слоя и, следовательно, снижению степени наклепа и микротвердости (рис. 3.79, б)

Значительное повышение наклепа наблюдается при затуплении режущего инструмента, а также при встречном фрезеровании по сравнению с попутным.

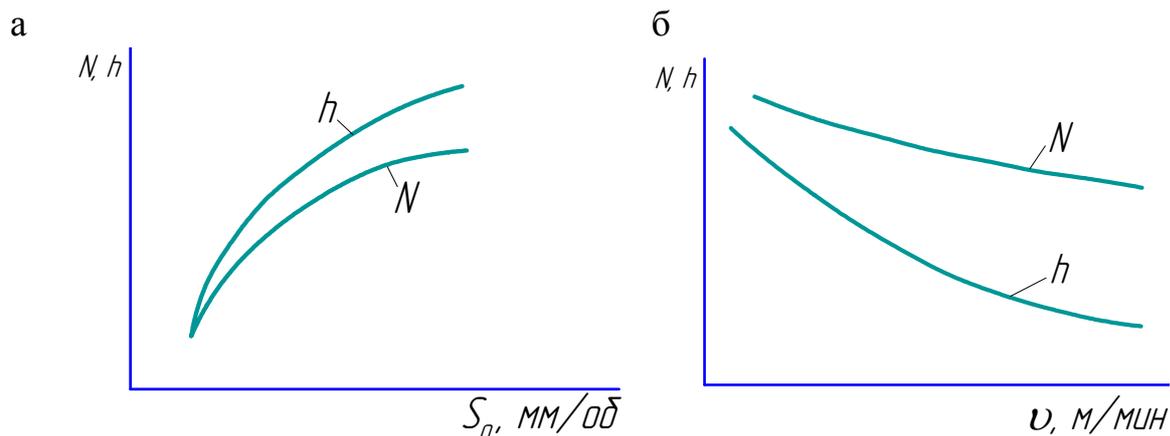


Рис. 3.79. Зависимости степени N и глубины h наклепа от подачи (а) и скорости резания (б)

При абразивной обработке в принципе сохраняются те же самые закономерности возникновения наклепа, что и при работе лезвийным инструментом. Он возрастает с увеличением глубины и скорости шлифования, а также размера и радиуса округления абразивных зерен.

Внутренние остаточные напряжения поверхностного слоя также зависят от вида обработки, режимов резания, свойств металла и других факторов.

Влияние режимов обработки и геометрии инструмента на остаточные напряжения определяются физико-механическими свойствами обрабатываемого металла. Например, при обработке пластичных материалов повышение скорости резания и подачи приводит к увеличению остаточных напряжений растяжения.

С уменьшением переднего угла γ лезвия инструмента остаточные напряжения сжатия возрастают. По мере затупления инструмента возрастают остаточные напряжения растяжения.

3.15. Абразивная обработка

3.15.1. Особенности абразивной обработки

Особенности абразивной обработки рассмотрим на примере шлифования.

Шлифование – это процесс обработки поверхностей детали, осуществляемый зернами абразивного, алмазного или эльборового материала.

Особенности процесса шлифования:

1) многопроходность, способствующая эффективному исправлению погрешностей формы и размеров детали;

2) резание осуществляется большим количеством беспорядочно расположенных абразивных зерен. Эти зерна, образующие прерывистый режущий контур, прорезают мельчайшие углубления, а объем металла, срезаемый в единицу времени, в этом случае значительно меньше, чем при резании лезвийным инструментом. Одним абразивным зерном в единицу времени срезается объем, примерно в 400 000 раз меньший, чем одним зубом фрезы;

3) абразивные зерна расположены в теле круга хаотично, поэтому они могут иметь отрицательные значения передних углов и угол резания больше 90° . Абразивные зерна в процессе резания можно разделить на режущие, давящие или скобящие, если они врезаются на столь малую глубину, что происходит лишь пластическое выдавливание металла без снятия стружки, и не режущие. В реальном процессе шлифования примерно 85 ... 90 % всех зерен не режет, а так или иначе пластически деформирует тончайший поверхностный слой, т.е. наклепывает его.

4) процесс срезания стружки отдельным абразивным зерном осуществляется на высоких скоростях резания (30 ... 70 м/с) и за очень короткий промежуток времени (в течение тысячных и сотых долей секунды);

5) большие скорости резания и неблагоприятная геометрия режущих зерен способствует развитию в зоне резания высоких температур;

6) управлять процессом шлифования можно только за счет изменения режимов резания, т.к. изменение геометрии абразивного зерна практически трудноосуществимо. Как исключение, алмазные круги с помощью специальной технологии изготовления могут иметь преимущественную (требуемую) ориентировку зерен в теле круга, что обеспечивает благоприятные условия резания;

7) абразивный инструмент может в процессе резания самозатачиваться. Это происходит, когда режущие грани зерен затупляются, что вызывает увеличение сил резания, а, следовательно, и сил, действующих на зерно. В результате зерна выпадают или вырываются из связки, раскалываются и в работу вступают новые острые зерна;

8) шлифованная поверхность образуется в результате одновременного действия как геометрических факторов, характерных для процесса резания, так и пластических деформаций, сопровождающих этот процесс.

Геометрические параметры срезаемого слоя

При круглом шлифовании за один оборот заготовки шлифовальным кругом снимается слой металла с сечением $F = t \cdot S_{np}$. Работу круга характеризует среднее мгновенное сечение слоя, снимаемого в данный момент времени. Определим его величину.

Объем слоя металла, снимаемый за один оборот заготовки:

$$Q = \pi dt S_{np}.$$

Путь, пройденный кругом относительно детали за одну минуту, определим, как: $L = \pi D_k \cdot n_k$ (вращением детали пренебрегаем, т.к. $v_d/v_k \approx \frac{1}{100}$). Путь, пройденный периферийными точками круга за один оборот детали: $l = \frac{\pi D_k n_k}{n_d} = \frac{L}{n_d}$. Среднее мгновенное сечение слоя f , снятого

всеми абразивными зернами, будет равно всему снятому объему металла, деленному на путь l , т.е. $f = \frac{Q}{l} = \frac{\pi dt S}{\frac{\pi D_k \cdot n_k}{n_d}} = \frac{\pi d n_d}{\pi D_k \cdot n_k} \cdot t \cdot S = \frac{v_d}{60 v_k} \cdot t \cdot S$.

С увеличением скорости вращения заготовки мгновенное сечение среза растет, а, следовательно, возрастает и нагрузка на каждое зерно, круг изнашивается быстрее, а шероховатость поверхности увеличивается. Для получения меньшей шероховатости поверхности следует работать с возможно большей v_k , меньшей v_d и малыми t и S .

Силы и мощность шлифования

При шлифовании различают суммарную силу резания шлифовальным кругом и силу резания – царапания одним абразивным зерном. Рассмотрим только суммарную силу резания.

$$P = P_z + P_y + P_x;$$

$$P_z = C_{pz} \cdot v_d^{0,7} \cdot S_{np}^{0,7} \cdot t^{0,6};$$

$$P_y = (1 \dots 3)P_z; P_x = (0,1 \dots 0,2)P_z.$$

Превышение составляющей силы P_y над P_z является следствием того, что удельные силы резания при шлифовании очень велики и в десятки раз превышают удельные силы резания при точении, сверлении и фрезеровании.

Мощность, необходимая для вращения круга:

$$N_{kp} = \frac{P_z \cdot v_k}{10^3 \cdot \eta_1}.$$

Мощность, затрачиваемая на изготовления детали:

$$N_d = \frac{P_z \cdot v_d}{60 \cdot 10^3 \cdot \eta_2},$$

где η_1 и η_2 – КПД механизмов вращения круга и детали.

Изнашивание и стойкость шлифовальных кругов

Общий износ рабочей части шлифовального круга состоит из износа в процессе шлифования и слоя удаленного при правке круга. В зависимости от свойств круга и условий шлифования, работа может проходить либо с затуплением абразивных зерен, либо с самозатачиванием.

Процесс изнашивания рабочей поверхности круга можно разделить на два этапа. Первый этап (период приработки после правки) характеризуется откалыванием и выкрашиванием непрочно укрепленных зерен. Второй этап характеризуется округлением (притуплением) и расщеплением абразивных зерен.

Обычно круги работают с затуплением, а не с самозатачиванием. С самозатачиванием работают мелкозернистые круги, предназначенные для обработки твердых материалов. Если круг работает в режиме затупления абразивных зерен, необходимо периодически проводить его правку.

Время работы круга между двумя его смежными правками при заданных режимах называется *периодом стойкости круга*:

$$T = \frac{C_T \cdot d^{0,6}}{v_D^{1,82} \cdot S^{1,82} \cdot t^{1,1}},$$
$$v_D = \frac{C_v \cdot d^y}{T^m \cdot t^x \cdot S^y}.$$

Тепловые явления

В связи с высокой температурой шлифования на поверхности детали могут образовываться прижоги, трещины и другие дефекты, снижающие эксплуатационные свойства деталей. Почти вся механическая мощность шлифования преобразуется в тепловую:

$$Q = Q_D + Q_{кр} + Q_c + Q_{oc} - \text{тепловой баланс шлифования.}$$

Различают мгновенную температуру θ_m , развивающуюся в зоне микрорезания абразивным зерном; контактную θ_k , устанавливающуюся в зоне контакта круга с заготовкой; среднюю θ_{cp} , устанавливающуюся на всей обработанной поверхности. $\theta_k \leq \theta_m$ в связи с интенсивным отводом тепла из зоны шлифования в заготовку. $\theta_{cp} \leq \theta_k$ в связи с распространением теплоты по поверхности детали и ее снижением. Средняя температура влияет, в основном, на точность получаемой детали. При абразивном шлифовании $\theta_{cp} = 20 \dots 350 \text{ }^\circ\text{C}$, $\theta_k = 200 \dots 1100 \text{ }^\circ\text{C}$, θ_m изменяется от $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ до температуры плавления металла.

Существует несколько способов управления тепловым балансом: применение СОЖ, введение в абразивные массы активных наполнителей,

пропитка инструмента спецрастворами. В качестве наполнителей применяют как металлы (алюминий, никель, медь и др.), так и неметаллы (асбест, алебастр, криолит, пирит).

Выбор режима шлифования

При определении режима шлифования выбираются и рассчитываются:

- 1) характеристика шлифовального круга и окружная скорость v_k ;
- 2) поперечная подача (глубина резания t) и число проходов, которые обеспечивают снятие всего припуска;
- 3) продольная подача в долях ширины круга B : $S_{np} = k \cdot B$;
- 4) окружная скорость вращения детали v_d , исходя из $T = 25 \dots 60$ мин, ($v_d = 40 \dots 80$ м/мин);
- 5) СОЖ;
- 6) сила и мощность резания;
- 7) производится корректировка режима по паспорту станка;
- 8) машинное время.

3.15.2. Основные направления совершенствования процесса шлифования

К современным методам абразивной обработки относятся *скоростное, силовое и глубинное шлифование*. К *скоростному шлифованию* относят шлифование деталей со скоростью круга более 35 м/с и при удельном съеме материала до 5 мм³/с. В настоящее время известны исследования, в которых скорость шлифования доведена до 300 м/с.

При скоростном шлифовании каждое абразивное зерно за единицу времени успевает нанести большее количество царапин. В момент царапания снимается меньший объем металла, и уменьшаются силы резания. Поэтому появляется возможность догрузки абразивного зерна круга и увеличения S_d , t , v_d . Быстро вращающийся круг обладает большей режущей способностью и большей стойкостью (на 15 ... 20 %), т.к. зерна круга нагружены более или менее равномерно. Установлено, что при повышении скорости резания с 35 м/с до 80 м/с машинное время шлифования снижается в 2 ... 3 раза.

Силовое шлифование осуществляется на станках с мощностью привода до 100 ... 250 кВт с усилием прижима круга до 10000 Н. Производительность силового шлифования сопоставима с производительностью лезвийной обработки.

При *глубинном шлифовании* весь припуск на обработку снимают за один проход круга. Например, при шлифовании методом врезания произ-

водительность резко возрастает с увеличением минутной поперечной подачи до 6 мм/мин (обычно 1,5...2 мм/мин).

Перспективными являются методы обработки абразивом, находящимся не в связанном состоянии, например, обработка *свободным абразивом*, а также *магнитно-абразивная* и *струйно-абразивная* обработка. При *обработке свободным абразивом* зерна помещают во вращающийся барабан, имеющий отверстие на цилиндрической поверхности. При вращении барабана абразивные зерна под действием центробежных сил попадают на периферию и вылетают из отверстия. Попадая на поверхности детали, абразивные зерна производят ее шлифование или полирование в зависимости от режима вращения барабана и размера зерен. При *струйно-абразивной обработке* абразивные зерна воздействуют на поверхность обрабатываемой детали в среде жидкости, например, воды. Преимущества обработки свободным абразивом состоят, прежде всего, в ее возможности обрабатывать сложные поверхности без жесткой связи с кинематикой процесса резания. Эти преимущества присущи и *магнитно-абразивной обработке*, при которой обрабатываемую деталь и порошок, обладающий ферромагнитными свойствами, помещают между полюсами электромагнита. Детали, порошок или полюсам магнита сообщают относительное движение.

3.16. Особенности обработки материалов со специфическими свойствами

В предыдущих разделах физические характеристики процесса резания иллюстрировались, в основном, на примере обработки углеродистых конструкционных сталей типа стали 45 или стали 40Х. Обработка материалов с другими физико-механическими свойствами, структурой и т.п., оказывающими существенное влияние на процесс резания, имеет некоторые особенности. Эти особенности проявляются, прежде всего, в характеристиках обрабатываемости, деформирования, стружкообразования, динамики, теплофизики, изнашивания и качества обработки. Рассмотрим изменения в характеристиках процесса резания таких материалов, как жаропрочные и нержавеющие стали и сплавы, титановые сплавы, чугуны, алюминиевые сплавы, медные сплавы, порошковые материалы и покрытия, высокопрочные композиционные полимерные материалы и пластмассы, углеграфитовые материалы по сравнению с углеродистой конструкционной сталью 45.

3.16.1. Особенности резания жаропрочных и нержавеющей сталей и сплавов

Способность этих материалов подвергаться резанию характеризуется коэффициентом обрабатываемости K_0 (см. раздел 3.20.2). Согласно этому коэффициенту существующие марки жаропрочных и нержавеющей сталей и сплавов подразделяют по следующим группам:

1) теплостойкие хромистые, хромоникелевые и хромомолибденовые стали перлитного, мартенситно-ферритного и мартенситного класса, (например, 34ХНЗМ, 20ХЗМВФ, 15Х5М). $K_0 = 1 \dots 2$ по отношению к стали 12Х18Н10Т;

2) коррозионностойкие хромистые и сложно легированные стали ферритного, мартенситно-ферритного и мартенситного классов, (например, 12Х13, 20Х13, 20Х17Н2), $K_0 = 0,6 \dots 1,5$;

3) коррозионностойкие, кислотостойкие, жаростойкие хромоникелевые стали аустенитного, аустенитно-ферритного и аустенитно-мартенситного классов (например, 12Х18Н10Т, 12Х21Н5Т, 07Х16Н6), $K_0 = 0,4 \dots 1,0$;

4) жаропрочные, жаростойкие, кислотостойкие хромоникелевые, хромоникелемаргонцовистые сложнолегированные стали аустенитного и аустенитно-ферритного классов (например, 10Х11Н20ТЗМР-0.45, 45Х14Н14В2М-0.8, 12Х25Н16Г7АР-0.6), $K_0 = 0,4 \dots 0,8$;

5) жаропрочные деформируемые сплавы на железоникелевой и никелевой основе (например, 36НХТЮ-0.32, ХН67ВМ7Ю-0.2, ХН60МВТЮ-0.15), $K_0 = 0,15 \dots 0,35$;

6) окалиностойкие и жаропрочные литейные сплавы на никелевой и хромовой основах (например, ЖС6-К-0.1, ВХ4-Л-0.2), $K_0 = 0,1 \dots 0,2$;

7) высокопрочные стали, $K_0 = 0,2 \dots 1,0$;

7.1) легированные (например, 28ХЗСНМВФА-0.41, 33ХЗСНМВФА-0.36, 43ХЗСНМВФА-0.24);

7.2) дисперсионно-твердеющие стали (например, Н18К9М5Т-1).

Особенности резания:

1) низкая обрабатываемость в связи с их упрочняемостью и жаропрочностью ($K_0 = 0,1 \dots 1,0$);

2) пониженная виброустойчивость в связи с высокой упрочняемостью;

3) большие силы резания;

4) высокие температуры резания в связи с высокой теплопроводностью;

5) ускоренный износ и низкая стойкость инструмента в связи с высокой твердостью и прочностью материала и большими значениями на-

пряжений и температуры в зоне резания, коэффициента трения, а также абразивной и адгезионной способностью.

Рекомендуемые режимы резания и геометрия инструмента при обработке стали 12Х18Н10Т инструментом из ВК8 – $v = 2 \dots 2,5$ м/с, Р6М5 – $v = 0,4 \dots 0,6$ м/с; $\gamma = 16 \dots 20^\circ$, $\alpha = 6 \dots 8^\circ$, $f = 0,1 \dots 0,4$ мм; 36 НХТЮ – ВК8 – $v = 0,7 \dots 0,8$ м/с, Р9К5 $v = 0,1 \dots 0,2$ м/с; $\gamma = 5 \dots 10^\circ$, $\alpha = 10 \dots 15^\circ$, $f = 0,1 \dots 0,4$ мм.

3.16.2. Особенности обработки титановых сплавов

Сплавы на титановой основе имеют следующие особенности резания:

- 1) скорость резания в 2,5 ... 5 раз меньше, чем при обработке стали 45;
- 2) малая пластичность и высокий коэффициент упрочнения приводят к образованию элементной стружки и отрицательной усадке;
- 3) интенсивное наростообразование и задиры;
- 4) сила резания P_z на 20 % меньше, чем при обработке конструкционной стали 45 из-за пониженной пластичности;
- 5) возможно воспламенение стружки;
- 6) высокая химическая активность титана приводит к окислению поверхности и росту напряжений и температуры резания;
- 7) высокое абразивное изнашивание инструмента, хрупкое разрушение и сколы;
- 8) низкая виброустойчивость процесса резания;
- 9) вредное воздействие титановой пыли.

3.16.3. Обрабатываемость чугунов

Чугуны подразделяются на: ферритные (Ф + Г); перлитные (П + Г); перлитные ковкие (П + Г); половинчатые (П + Г + У), содержащие перлит, графит и цементит; белые (П + У). Обрабатываемость чугунов ухудшается по мере того, как углерод из свободного состояния (графит), переходит в связанное (цементит), с повышением истирающей способности.

Особенности резания:

- 1) образуется стружка надлома;
- 2) силы меньше, чем при обработке стали 45, т. к. чугуны малопластичны и склонны к упрочнению;
- 3) температура резания ниже, чем при обработке стали, однако скорость резания меньше;
- 4) повышение истирающей способности из-за отбеленного слоя.

3.16.4. Обрабатываемость алюминиевых сплавов

Алюминиевые сплавы с точки зрения обрабатываемости разделяют на три группы:

- 1) низкой твердости, имеющие склонность к налипанию (дюралюминий);
- 2) более высокой твердости, не налипающие на инструмент (термически упрочненный дюралюминий, кованные сплавы АК6, АК8 и др.);
- 3) литые сплавы, содержащие кремний (силумины).

Особенности резания:

- 1) высокие скорость резания и подача, т.к. низкая твердость и выше-теплопроводность;
- 2) при обработке сплавов 1 и 2 групп образуется сливная стружка, 3 группы – элементная и надлома;
- 3) образование налипов и нароста в связи с повышенной адгезией алюминия к инструментальным материалам при более низких скоростях, чем при обработке стали;
- 4) силы резания уменьшаются в 2 ... 4 раза, чем при обработке конструкционных сталей. Чем плотнее структура алюминия, тем выше силы;
- 5) расширение сплава при нагреве температурой резания, что снижает точность обработки;
- 6) одну и ту же шероховатость поверхности и стойкость инструмента при обработке алюминия и стали можно достичь в первом случае при более высоком уровне скорости резания;
- 7) требуется более тщательная заточка и доводка инструмента;
- 8) подача СОЖ в распыленном состоянии.

3.16.5. Особенности обработки медных сплавов

С точки зрения обрабатываемости медные сплавы подразделяют на три группы: 1) сплавы с гомогенной (однородной) структурой (латуни Л60, Л63, бронзы Бр 04 ЦЗ, БрКМ 1-3, БрА 7 и др., медь); 2) с гетерогенной (неоднородной) структурой (ЛМЦ 52-2, ЛЦ 16К4 и др.); 3) сплавы, содержащие свинец (ЛС 63-3, ЛЦ 40С и др.).

Особенности резания:

- 1) при обработке медных сплавов коэффициент обрабатываемости в 2 – 3 раза выше, чем при обработке чугунов и сталей;
- 2) образуется сливная, вязкая и трудноломающаяся стружка при обработке первой группы сплавов и меди. При обработке второй группы сплавов – сливная стружка, но легче ломается. При обработке третьей группы образуется стружка надлома в виде пыли;
- 3) отсутствует нарост;

4) силы резания при точении гомогенных сплавов и меди выше, а для гетерогенных – ниже, чем при обработке сталей;

5) шероховатость поверхности не зависит от v , т.к. нарост, температура, стружкообразование влияет меньше, чем подача и геометрия инструмента.

3.16.6. Особенности обработки порошковых материалов и покрытий

К материалам, полученным методами порошковой металлургии, относятся:

1) конструкционные, изготавливаемые из порошков железа, меди, никеля, хрома, титана и их смесей и соединений с углеродом, кремнием, бором и другими элементами, а также из порошков сталей;

2) материалы для узлов трения, изготавливаемые на основе порошков железа и меди с добавками легирующих элементов и неметаллических веществ, играющих роль твердых смазочных материалов (графит, сульфиды), либо повышенной износостойкости и с низкими значениями коэффициента трения (тугоплавкие карбиды, оксиды, частицы асбеста и др.);

3) материалы электротехнического назначения с большим разнообразием составов;

4) материалы для фильтров на основе порошков железа, бронзы, никеля, алюминия, нержавеющей стали, тугоплавких соединений;

5) композиционные.

Специфика материалов: сложный химический состав; большое количество составляющих микроструктуры; остаточная пористость, снижение теплопроводности по сравнению с монолитными на 20 %; низкая прочность и малое временное сопротивление.

Особенности обработки:

1) сливная стружка, но хрупкая и легко разделяющаяся на элементы;

2) силы резания материалов с пористостью больше 10 % меньше, чем при обработке монолитных сталей, а при малой пористости – больше, так как снижаются растягивающие напряжения;

3) температура резания выше, чем монолитных, так как теплоотвод хуже;

4) характер износа инструмента аналогичен, однако больше вероятность микро- и макроразрушений лезвия из-за соударения с краями пор.

В качестве *покрытий* используют: алюминий, вольфрам, медь и др., никель, хромборкремниевые самофлюсующиеся сплавы типа ПГ-ср, СНГН и др. и их подразделяют на подвергаемые и неподвергаемые оплавлению. Для первой группы характерна структура с минимальной пористостью, для

второй группы – их слоистость и пористость. Напыленный материал по сравнению с исходным обладает большей хрупкостью и твердостью.

Особенности обработки:

- 1) стружка надлома или элементная;
 - 2) сосредоточение нагрузки на режущей кромке и износ у вершины резца;
 - 3) высокая температура резания из-за пониженной теплопроводности покрытия;
 - 4) преобладание абразивного износа;
 - 5) низкое качество обработки из-за пористой структуры.
- Применяется как лезвийная, так и абразивная обработка.

3.16.7. Особенности обработки композиционных полимерных материалов и пластмасс

По обрабатываемости волокнистые композиционные полимерные материалы (ВКПМ) делят на: 1) пластмассы с волокнистым наполнителем; 2) стеклопластики; 3) органопластики; 4) боропластики; 5) углепластики; 6) гибридные материалы. Пластмассы подразделяют:

- 1) на термопластичные без наполнителя и с металлическим наполнителем;
- 2) на термореактивные с газовоздушным, порошкообразным, волокнистым, слоистым наполнителями.

Особенности обработки:

- 1) высокая скорость резания в связи с низкой теплопроводностью, характеризуемая следующим поступлением тепла в инструмент – $Q_u = 90 \%$, в стружку – $Q_c = 5 \%$, в заготовку – $Q_d = 5 \%$;
- 2) необходимо учитывать направление армирования материала (резание вдоль или поперек волокон);
- 3) образуется мелкодисперсная стружка и другой процесс стружкообразования из-за анизотропии материала;
- 4) большие площадки контакта из-за упругости ВКПМ, а значит большие силы резания на задней поверхности. Результирующая сила резания в 10 ... 20 раз выше, чем при обработке металлов;
- 5) уровень температуры ниже, т.к. теплостойкость материала всего 160 ... 300 °С;
- 6) высокая твердость, соизмеримая с твердостью СТМ, что затрудняет выбор инструментального материала;
- 7) преобладание абразивного износа, а также механохимического адсорбционного износа в связи с разрушением структуры полимерного

связующего при резании. Величина износа определяется по технологическим критериям (качеству поверхности);

8) сложность получения высококачественной поверхности, требующая применения острозаточенного инструмента;

9) в ряде случаев не допускается применение СОЖ;

10) высокая виброустойчивость процесса резания.

3.16.8. Особенности обработки углеграфитовых материалов

Углеграфитовые материалы по обрабатываемости подразделяются на «мягкие» типа ГМЗ, ППГ и др. и «твердые» (силицированные) типа СГ.

Особенности обработки:

1) стружка – пылеобразная;

2) сила и температура резания невелики;

3) в основном абразивно-механическое изнашивание инструмента;

4) применяют как лезвийные, так и абразивные инструменты. Для мягких – деревообрабатывающий инструмент, для СГ – в основном алмазные инструменты и электрохимическую обработку.

3.17. Система резания

3.17.1. Обработка резанием как система

Целью обработки материалов резанием является получение на заготовке новых поверхностей с заданными характеристиками их качества. Этот результат достигается путем упругой и пластической деформации срезаемого слоя и обрабатываемой поверхности и сопровождается изнашиванием контактных площадок режущего инструмента. Эти процессы совершаются одновременно, тесно связаны между собой и образуют единую систему, которая называется *системой резания*.

С развитием системно-структурного подхода к изучению различных объектов и явлений появилась необходимость выработать общее понятие системы. Каждая система состоит из некоторого множества элементов, имеющих между собой реальные связи. Элементы системы могут иметь любую природу, в частности являться процессами. Состояние системы в каждый момент времени характеризуется набором значений ряда переменных, а поведение системы – определенной последовательностью ее состояний во времени. Система обладает свойством *относительной устойчивости*, т.е. она сохраняется только в определенных границах изменения ее переменных.

Системе присуще *свойство внутренней целостности*, которое характеризуется ее автономностью, т.е. относительной самостоятельностью поведения и существования. Вследствие своей относительной автономности любая система может рассматриваться как подсистема или элемент более широкой системы. Одновременно явления или объекты, рассматриваемые в рамках данной системы как нерасчлененные целые, при их изолированном изучении могут рассматриваться как системы иного уровня. Материальные системы характеризуются разной степенью активности взаимодействия их частей между собой. В любой системе возможны как взаимозависимость подсистем между собой, так и независимость их друг относительно друга. Изучение систем осуществляется путем целенаправленного изменения внешних воздействий на ее «входе» и изучения реакций на «выходе».

К входным параметрам системы резания относятся: станок (С), приспособление (П), инструмент (И), деталь (Д) или сокращенно СПИД, а также технологическая среда и режим резания, к выходным: точность обработки, качество поверхности, стойкость инструмента, прочность инструмента, производительность, экономичность. Кроме перечисленных, возможны и другие входные и выходные параметры.

Структурную схему системы обработки резанием можно представить в представленном на рис. 3.80 виде, где M – материал, P – размер, Δ – припуск, F_{np} и F_{pv} – функции, связывающие первичные параметры с процессом резания и процесс резания со вторичными параметрами. Рассмотрим механизм функционирования системы резания более подробно.

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

Процесс резания представляет собой сложный комплекс физико-химических явлений. Условия протекания процесса резания определяются кинематической схемой резания, упругими и пластическими деформациями обрабатываемого материала, его разрушением в зоне резания, трением, тепловыми явлениями, химическими, электрическими и магнитными явлениями, а также другими факторами. В соответствии с этим систему резания можно разделить на ряд частных подсистем: механическую, тепловую и т.п. Следует отметить, что все подсистемы являются замкнутыми системами, в которых выход последнего элемента связан с входом в первый. Закономерности функционирования таких систем рассматривает *теория автоматического регулирования*.

В теории автоматического регулирования различают разомкнутые и замкнутые системы. Если изменение выходной величины не вызывает каких-либо изменений входной, система называется *разомкнутой*. Системы, характеризующиеся замкнутым циклом передачи воздействий, называются *замкнутыми*.

Передача воздействия выходного элемента на входной осуществляется с помощью *обратной связи*. Если в системе действует одна такая связь, то система называется *одноконтурной*, а если несколько – *многоконтурной*.

Вид обработки резанием

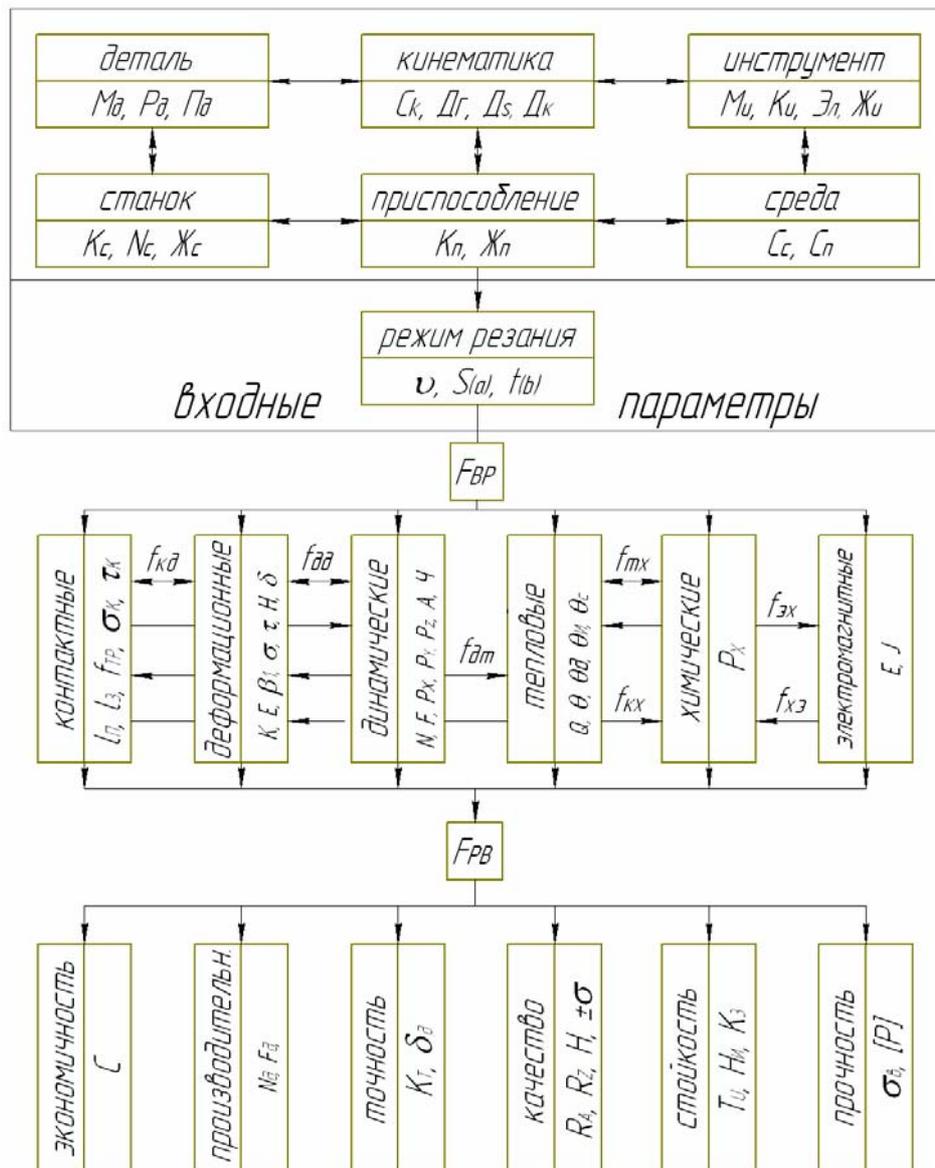


Рис. 3.80. Структурная схема системы резания

Обработка резанием относится к объектам многоконтурного регулирования, поскольку имеет большое число регулируемых величин (рис. 3.81),

изменение каждой из которых вызывает изменение других параметров. Однако для изучения свойств отдельных элементов, прежде всего, процесса резания, систему условно можно считать разомкнутой, так как управляющее воздействие на процесс резания и вторичные параметры наступает только со стороны первичных параметров.

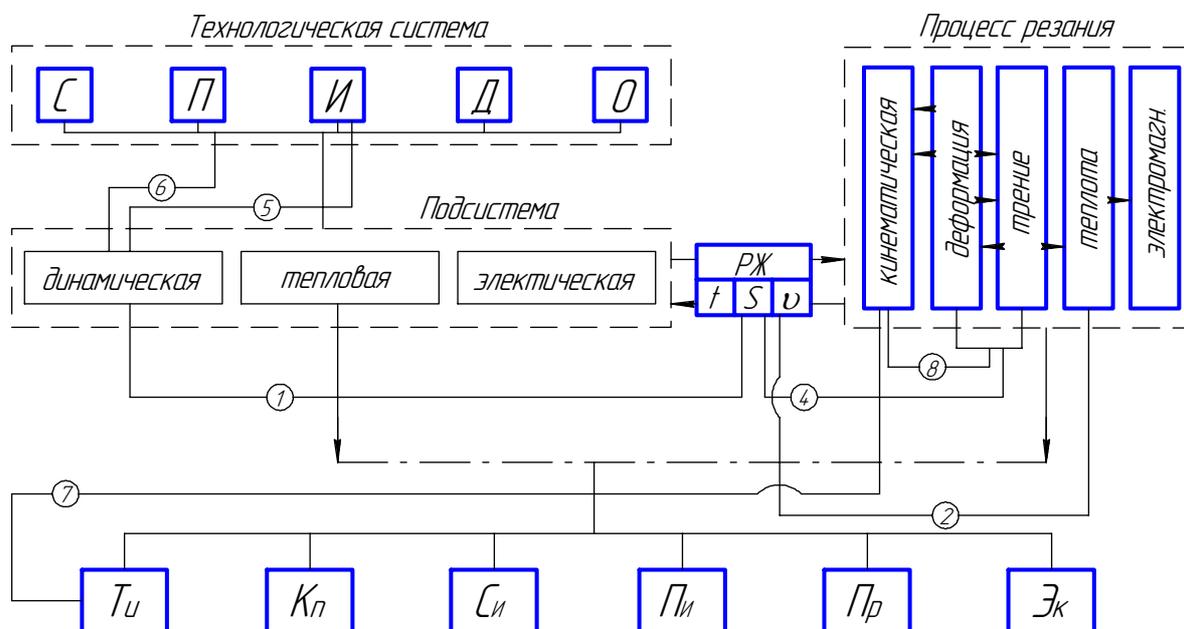


Рис. 3.81. Структурная схема автоматического регулирования системы резания

Объектом регулирования по этой схеме являются все первичные параметры и, в первую очередь, в качестве регулятора используют изменение режимов резания ($P_{ж}$). Регулирование процесса обработки в этом случае заключается в том, чтобы, исходя из знания параметров детали, вида обработки и технологической среды путем изменения режима резания получить необходимые параметры функционирования системы. Взаимодействие регулятора с элементами системы осуществляется путем обратных связей 1 – 7, например, подача S определяет свойства динамической системы (связь 1), которые в свою очередь зависят от конструкции приспособления Π и инструмента $И$ (связь 6 и 5). Скорость резания v определяет главным образом тепловые явления (связь 2), а кинематика процесса резания влияет на пластические деформации и трение (связь 3) и точность обработки T_u (связь 7). В качестве регулятора при этом чаще всего используется подача S (связь 4). В конечном итоге регулирование свойств подсистем и процесса резания определяет выходные параметры – точность T_u , качество поверхности K_n , стойкость C_u и прочность P_u инструмента, производительность P_p и экономичность E_k обработки.

3.17.2. Взаимосвязь явлений при обработке резанием

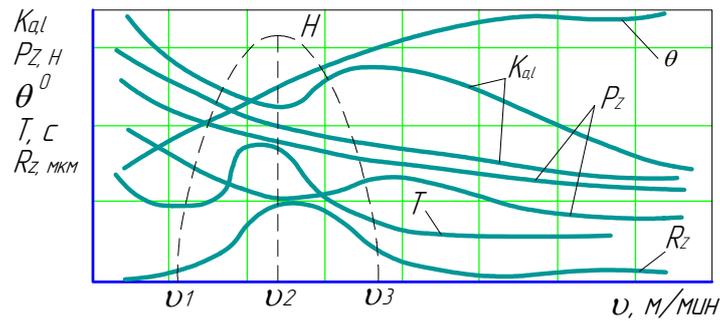
Взаимосвязь физических явлений в процессе резания можно наглядно проследить при сопоставлении выходных характеристик системы резания. Из многообразия выходных характеристик выберем отдельные, которые дают представление об основных элементах системы резания и по которым в литературе имеется достаточное количество данных. Это, прежде всего, коэффициенты утолщения или укорочения стружки $K_{a,l}$, составляющая силы резания P_z и температура резания θ , характеризующие деформационные и тепловые процессы в зоне резания, стойкость инструмента T , свидетельствующая о состоянии инструмента, шероховатость поверхности детали $R_{z,a}$, характеризующая качество обработки. Из параметров, оказывающих наиболее сильное влияние на выходные характеристики, выбираем элементы режима резания – v , S и t , геометрические параметры инструмента – γ , α , φ , φ_1 , λ , r_s , а также физико-механические свойства инструментального и обрабатываемого материалов заготовки и применение СОЖ.

Влияние скорости резания v (рис. 3.82, а) на коэффициент утолщения или укорочения стружки $K_{a,l}$.

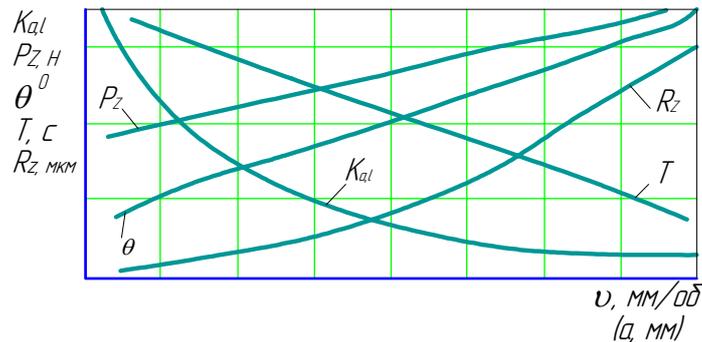
При резании материалов, не склонных к наростообразованию, при увеличении скорости резания $K_{a,l}$ вначале быстро, а затем более медленно уменьшается. Такое влияние v на K_a объясняется уменьшением коэффициента трения между стружкой и передней поверхностью при росте температуры резания вследствие возрастания v .

При резании материалов, склонных к наростообразованию, v влияет на $K_{a,l}$ не монотонно. Вначале при росте скорости резания до v_2 $K_{a,l}$ уменьшается, а затем вновь растет и при достижении некоторого значения v_3 рост $K_{a,l}$ прекращается и при скоростях резания больших v_3 значения $K_{a,l}$ вновь уменьшаются. Уменьшение коэффициента $K_{a,l}$ при увеличении скорости резания от v_1 до v_2 и его дальнейшее увеличение при возрастании от v_2 до v_3 связано с действием на процесс стружкообразования нароста. Возрастание скорости резания от v_1 до v_2 сопровождается ростом высоты нароста H и увеличением переднего угла инструмента, вследствие чего степень деформации срезаемого слоя уменьшается. При возрастании скорости резания от v_2 до v_3 высота нароста уменьшается так же, как и величина фактического переднего угла, стремящегося к величине переднего угла заточки. Это вызывает увеличение коэффициента утолщения стружки. При скоростях резания больших v_3 нарост отсутствует, и скорость резания влияет на коэффициент $K_{a,l}$ только через изменение коэффициента трения.

а



б



в

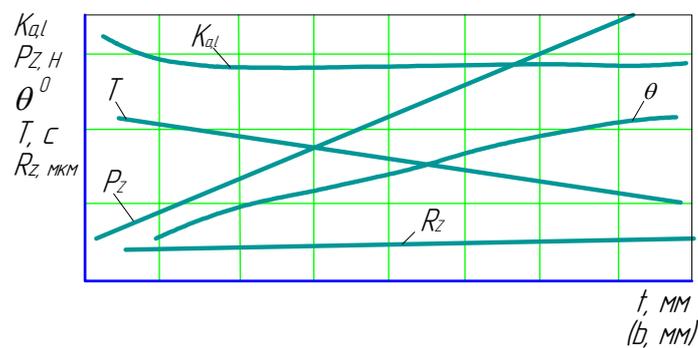


Рис. 3.82. Влияние на коэффициент утолщения или укорочения стружки $K_{a,l}$, составляющую силы резания P_z , температуру резания θ , стойкость инструмента T и шероховатость обработанной поверхности $R_{z,a}$ скорости резания v (а), подачи S (толщины стружки a) (б), глубины резания t (ширины среза b) (в)

Влияние скорости резания v (рис. 3.82, а) на составляющую силы резания P_z .

Изменение скорости резания влияет на составляющие силы резания так, как она влияет на изменение коэффициента утолщения или укорочения стружки. При резании материалов, не склонных к наростообразованию, при увеличении скорости резания P_z вначале быстро, затем более медленно уменьшается за счет изменения коэффициента трения. При реза-

нии материалов, склонных к наростообразованию, зависимость P_z от v не-монотонна вследствие влияния нароста, приводящего к изменению действительного переднего угла. При скоростях, больших v_3 составляющая P_z уменьшается вследствие уменьшения коэффициента трения и увеличения температуры резания.

Влияние скорости резания v (рис. 3.82, а) на температуру резания θ .

С увеличением скорости резания возрастает количество тепла, выделяющегося в зоне резания ($Q = P_z \cdot v$), а также температура нагрева детали, стружки и инструмента. Однако рост температуры отстает от роста скорости резания, т.к. уменьшается P_z и растет отвод тепла стружкой.

Влияние скорости резания v (рис. 3.82, а) на стойкость инструмента T .

Связь между скоростью резания и периодом стойкости выражается при обработке чугуна убывающей кривой, напоминающей гиперболу. При обработке сталей зависимость T от v изображается более сложной кривой, имеющей несколько перегибов (max T при $v = 10 \dots 40$ м/мин). Физические причины уменьшения, а затем увеличения T полностью не выяснены. Имеется предположение, что это связано с изменением относительного износа инструмента. При скоростях, на которых относительный износ не изменяется, происходит уменьшение T . При скоростях, соответствующих уменьшению относительного износа, T возрастает. Резкое увеличение относительного износа при больших v вызывает резкое падение T .

Влияние скорости резания v (рис. 3.82, а) на шероховатость обработанной поверхности $R_{z,a}$.

При обработке материала, не склонного к наростообразованию, при увеличении v высота неровностей непрерывно уменьшается. Это связано с уменьшением объема пластической деформации и среднего коэффициента трения. Влияние v в этом случае не особенно сильное. При обработке материала, склонного к наростообразованию, зависимость $R_{z,a}$ от v имеет горбообразный характер. Максимальная высота неровностей соответствует максимальной высоте нароста.

При увеличении v абсолютная величина остаточных напряжений σ возрастает, но глубина их залегания Δ уменьшается; v влияет на наклеп также, как и на $K_{a,1}$.

Влияние подачи S (рис. 3.82, б) на коэффициент утолщения или укорочения стружки $K_{a,l}$.

Чем больше толщина a (S) срезаемого слоя металла, тем меньше коэффициент $K_{a,l}$, что связано с изменением угла β_1 . Известно, что чем больше угол β_1 , тем меньше коэффициент утолщения или укорочения стружки.

Влияние подачи S (рис. 3.82, б) на составляющую силы резания P_z .

С увеличением a (S) нагрузка на единицу длины режущего лезвия возрастает, возрастает температура, что приводит к уменьшению сил трения, усадки стружки и снижению сопротивления обрабатываемого материала пластическому деформированию. Подача влияет на P_z меньше, чем глубина резания, т.к. увеличение толщины среза уменьшает степень деформации ($K_{a,l}$) и рост силы отстает от роста толщины срезаемого слоя.

Влияние подачи S (рис. 3.82, б) на температуру резания θ .

С увеличением a (S) увеличивается P_z примерно в степени 0,75, а следовательно, возрастает работа резания и количество выделяемого тепла. Одновременно растет площадь контакта стружки с передней поверхностью резца. Это улучшает условия отвода тепла, поэтому увеличение температуры отстает от роста толщины среза.

Влияние подачи S (рис. 3.82, б) на стойкость инструмента T .

С увеличением S (a) стойкость инструмента снижается, т.к. увеличивается силовая и тепловая нагрузки на лезвие инструмента. Причем увеличение a больше, чем b влияет на снижение стойкости инструмента.

Влияние подачи S (рис. 3.82, б) на шероховатость обработанной поверхности $R_{z,a}$.

С увеличением S высота неровностей возрастает, и интенсивность влияния подачи на R_z зависит от величины подачи. Например, если подача при точении меньше 0,5 мм/об, то ее влияние на высоту неровностей заметно ослабевает ($R_{z,a} = S \frac{\sin \varphi \cdot \sin \varphi_1}{\sin(\varphi + \varphi_1)}$).

Влияние глубины резания t (рис. 3.82, в) на коэффициент утолщения или укорочения стружки $K_{a,l}$.

Влияние глубины резания на $K_{a,l}$ незначительно, т.к. уширение стружки при резании составляет 5 ... 15 % от ширины срезаемого слоя. При малой глубине резания t в силу соизмеримости ширины срезаемого слоя b с радиусом округления режущей кромки влияние t на $K_{a,l}$ более заметно.

Влияние глубины резания t (рис. 3.82, в) на составляющую силы резания P_z .

С увеличением t (b) сила P_z пропорционально возрастает, т.к. возрастает нагрузка на режущее лезвие, причем влияние b на P_z больше, чем a .

Влияние глубины резания t (рис. 3.82, в) на температуру резания θ .

С увеличением t (b) прямопропорционально растет сила, работа резания и количество выделяющейся теплоты. Во столько же раз увеличивается и длина активной части режущего лезвия, а соответственно отвод тепла. Поэтому с увеличением b температура резания изменяется незначительно ($x_\theta \approx 0,1$).

Влияние глубины резания t (рис. 3.82, в) на стойкость инструмента T .

При увеличении t (b) наряду с возрастанием количества выделяемой теплоты активная часть режущего лезвия становится длинней и усиливается отвод теплоты. В последнем случае тепловая нагрузка на единицу длины режущего лезвия будет меньше, и следовательно, ниже температура резания. Поэтому увеличение ширины среза в меньшей степени сказывается на повышении интенсивности изнашивания инструмента и его стойкости, чем увеличение толщины среза.

Влияние глубины резания t (рис. 3.82, в) на шероховатость обработанной поверхности $R_{z,a}$.

Глубина резания t на высоту неровностей $R_{z,a}$ значительного влияния не оказывает.

Влияние переднего угла γ (рис. 3.83, а) на коэффициент утолщения или укорочения стружки $K_{a,l}$.

При увеличении переднего угла γ коэффициент усадки $K_{a,l}$ уменьшается, т.к. уменьшается трение стружки о переднюю поверхность инструмента, что в свою очередь приводит к увеличению угла скалывания β_1 . Известно, что чем больше угол β_1 , тем меньше коэффициент утолщения или укорочения стружки.

Влияние переднего угла γ (рис. 3.83, а) на составляющую силы резания P_z .

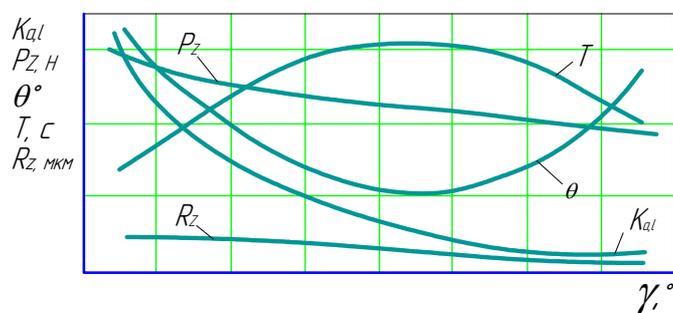
При увеличении γ облегчается врезание лезвия в заготовку, улучшается сход стружки, уменьшается деформация обрабатываемого металла и

снижается коэффициент утолщения или укорочение стружки, а следовательно, уменьшается составляющая силы резания P_z .

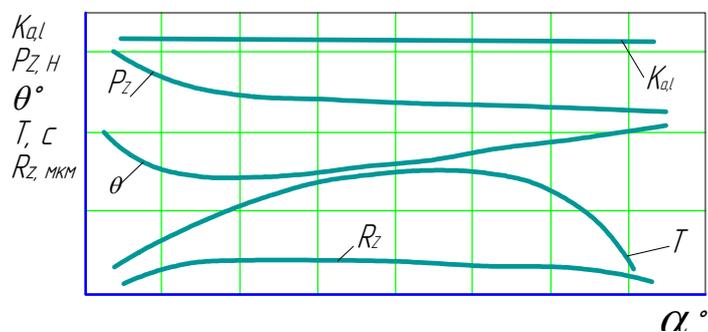
Влияние переднего угла γ (рис. 3.83, а) на температуру резания θ .

С увеличением γ уменьшается сила, а следовательно, работа резания, а также количество выделяющегося тепла. Однако при этом ухудшаются условия отвода тепла, т. к. уменьшается величина угла заострения β , т. е. массивность лезвия резца. Поэтому существует некоторое оптимальное значение угла β , при котором уменьшаются силы резания и количество выделившегося тепла. С увеличением γ выше оптимального значения уменьшается массивность лезвия, ухудшаются условия отвода тепла, растет температура резания.

а



б



в

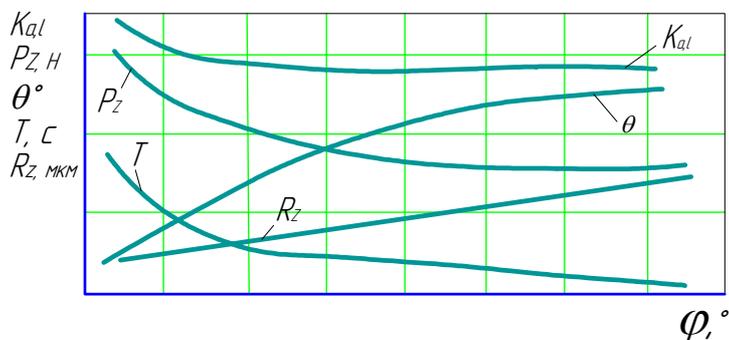


Рис. 3.83. Влияние на те же характеристики по рис. 3.82 переднего угла γ (а), заднего угла α (б), главного угла в плане φ (в)

Влияние переднего угла γ (рис. 3.83, а) на стойкость инструмента T .

Чем больше передний угол γ , тем легче протекает процесс резания, т.е. тем меньше силы и температура резания, деформация срезаемого слоя, а, следовательно, выше стойкость режущего инструмента. Однако следует учитывать, что с увеличением γ уменьшается угол заострения β , ухудшается отвод тепла, снижается прочность лезвия и, в конечном итоге, стойкость инструмента.

С увеличением предела прочности и твердости обрабатываемого материала и уменьшением прочности инструментального материала значения оптимального переднего угла уменьшаются.

Влияние переднего угла γ (рис. 3.83, а) на шероховатость обработанной поверхности $R_{z,a}$.

Угол γ на высоту неровностей значительного влияния не оказывает.

Влияние заднего угла α (рис. 3.83, б) на коэффициент утолщения или укорочения стружки $K_{a,l}$.

Задний угол на $K_{a,l}$ почти не влияет.

Влияние заднего угла α (рис. 3.83, б) на составляющую силы резания P_z .

С увеличением α уменьшается контакт задней поверхности инструмента с поверхностью заготовки, что приводит к уменьшению сил трения и резания. Интенсивность влияния α на P_z невелика, например, с увеличением α от 2 до 10° P_z уменьшается всего на 6 %, при дальнейшем увеличении α сила резания остается почти неизменной.

Влияние заднего угла α (рис. 3.83, б) на температуру резания θ .

При малых углах α ($\alpha < 5^\circ$) трение задней поверхности о заготовку и давление с ее стороны велико, что приводит к росту выделения тепла и повышению температуры резания. При увеличении α теплоотвод улучшается, но при определенных значениях α в силу уменьшения β теплоотвод в тело инструмента ухудшается, и температура резания повышается. Влияние α по сравнению с γ незначительно.

Влияние заднего угла α (рис. 3.83, б) на стойкость инструмента T .

С увеличением заднего угла до определенных пределов (в зависимости от обрабатываемого материала) условия резания улучшаются, и T растет. Однако увеличение α приводит к уменьшению угла заострения β , в результате чего ухудшаются условия теплоотвода и стойкость падает.

Влияние заднего угла α (рис. 3.83, б) на шероховатость обработанной поверхности $R_{z,a}$.

Задний угол не оказывает значительного влияния на $R_{z,a}$. При малых α возможно снижение $R_{z,a}$ за счет пластического деформирования неровностей, а при больших – некоторое снижение $R_{z,a}$ за счет роста температуры резания и уменьшения составляющей силы резания P_z .

Влияние угла в плане φ (рис. 3.83, в) на коэффициент утолщения или укорочения стружки $K_{a,l}$.

С увеличением угла φ несколько улучшаются условия резания, снижаются нагрузки, увеличивается температура резания, что приводит к некоторому снижению коэффициента $K_{a,l}$.

Влияние угла в плане φ (рис. 3.83, в) на составляющую силы резания P_z .

С увеличением угла в плане уменьшается нагрузка на инструмент, т.к. при постоянной площади среза с увеличением угла в плане φ увеличивается толщина среза a и соответственно уменьшается удельная сила резания. Сила резания растет заметно при $\varphi < 30^\circ$.

Влияние угла в плане φ (рис. 3.83, в) на температуру резания θ .

С увеличением угла в плане уменьшается угол при вершине инструмента, что приводит к уменьшению массы лезвия и ухудшению теплоотвода. Вследствие этого возрастает температура резания.

Влияние угла в плане φ (рис. 3.83, в) на стойкость инструмента T .

С увеличением угла φ уменьшается ширина среза b и величина угла ε и ухудшается теплоотвод в тело инструмента, что снижает его стойкость.

Влияние угла в плане φ (рис. 3.83, в) на шероховатость обработанной поверхности $R_{z,a}$.

С увеличением φ высота неровностей возрастает, т.к. главная режущая кромка участвует в формировании гребешков неровностей (см. формулы (3.65) и (3.66)).

Влияние вспомогательного угла в плане φ_1 (рис. 3.84, а) на коэффициент утолщения или укорочения стружки $K_{a,l}$.

С увеличением вспомогательного угла в плане φ_1 , уменьшаются нагрузки на инструмент, температура резания возрастает, что облегчает процесс деформирования и несколько снижает $K_{a,l}$.

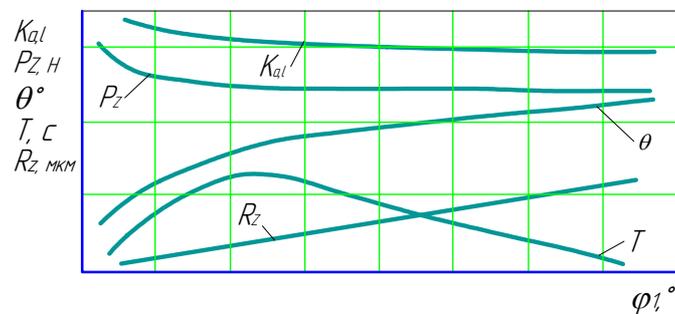
Влияние вспомогательного угла в плане φ_1 (рис. 3.84, а) на составляющую силы резания P_z .

С увеличением φ_1 , уменьшается фактическая площадь среза и тем самым уменьшается нагрузка на инструмент. Малые углы φ_1 в большей степени влияют на P_z .

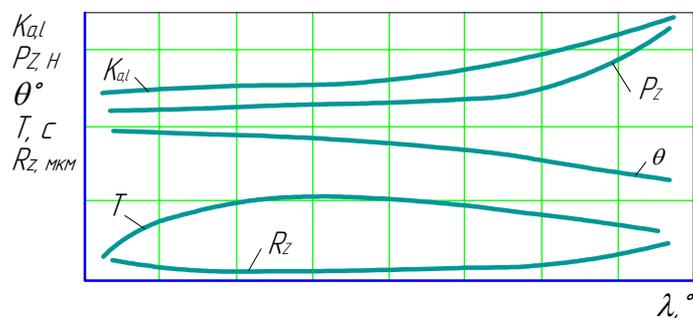
Влияние вспомогательного угла в плане φ_1 (рис. 3.84, а) на температуру резания θ .

С увеличением φ_1 уменьшается ϵ , что приводит к уменьшению массы лезвия и ухудшению теплоотвода. Вследствие этого возрастает температура резания.

а



б



в

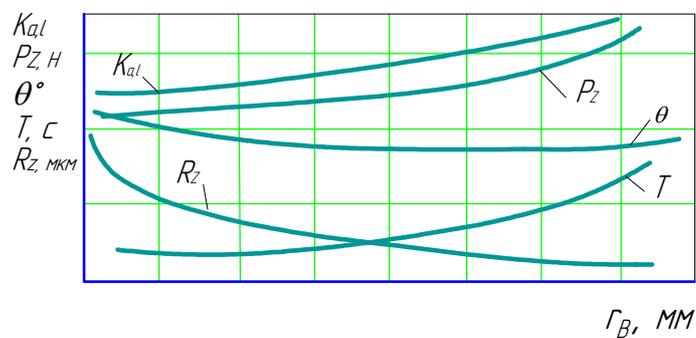


Рис. 3.84. Влияние на те же характеристики по рис. 3.82 вспомогательного угла в плане φ_1 (а), угла наклона режущей кромки λ (б), радиуса округления режущей кромки r_s (в)

Влияние вспомогательного угла в плане φ_1 (рис. 3.84, а) на стойкость инструмента T .

С увеличением φ_1 уменьшается трение вспомогательной поверхности о заготовку, что увеличивает T , однако при дальнейшем увеличении φ_1 уменьшается угол при вершине ε и ухудшается теплоотвод и прочность вершины, что снижает стойкость инструмента.

Влияние вспомогательного угла в плане φ_1 (рис. 3.84, а) на шероховатость обработанной поверхности $R_{z,a}$.

Угол φ_1 очень сильно влияет на шероховатость обработанной поверхности, т.к. вспомогательная режущая кромка формирует обработанную поверхность (см. формулы (3.65) и (3.66)).

Влияние угла наклона режущей кромки λ (рис. 3.84, б) на коэффициент утолщения или укорочения стружки $K_{a,l}$.

Угол λ влияет на угол схода стружки. Он изменяет положение передней поверхности, увеличивает рабочую длину главного лезвия и в зависимости от знака угла λ увеличивает или уменьшает коэффициент $K_{a,l}$. С увеличением λ от -45° до $+45^\circ$ $K_{a,l}$ возрастает. При $\lambda > 45^\circ$ $K_{a,l}$ уменьшается.

Влияние угла наклона режущей кромки λ (рис. 3.84, б) составляющую силы резания P_z .

На главную составляющую силы резания изменение угла λ влияет сравнительно мало: увеличение $-\lambda$ практически не изменяет P_z ; при увеличении $+\lambda$ сила P_z несколько возрастает, если $\lambda > 30^\circ$.

Влияние угла наклона режущей кромки λ (рис. 3.84, б) температуру резания θ .

Увеличение угла λ увеличивает массу лезвия резца возле его вершины и улучшает теплоотвод, что снижает температуру резания.

Влияние угла наклона режущей кромки λ (рис. 3.84, б) стойкость инструмента T .

С увеличением λ и переходе от отрицательных значений к положительным стойкость возрастает и достигает макс при некотором оптимальном значении. Для одинаковой величины T период стойкости резца при положительном знаке больше, чем при отрицательном. Объясняется это удалением первоначальной точки контакта от вершины инструмента и уменьшением ее величины.

Влияние угла наклона режущей кромки λ (рис. 3.84, б) шероховатость обработанной поверхности $R_{z,a}$.

При увеличении положительного значения λ стружка будет сходиться в сторону обработанной поверхности детали и царапать ее, ухудшаются условия деформирования срезаемого слоя, что повышает несколько высоту неровностей.

Влияние радиуса вершины режущего инструмента $r_в$ (рис. 3.84, в) на коэффициент утолщения или укорочения стружки $K_{a,l}$.

Увеличение $r_в$ ухудшает условия деформирования металла и увеличивает $K_{a,l}$.

Влияние радиуса вершины режущего инструмента $r_в$ (рис. 3.84, в) на составляющую силы резания P_z .

Радиус округления режущей кромки $r_в$ при достаточно больших размерах его способствует повышению P_z (до 15 %), т.к. ухудшаются условия резания, увеличивается деформация.

Влияние радиуса вершины режущего инструмента $r_в$ (рис. 3.84, в) на температуру резания θ .

Увеличение радиуса округления режущей кромки увеличивает площадь контакта инструмента с заготовкой, улучшает теплоотвод и несколько снижает температуру резания. При больших $r_в$ резко увеличивается P_z и растет температура.

Влияние радиуса вершины режущего инструмента $r_в$ (рис. 3.84, в) на стойкость инструмента T .

С увеличением $r_в$ происходит упрочнение режущей кромки, улучшается теплоотвод и возрастает стойкость инструмента.

Влияние радиуса вершины режущего инструмента $r_в$ (рис. 3.84, в) на шероховатость обработанной поверхности $R_{z,a}$.

С увеличением $r_в$ высота неровностей уменьшается, т.к. происходит их скругление.

Приведенные зависимости отражают качественное изменение характеристик процесса резания при обработке углеродистых конструкционных сталей. Изменение свойств обрабатываемого материала приводит к особенностям резания, отмеченных в разделе 3.16, влияние СОЖ на характеристики процесса резания приведено в разделе 3.18, а в разделе 3.4 отмечено влияние состава и свойств инструментальных материалов на тепло- и износостойкость покрытия, наносимого на поверхности режущего инструмента. Покрытие способствует снижению трения в зоне резания, торможению диффузионных процессов на участке пластического контакта, уменьшению коэффициента усадки стружки, снижению сил резания. При этом обеспечивается благоприятное распределение тепловых потоков, направленных в основном в стружку и деталь, что способствует повышению износостойкости инструмента. Значительно повышается качество обработанной поверхности, как в результате снижения шероховатости, так и снижения глубины упрочненного слоя.

3.18. Резание с применением смазочно-охлаждающих средств

3.18.1. Разновидности смазочно-охлаждающих средств

Интенсификация процессов металлообработки потребовала применения специальных средств для отвода из зоны резания теплоты, стружки и мелких частиц, образующихся при резании, а также снижения сил трения. К смазочно-охлаждающим средствам (СОС) относятся смазочно-охлаждающие вещества (жидкие и твердые), газовые средства и устройства для их подготовки и транспортирования к зоне резания и обратно. Эти средства должны охлаждать зону резания, обладать смазывающей и моющей способностью, препятствовать диффузионному и адгезионному изнашиванию инструмента, а также обладать диспергирующим действием. Вместе с тем, они не должны оказывать вредного влияния на окружающую среду.

Охлаждающее действие средств основано на эффекте теплообмена, а также испарения среды, происходящего при поглощении тепловой энергии. *Смазывающее воздействие* средств сводится к образованию на трущихся поверхностях смазочной пленки, снижающей силу резания и температуру в зоне резания. *Диспергирование* твердых тел основано на эффекте физико-химической механики (эффект П.А. Ребиндера). Если в зону обработки вводится активная среда, то достигается охрупчивание твердого тела и обеспечение процесса его разрушения. Как правило, используются расплавы металла, сходные с химическим составом и строением разрушаемого тела с целью отвлечения атомов при их перестройке в процессе резания. При этом есть опасность воздействия и на инструмент.

В зависимости от вида обработки, характера износа инструмента, свойств инструментального и обрабатываемого материалов, способа подвода вещества в зону резания, влияние смазочно-охлаждающих средств меняется, что необходимо учитывать при их работе. Так, при черновой обработке преобладающее значение имеет теплоотвод из зоны резания, следовательно, среда должна обладать наибольшими охлаждающими свойствами. При чистовых операциях преобладающее значение имеют смазывающие свойства средств, обеспечивающие повышение качества поверхности и незначительно – стойкости инструмента. При обработке труднообрабатываемых материалов преобладающими являются процессы адгезионного и диффузионного изнашивания, поэтому средства должны обеспечить, в первую очередь, снижение этих вредных явлений за счет создания на поверхностях лезвия инструмента оксидных или иных пленок.

Современные средства разделяются на *газообразные, твердые и жидкие*. Они могут при своем использовании вступать в контакт с зоной резания или не находиться в непосредственном с ней контакте.

Газовые средства применяются в виде чистых газов, смесей газов или смеси газа с небольшим количеством смазочно-охлаждающих жидкостей (газово-жидкостная среда), или с частицами твердых СОС. В качестве охлаждающих газовых средств используются воздух, кислород, углекислота, азот. Наибольшее распространение получили газовые среды в виде атмосферного воздуха или воздушно-эмульсионной смеси.

Твердые СОС применяются в виде твердых пленок, наносимых на поверхность инструмента, теплопроводящих вставок, прилегающих к нагревающимся поверхностям и отводящих теплоту, мелких частиц, добавляемых к жидким или газовым средам (частицы графита, дисульфида молибдена и др.). К твердым смазкам относятся:

- 1) слоистые твердые смазочные материалы – дисульфид молибдена, нитрид бора, графит, слюда, тальк и др.;
- 2) органические соединения – мыла, воски, твердые жиры;
- 3) мягкие металлы – индий, свинец, олово, цинк, медь, барий;
- 4) полимерные пленки.

Наибольшее распространение получили смазочно-охлаждающие жидкости.

3.18.2. Смазочно-охлаждающие жидкости и способы их подачи в зону резания

Смазочно-охлаждающие жидкости (СОЖ) подразделяют на три группы:

- 1) минеральные масла различной вязкости с добавлением присадок – антифрикционных, противозадирных, смазывающих, антипенных, антикоррозийных, бактерицидных;
- 2) масляные эмульсии. Эмульсиями называют дисперсные системы из двух жидкостей, нерастворимых или малорастворимых друг в друге, получаемые растворением эмульсола в воде. Эмульсолы включают в себя базовое масло, эмульгатор или стабилизатор (обычно это соли жирных кислот, например, мыло), антифрикционные и другие присадки, перечисленные выше;
- 3) синтетические или химические жидкости на водной основе, не содержащие масла. К ним относятся растворы электролитов, многокомпонентные коллоидные растворы органических и неорганических веществ, к которым добавляются вещества, пассивирующие поверхности обрабатываемого изделия, а также различные присадки.

Синтетические СОЖ обладают перед СОЖ 1-й и 2-й групп более высокими охлаждающими свойствами, устойчивостью против разложения и намного эффективнее при обработке труднообрабатываемых материалов.

Эмульсии изготавливают из эмульсолов различных составов. Наиболее распространенными марками эмульсолов являются следующие: Э2 – в состав входят масляный асидол (низкомолекулярная нафтенная кислота), являющийся высокоэффективным поверхностно-активным веществом и одновременно эмульгатором, каустическую соду и этиловый спирт; ЭТ-2 – входит смесь масляного асидола и таллового масла; НГЛ-205 – сульфонат натрия, пассивирующие добавки и водорастворимые ингибиторы коррозии; СДМУ – дисульфид молибдена. Основой этих эмульсолов (около 75 %) является минеральное масло средней вязкости («индустриальное 12» или «индустриальное 20»).

Большое распространение получили минеральные масла, активированные серой – сульфифрезолы. Сульфифрезол состоит из осерненного нигрола или масляного гудрона – основы, полученной варкой с 10 – 12 % серы, смешанной с индустриальным маслом. Содержание серы в сульфифрезоле не должно быть меньше 1,7 %. Благодаря присутствию серы сульфифрезол хорошо сохраняет смазочные свойства при высоких контактных давлениях и температурах.

Подачу СОЖ в зону резания осуществляют: 1) поливом свободно падающей струей; 2) напорной струей; 3) струей воздушно-жидкостной смеси (в распыленном состоянии); 4) через каналы в теле режущего инструмента. При свободном поливе (рис. 3.85, а) СОЖ омывает как стружку, так и инструмент. Этому способу присущи недостатки: 1) большой расход жидкости; 2) сильное разбрызгивание жидкости при высоких скоростях вращения заготовки и инструмента; 3) невозможность наблюдения за зоной обработки; 4) вследствие постоянной циркуляции в замкнутой системе жидкость постепенно нагревается и частично теряет свои охлаждающие свойства.

Подача СОЖ струей под напором (рис. 3.85, а) осуществляется при давлении $p = 0,5 - 15 \text{ кг/см}^2$, диаметре жиклера – 0,8 ... 5 мм, скорости $v = 40 \dots 60 \text{ м/с}$. Иногда подачу СОЖ высоконапорной струей комбинируют с поливом СОЖ. При этом стойкость инструмента повышается на 20 – 25 %. Недостатки подачи СОЖ под напором: 1) необходимость тщательной очистки жидкости; 2) необходимость оснащения станка специальной насосной станцией; 3) сильное разбрызгивание жидкости.

Распыленная жидкость оказывает повышенное смазочное и охлаждающее действие. Ее следует применять в тех случаях, когда полив жидко-

стью невозможен или когда он малоэффективен, а также, когда необходимо постоянное наблюдение за зоной обработки.

Способ подачи СОЖ через каналы в теле инструмента получил широкое распространение при обработке осевым инструментом (см. рис. 3.85, б). В этом случае обеспечивается не только транспортирование СОЖ, но и удаление из зоны резания стружки. Этот способ применяется и в других режущих инструментах, например, в резцах, когда через его тело циркулирует СОЖ, выполняющая только одну функцию – охлаждение контактных площадок резца.

Идея внутреннего охлаждения инструментов получила в последнее время развитие в конструкциях «двухфазных систем» внутреннего охлаждения инструмента, в которых используется эффект охлаждения от поглощения теплоты при переходе различных веществ из одного агрегатного состояния в другое (рис. 3.85, в). В инструменте делают внутреннюю полость, разделенную на две зоны: 1) теплообменную 3, отделенную тонкой пленкой от источника тепла – контактной площадки инструмент – деталь; 2) теплопередающую 4, соединенную с первой зоной средствами для подвода и отвода испаряемого жидкого охлаждения (воды, фреона, жидкой соды, металла). Внутреннюю поверхность полости выстилают капиллярной сеткой 2 (например, тканевой). По этой сетке охладитель поступает из теплопередающей зоны в теплообменную, где испаряется, поглощая теплоту, и вследствие разности давления в различных сечениях внутренней полости резца передает ее в теплопередающую зону, температура которой поддерживается ниже точки конденсации благодаря охлаждению наружной поверхности державки сжатым воздухом. В теплопередающей зоне охладитель конденсируется, а выделяющаяся при этом теплота передается через стенку резца к более холодной внешней поверхности. Жидкий охладитель накапливается в теплопередающей зоне и весь цикл передачи и испарения охладителя повторяется, обеспечивая непрерывный отбор теплоты от режущей кромки резца.

Для повышения эффективности действия СОЖ используют ультразвуковые и магнитные поля, световое облучение. Радикальным средством изменения физической и химической активности СОЖ является регулирование ее температуры. В силу ряда эксплуатационных трудностей нагретые СОЖ в промышленности пока не применяются, охлажденные же жидкости стали находить успешное применение. По данным исследований охлаждение СОЖ до $-40 \dots -50$ °С позволяет повысить скорость резания на 35 % и в 2 – 5 раз поднять стойкость инструмента. Если нет условий для охлаждения СОЖ, то надо хотя бы поддерживать температуру СОЖ на

уровне 16 – 20 °С. Охлаждающее действие СОЖ можно также повысить путем ее динамической активации, т.е. увеличения скорости ее движения.

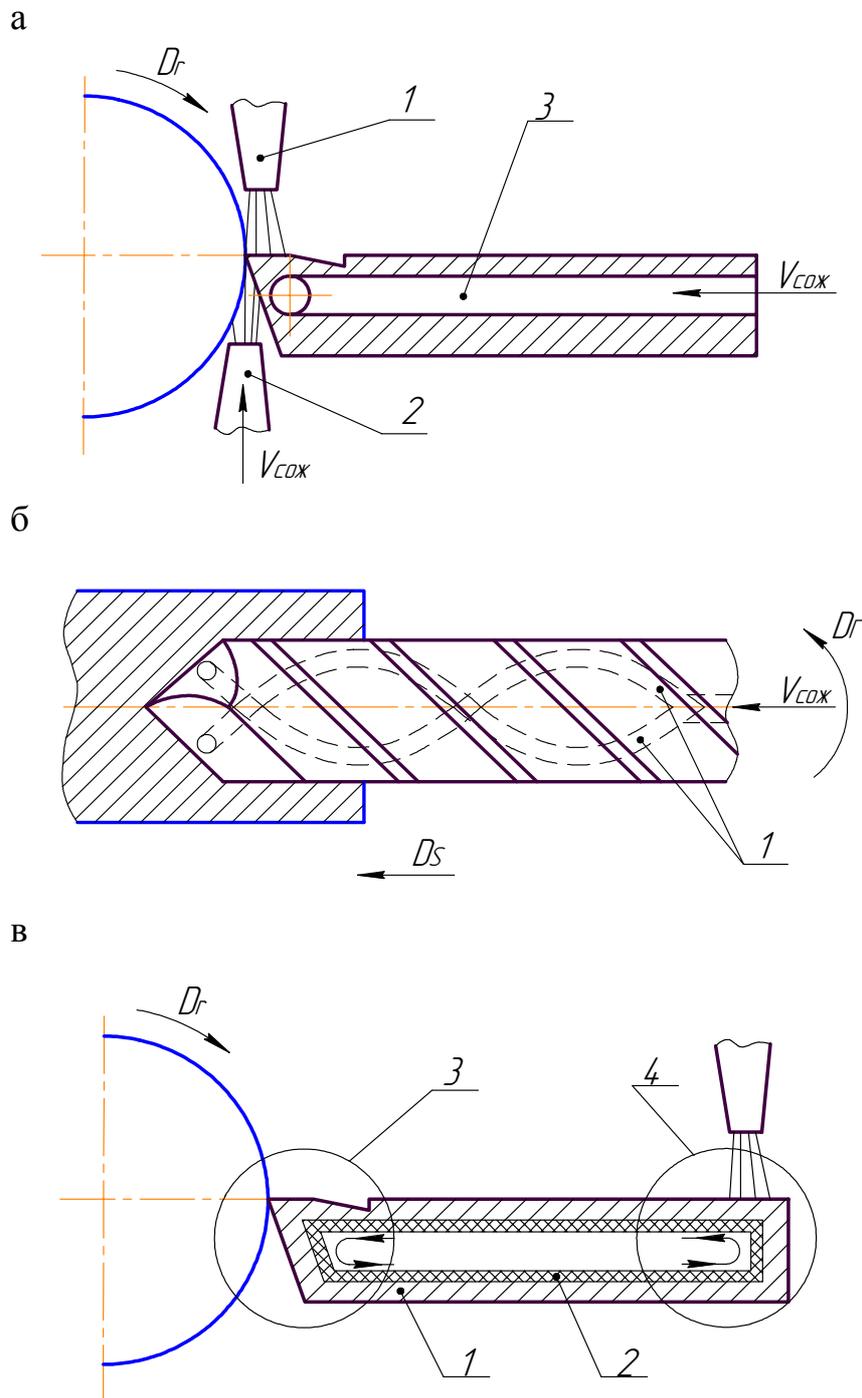


Рис. 3.85. Способы подачи СОЖ в зону резания:

- а – при точении поливом из сопла 1, под давлением из сопла 2, через внутренний канал 3;
- б – при сверлении через внутренние каналы 1;
- в – при точении резцом 1 с тепловой трубой и пористым наполнителем 2, теплообменной 3 и теплопередающей 4 зонами

3.19. Комбинированная обработка резанием

3.19.1. Виды комбинированной обработки резанием и их характеристики

Виды комбинированной обработки резанием классифицируют по таким признакам как схема формообразования (кинематическая схема резания); вид энергии и способ ее подвода; вид физико-химического воздействия. Кинематические схемы резания рассмотрены в лекции 3; вид энергии: механическая, электрическая, химическая, тепловая и ядерная; способ подвода энергии определяется взаимным расположением инструмента и заготовки; вид физико-химического воздействия: пластическое деформирование с последующим разрушением; плавление, испарение, анодное растворение, эрозионное разрушение.

Исходя из этого, различают:

- 1) резание с дополнительным механическим (М) воздействием, например, пластическим деформированием – М;
- 2) вибрационное резание с наложением колебаний (К), а также с использованием химических (Х) сред – М + К, М + К + Х;
- 3) сверхскоростное резание, характеризуемое механическим воздействием с хрупким разрушением материала – М;
- 4) резание в специальных средах, например, химических – М + Х;
- 5) резание с нагревом (Т) – М + Т;
- 6) резание с электротоком (Э) – М + Э (тепловое);
- 7) электроконтактную обработку – М + Э_{Т+Э} (тепловое и эрозионное);
- 8) анодно-механическую обработку – М + Э_(Т+Х+Э);
- 9) электрохимическую обработку – Э_х;
- 10) электроэрозионную обработку – Э_э;
- 11) электронно-лучевую обработку – Э_т;
- 12) лазерную обработку – Э_т;
- 13) плазменную обработку – П;
- 14) плазменно-механическую обработку – П + М;

Рассмотрим некоторые разновидности комбинированной обработки.

Резание с опережающим пластическим деформированием (ОПД) предусматривает совмещение двух процессов – ОПД и процесса резания (рис. 3.86, а). При этом часть работы пластического деформирования при резании выполняется дополнительным устройством. Это обеспечивает снижение силы и температуры резания, повышение стойкости режущего инструмента и производительности обработки. Воздействие деформирующего инструмента может быть оказано на поверхность резания или на об-

рабатываемую поверхность. ОПД может осуществляться с помощью рифленого ролика, что обеспечивает надежное стружкодробление. При этом рифленый ролик может быть самовращающимся (от вращающейся детали) и принудительно вращающимся (привод). ОПД применяется при точении, ротационном точении, фрезеровании, протягивании, абразивной обработке.

При *резании с последующим пластическим деформированием (ППД)* деформирующий элемент располагается за режущим инструментом в направлении, обратном направлению подачи. Деформирующий элемент играет роль «выглаживателя». В этом случае осуществляется упрочнение и повышение качества обработанной поверхности.

Резание с вибрациями или вибрационное резание заключается в том, что на обычно принятую для данной операции кинематическую схему резания накладывается дополнительное направленное вибрационное движение инструмента относительно заготовки. В этом случае реализуются положительные свойства вибраций в виде надежного дробления стружки и улучшения обрабатываемости, прежде всего, труднообрабатываемых материалов. Физические особенности этого процесса состоят в кратковременном изменении скорости и углов резания, цикличности нагрузки, снижении сил трения, повышении эффективности проникновения смазочно-охлаждающих средств в зону резания. Вибрационное резание подразделяют по виду вибраций режущего инструмента или заготовки и типу вибропривода. По частоте колебаний различают вибрации низко- (до 200 Гц) и высокочастотные (от 200 до 15000 Гц), а также ультразвуковые (свыше 15000 Гц). Вибрации малой частоты могут быть линейными или угловыми (см. рис. 3.86, б).

Низко- и высокочастотные колебания в основном применяются для дробления стружки. Ультразвуковые колебания способствуют ликвидации нароста, уменьшению зоны первичной деформации и, как следствие, снижению сил резания и шероховатости обработанной поверхности, а также повышению в 1,3 раза производительности резания.

В качестве виброприводов используют гидравлические, электрические и механические, а также их комбинации.

Сверхскоростное резание осуществляется в диапазоне скоростей более 10000 м/мин, основывается на уменьшении области пластической деформации и способствует хрупкому разрушению металла. При сверхскоростном резании наблюдается снижение температуры резания и обеспечивается повышение производительности обработки. Высоко- и сверхскоростное резание реализуется на современных станках с частотой вращения до 60000 мин⁻¹ и

установках с использованием взрывчатых веществ (ракеты, пушки, ружья), электромагнитных полей и ускорения свободного падения (копры).

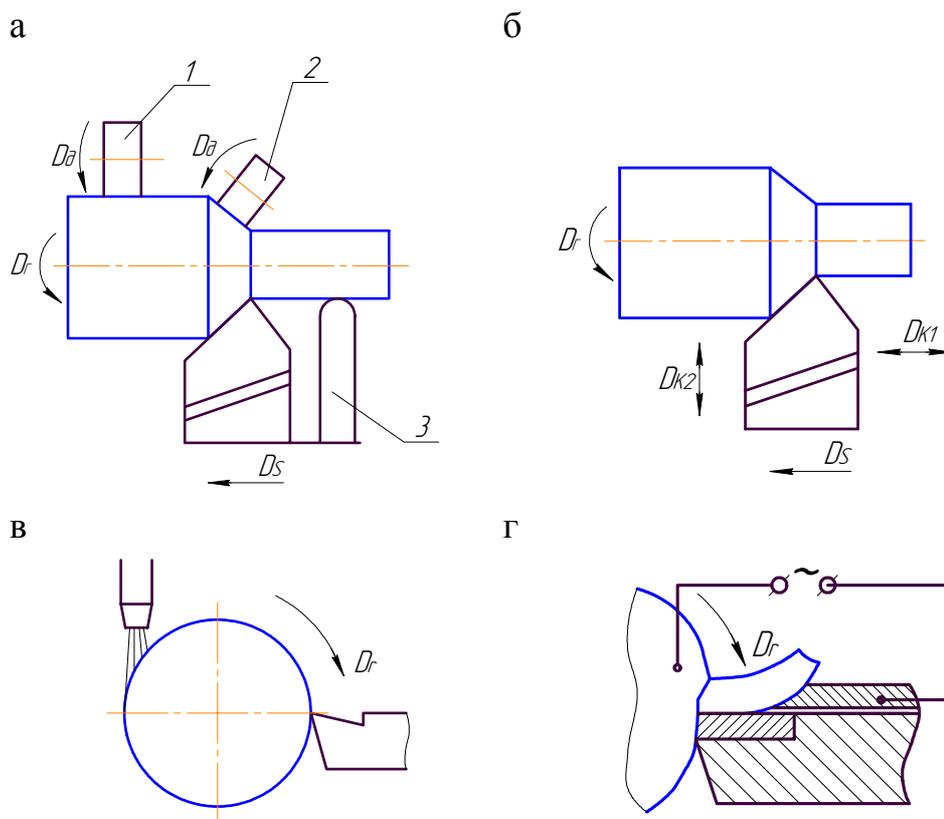


Рис. 3.86. Схемы комбинированных видов механической обработки:
 а – пластическим деформированием элементом, опережающим 1, параллельным 2, последовательным 3; б – с колебаниями; в – с плазменным подогревом; г – с электроподогревом

Резание с нагревом срезаемого слоя применяется, прежде всего, при обработке труднообрабатываемых материалов (см. рис. 3.86, в, г). Резание с нагревом может осуществляться как по схеме последовательного совмещения основного воздействия с тепловым, так и по схеме параллельного воздействия обоих факторов. Наиболее распространен первый метод. В этом случае дополнительное воздействие осуществляется нагревом всей заготовки в печах или путем использования тепла предыдущей операции. Используют нагрев поверхностного слоя заготовки токами высокой частоты (ТВЧ), инфракрасным излучением, электрической дугой, струей плазмы или лучом лазера. Нагрев снижает механические показатели и повышает пластичность обрабатываемого материала. При температуре $\theta = 780 - 860 \text{ }^\circ\text{C}$ сила резания снижается на 20 – 25 %. Например, при точении титанового

сплава ВТЗ-1 с нагревом $\theta = 500$ °С контактное давление на инструмент из твердого сплава ВК8 в два раза ниже, чем при обработке без нагрева.

При *резании с низкотемпературным охлаждением* заготовки или инструмента в зону обработки подается антифризная жидкость с добавлением глицерина (-10 °С) или жидкий азот. При этом повышается теплоотвод, изменяются физико-механические свойства материалов, снижаются показатели деформации срезаемого слоя и качество обработки, возрастает в 1,5 раза стойкость инструмента.

В *электрохимических и электроэрозионных видах обработки* используется электрическая энергия через химическое, тепловое и механическое воздействие. Механизм съема металла при электрохимической обработке основан на электролизе – процессе окисления (растворения) и восстановления (осаждения) поверхности электродов, помещенных в токопроводящий раствор – электролит. Один из электродов, например, заготовка присоединяется к положительному полюсу и является анодом, а второй, например, инструмент – к отрицательному и является катодом. В результате взаимодействия катода и анода происходит растворение последнего и удаление растворенной части инструментом. При этом взаимодействие инструмента и заготовки может происходить по кинематической схеме отрезания, точения, прошивания, шлифования, заточки, полирования, доводки, суперфиниширования. Наиболее эффективна электрохимическая обработка в случае обработки труднообрабатываемых материалов и для исключения нагрева заготовки.

Электроэрозионная обработка заключается в изменении формы, размеров, шероховатости и свойств поверхности заготовки под воздействием электрических разрядов в результате электрической эрозии (ГОСТ 25331-82). Возникающий между электродом-инструментом и электродом-заготовкой импульс электрической энергии преобразуется в тепловую, за счет чего происходит нагрев, расплавление и испарение материала. При этом кинематическая схема реализации электроэрозионной обработки, так же как и в случае электрохимической может быть различной. Наибольший эффект достигается в случае обработки труднообрабатываемых материалов, отверстий и полостей сложной формы и малых размеров. Разновидностью электроэрозионной обработки является *электроконтактная обработка*, которую классифицируют по напряжению и характеру разряда на контактную, контактно-дуговую и дуговую. Кинематические схемы электроконтактной обработки отверстий, пазов, плоских поверхностей и резки заготовок разнообразны, как и в случае электроэрозионной обработки.

Электронно-лучевая обработка основана на воздействии на материал заготовки пучка электронов, кинетическая энергия которого, преобразуясь в рабочей зоне в тепловую, вызывает нагрев, плавление и испарение обрабатываемого материала.

При *светолучевой обработке* воздействие на материал заготовки оказывает сфокусированное поли- или монохроматическое излучение. В последнем случае процесс называется лазерной обработкой.

При *плазменной обработке* происходят процессы, при которых в результате воздействия низкотемпературной плазмы ($\theta = 3 \cdot 10^3 \dots 3 \cdot 10^4$ °С) возникают изменения химического состава, структуры или физического состояния обрабатываемого материала.

Применение этих видов обработки зачастую сочетается с видами механической обработки (см. рис. 3.86, в, г).

3.20. Оптимизация функционирования системы резания

3.20.1. Общие представления об оптимизации

Теория оптимизации в современном представлении включает в себя совокупность фундаментальных математических результатов и численных методов, ориентированных на нахождение наилучших вариантов из множества альтернатив и позволяющих избежать полного перебора в оценке возможных вариантов.

Оптимальная система (от лат. *optimus* – наилучший) – это система, для которой выработанные определенным образом критерии принимают оптимальные значения. Такими критериями могут быть, например, быстродействие, минимум затрат, точность и др., либо обобщенные критерии, представляющие собой функцию нескольких величин.

Оптимизация системы резания – это выбор такого варианта управления процессом резания, при котором достигается экстремальное значение критерия, характеризующего качество управления. При этом разделяются два понятия: критерий оптимизации и критерий оптимальности. Критерий оптимизации или целевая функция – это критерий, который определяет качество управления процессом, а критерий оптимальности – его заданная величина. В свою очередь *критерии оптимизации* разделяются на дифференциальные и интегральные. К дифференциальным или локальным критериям относятся физические (удельная энергоемкость процесса, температура резания, интенсивность изнашивания инструмента и др.). Интегральные и обобщенные критерии основаны на комплексной оценке разных сторон процесса резания (скрытая энергия деформирования поверхно-

стного слоя детали) или комбинация различных оценок одного и того же критерия при решении минимаксных задач оптимизации. По назначению оптимизацию подразделяют на структурную, предназначенную для оптимального построения структуры (последовательности) переходов и операций при механической обработке, и на параметрическую – для назначения оптимальных параметров процесса резания. Оптимизация может быть *внешней*, реализуемой вне станка, и *внутренней*, осуществляемой при обработке на станке. В зависимости от поставленных целей оптимизация может быть одноцелевой, когда ищется экстремум одной целевой функции, и *многокритериальной (многоцелевой)* при поиске экстремума нескольких критериев оптимизации. Для автоматизированного производства многокритериальная оптимизация представляется наиболее перспективной, так как она призвана разрешить противоречия между экономическими показателями процесса резания и условиями его протекания.

Оптимизация может выполняться в *детерминированной (статической)* постановке при постоянных значениях всех входящих в модель параметров и в *стохастической (динамической)* постановке при учете вероятностной природы процесса резания.

При многокритериальной оптимизации важен правильный выбор критериев. Один из путей учета совокупностей противоречивых целевых установок состоит в выборе первичного критерия, тогда как остальные относятся к вторичным. Важен также выбор граничных условий, независимых переменных и уровень детализации системы. При параметрической оптимизации обработки резанием критерии могут быть как экономические, так и физические, и ее нельзя отрывать от структурной оптимизации всего технологического процесса изготовления детали. В свою очередь, в ряде производственных систем нельзя оценивать технологический процесс в отрыве от особенностей этих систем и факторов, учитывающих место детали в готовом изделии.

Исходя из этих положений, задача оптимизации представляется в общем виде: $Q' = \text{extr} \{ f_0(x, w) \mid x \in D \}$, при технологических ограничениях $g(x, w) \leq 0$; $f(x) \leq 0$; $a_i \leq x_i \leq b_i$, где $f_0(x, w)$ – критерий оптимизации, зависящий от управляемых x и постоянных w параметров процесса; D – область допустимых значений x ; a_i, b_i – постоянные.

Математическая модель глобальной задачи: $F(x) - F_0 \leq 0$, где $x \in X$; F_0 – постоянная; $F(x)$ – величина производственного цикла изготовления детали; X – множество, отражающее систему ограничений по свойствам конструкции, особенностям производственной системы и технологические ограничения.

Для решения глобальной задачи используется метод декомпозиции, состоящий в том, что решение глобальной задачи основывается на совокупности решения локальных задач: $F(x_i) \leq 0, x_i \in D_i$, при условии оптимальности $W_i(x_i) = \min_{x_i \in D_i} W_i(x_i)$.

3.20.2. Оптимизация резания по критерию обрабатываемости

С учетом общих представлений теории оптимизации под *оптимизацией функционирования системы резания* понимается определение наилучших параметров (свойств), сочетаний и связей элементов обрабатывающей системы (станка, приспособлений, инструментов, деталей, технологических сред, кинематической схемы вида обработки, режима резания (v, S, t)), имеющих место на входе системы резания, а также характеристик процесса резания (контактных, динамических, тепловых и т.д.) по техническим, в том числе технологическим и физическим, организационным и экономическим критериям, обеспечивающим наилучшие показатели на выходе системы резания (производительности, качества, стойкости, себестоимости).

Оптимизация процесса резания, чаще всего, обуславливается характеристиками *обрабатываемости* материалов резанием. Под *обрабатываемостью материалов* понимают способность материалов подвергаться резанию по ряду технологических показателей. Основными показателями, характеризующими обрабатываемость материала, являются: 1) скорости резания, с которыми наиболее рационально обрабатывать заготовку; 2) возможность получения необходимой точности обработки при чистовых операциях, характеризуемой интенсивностью изнашивания инструмента; 3) возможность получения необходимых параметров шероховатости и качества обработанной поверхности при отделочных операциях, определяемых в основном склонностью к адгезии инструментального и обрабатываемого материалов и пластичностью последнего; 4) силы, возникающие при резании, и потребная мощность; 5) характер образования стружки и ее деформации; 6) температура резания. В зависимости от вида и характера обработки те или иные технологические показатели становятся определяющими. Например, при черновой обработке – производительность, силы резания и условия транспортировки стружки, при чистовой – шероховатость, наклеп и остаточные напряжения.

Комплексное определение показателей обрабатываемости позволяет подобрать материал, не только удовлетворяющий эксплуатационным требованиям, предъявляемым к детали, но и обеспечивающий минимальную стоимость механической обработки резанием.

Поскольку производительность и себестоимость обработки зависит, главным образом, от допускаемой скорости резания, то для любого вида и характера обработки основным показателем обрабатываемости является скорость резания, величина которой определяется изнашивающим действием, оказываемым обрабатываемым материалом на контактные поверхности инструмента. Поэтому в узком понимании обрабатываемость материалов характеризуется допускаемой скоростью резания (см. раздел 3.17). Считают, что лучшую обрабатываемость имеет тот материал, который при прочих равных условиях допускает более высокую скорость резания. Количественно обрабатываемость оценивают *коэффициентом обрабатываемости*, представляющим собой отношение скорости резания, допускаемой при резании определенного материала, к скорости резания, допускаемой материалом, принятым за эталонный. Если коэффициент обрабатываемости больше 1, то данный материал обрабатывается лучше, чем эталонный, а если меньше 1, то хуже.

Существуют различные методы определения обрабатываемости. Например, в основе классического метода лежит нахождение зависимости:

$v = \frac{C}{T^m}$. При этом производится точение торца диска из обрабатываемого

материала от центра к периферии. Резец доводят до окончательного затупления. Имея значения C и m для обрабатываемого материала, определяют скорость резания, соответствующую периоду стойкости $T = 60$ мин и по ним находят коэффициент обрабатываемости. Используется также положение, что интенсивность изнашивания резца практически независима от величины износа. Обтачивая заготовку при постоянных значениях t и S с различными v , фиксируют для каждой скорости прирост линейного износа задней поверхности δ , соответствующий времени работы резца T . Затем для каждой скорости

определяем интенсивность износа резца $I = \frac{\delta}{T}$. Строят зависимость

$I = f(v)$ в двойной сетке, представляющей собой прямую, тангенс угла наклона ψ которой к оси I равен показателю относительной стойкости m в

формуле $v = \frac{C}{T^m}$. Затем определяют эквивалентную интенсивность износа

$I_{\text{экв}} = \frac{\delta_1 + \dots + \delta_n}{T_1 + \dots + T_n}$, по графику находят $v_{\text{экв}}$, затем $C = v_{\text{экв}} T^{\text{tg}\psi}$.

Обрабатываемость материалов определяется их химическим составом, структурным состоянием и их теплофизическими характеристиками. Химические элементы, входящие в состав современных конструкционных

материалов по степени их влияния на обрабатываемость можно условно разделить на три группы: 1) для сталей на ферритной основе – углерод и кремний; 2) хром, вольфрам, ванадий и молибден; 3) марганец и никель – фактически не влияют на обрабатываемость. Увеличение процентного содержания углерода ухудшает обрабатываемость. Для удобства оценки обрабатываемости при расчете режимов резания все материалы разделяют на отдельные группы: 1) углеродистые, легированные, конструкционные, инструментальные стали; 2) нержавеющие, жаропрочные и жаростойкие; 3) титановые; 4) чугуны. Улучшение обрабатываемости достигается за счет соответствующего отжига или отпуска, добавления серы, селена, телура, свинца, висмута, применения СОЖ.

Как для определения обрабатываемости материалов, так и в целом для оптимизации функционирования системы резания необходима грамотная постановка эксперимента.

3.21. Постановка эксперимента при резании материалов

3.21.1. Классическая методика постановки эксперимента при резании

При резании материалов наиболее широко применяются так называемая классическая методика постановки эксперимента и метод планирования эксперимента. *Классическая методика* получения эмпирических зависимостей характеристик процесса резания от параметров обработки основана на проведении экспериментов при последовательном изменении одного из факторов при неизменности остальных (однофакторный эксперимент).

Для того, чтобы установить связь между изменением независимой переменной, например, глубины резания t , подачи S и скорости резания v и изменением зависимой переменной, например, составляющих силы резания P_z , P_y , P_x поступают следующим образом. Проводят опыты по сериям. В каждой серии изменяют лишь один из элементов режима резания, например, в первой серии – t . Остальные элементы режима резания – S , v , в этой серии оставляют постоянными. Во второй серии опытов за переменную величину берут другой параметр, например, S . Неизменными в данной серии оставляют t и v . В третьей серии изменяют параметр v и соответственно неизменными оставляют t и S . Результаты опытов заносят в протокол исследования, где в каждой серии рядом со значением изменяемого элемента режима резания записывается значение силы резания.

Очевидно, что общая степенная формула типа $P = C_p \cdot t^{x_p} S^{y_p} \nu^{z_p}$ для каждой из серий опытов будет иметь более простой вид. Например, для серии изменения глубины резания:

$$P = C_{pt} \cdot t^{x_p},$$

где $C_{pt} = C_p \cdot S^{y_p} \nu^{z_p}$.

Если прологарифмировать данное степенное выражение, то получим уравнение прямой:

$$\lg P = \lg C_{pt} + x_p \lg t.$$

При построении ее в логарифмической системе координат (см. рис. 3.47), получим прямую, тангенс угла наклона которой определяет показатель x_p .

Значения C_p можно определить: 1) по графику для значения аргумента, равного 1, например, при $t = 1: P = C_{pt}$ и $C_p = \frac{C_{pt}}{S^{y_p} \nu^{z_p}}$. И так для каждой серии опытов, а затем определяется среднее значение; 2) из общей

формулы $C_p = \frac{P}{t^{x_p} S^{y_p} \nu^{z_p}}$.

Целесообразнее коэффициент C_p определять не по любому опыту данной серии, а по тому, который повторяется в каждой серии. Из трех полученных коэффициентов рассматривается среднеарифметическое значение $C_p = \frac{C'_p + C''_p + C'''_p}{3}$.

Показатели степеней и постоянные коэффициенты в формуле для определения силы резания можно рассчитать по способу наименьших квадратов. Например, для серии глубины резания t при исследовании составляющей силы резания P_z формулы для расчета будут иметь следующий вид:

$$x_{P_z} = \frac{n \sum_{i=1}^n \lg t_i \cdot \lg P_{z_i} - \sum_{i=1}^n \lg t_i \cdot \sum_{i=1}^n \lg P_{z_i}}{n \sum_{i=1}^n (\lg t_i)^2 - \left(\sum_{i=1}^n \lg t_i \right)^2};$$

$$\lg C_{P_z} = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n \lg P_{z_i} - x_{P_z} \cdot \sum_{i=1}^n \lg t_i \right).$$

Классическая методика исследований трудоемка, так как требует проведения большого количества опытов и значительных затрат материалов. Кроме того, она не учитывает взаимовлияния изменяемых факторов, в

результате чего полученные эмпирические зависимости недостаточно точно и полно описывают существующую в действительности связь выходных характеристик процесса резания с параметрами обработки.

3.21.2. Планирование экспериментов при резании

Учитывая многофакторность процесса резания, наиболее эффективно использование при исследованиях *методов математической статистики*. Математическая теория эксперимента и ее раздел – *планирование эксперимента*, представляют собой новый подход к исследованию, в котором математическим методам отводится активная роль на всех этапах исследования: при формализации априорных сведений, перед постановкой опытов, при планировании эксперимента, обработке его результатов и при принятии решений.

Одним из наиболее распространенных методов планирования экспериментов является метод Бокса – Уилсона или так называемый метод крутого восхождения. Метод Бокса – Уилсона предусматривает проведение опытов небольшими сериями. В каждой серии опытов одновременно группируются по определенным правилам все факторы. Опыты проводят так, чтобы после математической обработки результатов предыдущей серии можно было спланировать следующую серию опытов.

При планировании эксперимента формулируют цель исследования или, иначе говоря, выбирают параметр оптимизации. Входные переменные, влияющие на параметр оптимизации, называются факторами. Необходимо учитывать все действующие факторы.

Решение задачи предусматривает получение функции отклика факторов и нахождение с помощью нее оптимальных условий протекания процесса. В общем случае функция отклика может быть представлена в виде математической модели:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_k). \quad (3.68)$$

При прочих равных условиях наиболее предпочтительным является выбор модели в виде полинома:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}x_1^2 + \dots \quad (3.69)$$

На первом этапе планирования эксперимента для определения движения к оптимуму и крутого восхождения по поверхности отклика функцию отклика аппроксимируют полиномом первой степени:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 \dots + b_kx_k. \quad (3.70)$$

Для определения коэффициентов этого уравнения достаточно реализовать факторный эксперимент типа 2^k , где k – число факторов. Это планы первого порядка.

Рассмотрим полный факторный эксперимент, реализующий все возможные неповторяющиеся комбинации уровней независимых факторов, каждый из которых, в свою очередь, варьируется на двух уровнях. Построение модели методом полного факторного эксперимента состоит:

- из планирования эксперимента;
- из проведения эксперимента;
- из проверки воспроизводимости (однородности выборочных дисперсий);
- из получения математической модели объекта с проверкой статистической значимости выборочных коэффициентов регрессии;
- из проверки адекватности математического описания.

Рассмотрим данный подход на примере зависимости температуры резания от режима резания:

$$\theta = C_{\theta} \cdot t^{x_{\theta}} \cdot S^{y_{\theta}} \cdot v^{z_{\theta}} . \quad (3.71)$$

При логарифмировании зависимости (3.71) получим уравнение первой степени:

$$\lg \theta = \lg C + x \lg t + y \lg S + z \lg v . \quad (3.72)$$

Введем обозначения:

$$\lg \theta = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 , \quad (3.73)$$

где x_1, x_2, x_3 – факторы;

b_0, b_1, b_2, b_3 – коэффициенты регрессии.

Решение уравнения (3.73) получается путем варьирования каждого из факторов x на двух уровнях: верхнем $x_{iв}$ и нижнем $x_{iн}$. Значения факторов берутся в кодированном виде. Верхний уровень фактора обозначается (+ 1), нижний – (– 1). Уровни факторов и интервалы варьирования заносятся в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Уровни и интервалы варьирования факторов

Уровень	Код	Элементы режима резания (факторы)		
		t , мм (x_1)	S , мм/об (x_2)	v , м/мин (x_3)
Верхний	+ 1	2	0,3	20
Нижний	– 1	1	0,1	10

Затем составляется матрица планирования эксперимента. В нашем случае для трех факторов (2^3), т.е. восьми опытов, она будет иметь вид, представленный в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Матрица планирования эксперимента

№ опыта	Код			Результаты		
	x_1	x_2	x_3	1-го измерения	2-го измерения	средний
1	-1	-1	-1	$\lg\theta_1$	$\lg\theta_1$	$\lg\theta_1$
2	+1	-1	-1	$\lg\theta_2$	$\lg\theta_2$	$\lg\theta_2$
3	-1	+1	-1	$\lg\theta_3$	$\lg\theta_3$	$\lg\theta_3$
4	+1	+1	-1	$\lg\theta_4$	$\lg\theta_4$	$\lg\theta_4$
5	-1	-1	+1	$\lg\theta_5$	$\lg\theta_5$	$\lg\theta_5$
6	+1	-1	+1	$\lg\theta_6$	$\lg\theta_6$	$\lg\theta_6$
7	-1	+1	+1	$\lg\theta_7$	$\lg\theta_7$	$\lg\theta_7$
8	+1	+1	+1	$\lg\theta_8$	$\lg\theta_8$	$\lg\theta_8$

Коэффициенты регрессии определяются по формуле:

$$b_i = \sum_{j=1}^k \frac{x_{ji} y_j}{k}, \quad (3.74)$$

где $j = 0, 1, 2, \dots$ – номер фактора (ноль для вычисления b_0);

i – номер опыта в матрице планирования;

k – количество опытов в матрице;

y_i – средний отклик по k опытам в точке с номером i .

Например, коэффициент регрессии для зависимости (3.73) можно определить по формулам:

$$b_0 = \frac{\lg\theta_1 + \dots + \lg\theta_8}{8}; \quad (3.75)$$

$$b_1 = \frac{-\lg\theta_1 + \lg\theta_2 - \dots + \lg\theta_8}{8}; \quad (3.76)$$

и соответственно факторы по формулам:

$$x_1 = \frac{2[\lg t - (\lg t)_{cp}]}{\lg t_{max} - \lg t_{min}}; \quad (3.77)$$

$$x_2 = \frac{2[\lg S - (\lg S)_{cp}]}{\lg S_{max} - \lg S_{min}}; \quad (3.78)$$

$$x_3 = \frac{2[\lg v - (\lg v)_{cp}]}{\lg v_{max} - \lg v_{min}}. \quad (3.79)$$

Значения b и x подставляются в формулу (3.70), она потенцируется и получается формула с численными значениями коэффициентов и показателей степени.

Для проверки адекватности полученной формулы вычисляются значения температуры для максимальных значений элементов режима резания и сравниваются с экспериментально замеренной температурой резания.

Кроме того, необходимо доказать выполнение второй предпосылки регрессионного анализа об однородности выбранных дисперсий и адекватности модели. Дисперсией называется среднее значение квадрата отклонений случайной величины от ее среднего значения и определяется она по формуле:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^k (y_i - y_{cp})^2}{k-1} = \frac{\sum_{i=1}^n (\theta_i - \theta_{cp})^2}{k-1}, \quad (3.80)$$

где i – номер опыта;

y_i – значение параметра оптимизации в i -том параллельном опыте;

y_c – среднее арифметическое значение параметра оптимизации в i -тых параллельных опытах;

k – число параллельных опытов.

Проверка однородности двух дисперсий производится с помощью критерия Фишера по формуле:

$$F_p = \frac{S_1^2}{S_2^2}, \quad (3.81),$$

где S_1 – остаточная дисперсия;

S_2 – дисперсия воспроизводимости.

Полученные значения критерия F_p сравнивают с табличным при выбранной доверительной вероятности для проверки значимости различия между остаточной дисперсией и дисперсией воспроизводимости. Если это различие незначительно, то расчетное значение критерия не превышает табличного и поэтому гипотеза об адекватности принимается. При неадекватности модели ($F_{расч} > F_{табл}$) рекомендуется проведение дополнительного эксперимента для ее уточнения.

3.22. Определение рационального режима резания

Аналитический метод определения рационального режима резания основан на определении глубины резания t , подачи S и скорости резания v по таким ограничениям, как прочность механизмов станка, прочность и

жесткость инструмента и заготовки, шероховатость обработанной поверхности. Метод осуществляется в следующей последовательности: 1) выбор марки инструментального материала и геометрии лезвия режущего инструмента; 2) определение глубины резания; 3) определение допускаемой подачи; 4) определение скорости резания.

3.22.1. Расчет режима резания при точении

Рассмотрим реализацию метода на примере токарной обработки.

1. Выбор марки инструментального материала и геометрии лезвия резца производится в зависимости от свойств обрабатываемого материала, вида и характера обработки и требуемой шероховатости поверхности детали по справочникам.

2. Глубина резания чаще всего определяется как полуразность диаметров в среднем машиностроении, а в тяжелом – как общий припуск, снимаемый за несколько проходов.

3. При определении наибольшей технологически допускаемой подачи учитываются: а) прочность механизма подачи станка; б) прочность резца; в) жесткость резца; г) прочность изделия; д) жесткость изделия; е) шероховатость обработанной поверхности.

Подача, допускаемая прочностью механизма подачи станка.

В механизме подачи станка слабым звеном является шестерня, сцепляющаяся с рейкой, прикрепленной к станине станка.

Расчетное условие:

$$P_x \leq Q_{\text{доп.шест.}}$$

где P_x – осевая составляющая силы резания;

$Q_{\text{доп.шест.}}$ – усилие, допускаемое механизмом подачи станка (шестерней).

$Q_{\text{доп.шест.}}$ выбирается из паспорта станка. Поскольку скорость неизвестна, то в формулу $P_x = C_{px} \cdot t^{x_{px}} \cdot S^{y_{px}} \cdot v^{z_{px}} \cdot k_{px}$ подставляется поправочный коэффициент на скорость k_{vx} . И тогда

$$P_x = C_{px} \cdot t^{x_{px}} \cdot S^{y_{px}} \cdot k_{px} \cdot k_{vx}. \quad (3.82)$$

Отсюда

$$S_1 \leq y_{px} \sqrt{\frac{Q_{\text{доп.шест.}}}{C_{px} \cdot t^{x_{px}} \cdot S^{y_{px}} \cdot k_{px} \cdot k_{vx}}}. \quad (3.83)$$

Подача, допускаемая прочностью резца (рис. 3.87):

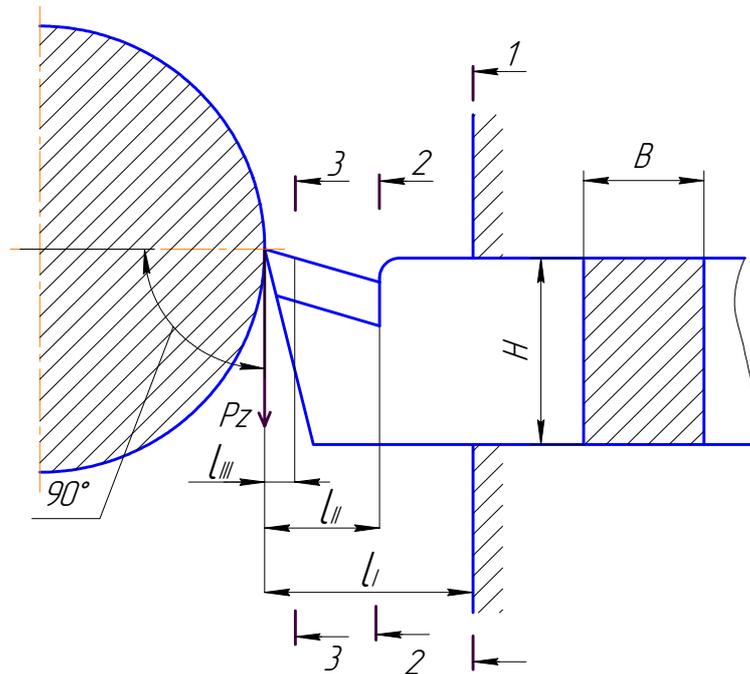


Рис. 3.87. Схема для расчета подачи, допускаемой прочностью резца

Расчетное условие:

$$M_{из} \leq [M_{из}]_{дон},$$

где $M_{из}$ – изгибающий момент от силы P_z ;

$[M_{из}]$ – допускаемый изгибающий момент.

$$P_z \cdot l \leq [\sigma]_u \cdot W,$$

где W – момент сопротивления резца изгибу,

или

$$C_{pz} \cdot t^{x_{pz}} \cdot S^{y_{pz}} \cdot k_{pz} \cdot k_{vz} \cdot l \leq [\sigma]_u \cdot \frac{BH^2}{6},$$

Отсюда

$$S_2 \leq y_{px} \sqrt{\frac{[\sigma]_u \cdot BH^2}{6C_{pz} \cdot t^{x_{pz}} \cdot k_{vx} \cdot k_{pz} \cdot l}}. \quad (3.84)$$

Данная формула справедлива как для цельных, так и для напайных резцов. В последнем случае, однако, кроме сечения 1-1 (рис. 3.87) необходимо проверить также и сечение 2-2, ослабленное вследствие паза в державке для размещения режущей пластины. В случае если пластина изготовлена из твердого сплава, опасным может оказаться и сечение 3-3, зависящее от толщины пластины и угла α .

Подача, допускаемая жесткостью резца.

Рассчитывается из условия максимально допускаемой стрелы прогиба резца под действием силы резания P_z .

$$f_{uz2} \leq [f];$$

$$\frac{P_z \cdot l^3}{3EI} \leq [f], \text{ или } \frac{C_{pz} \cdot t^{x_{pz}} \cdot S^{y_{pz}} \cdot k_{pz} \cdot k_{uz} \cdot l^3}{3EI} \leq [f],$$

где $I = \frac{BH^3}{12}$ – момент инерции;

$[f] = 0,1$ мм – при черновом точении;

$[f] = 0,05$ мм – при чистовом точении.

Тогда

$$S_3 \leq y_{pz} \sqrt{\frac{[f]_u E \cdot BH^3}{4C_{pz} \cdot t^{x_{pz}} \cdot k_{uz} \cdot k_{pz} \cdot l^3}}. \quad (3.85)$$

Подача, допускаемая прочностью заготовки (рис. 3.88).

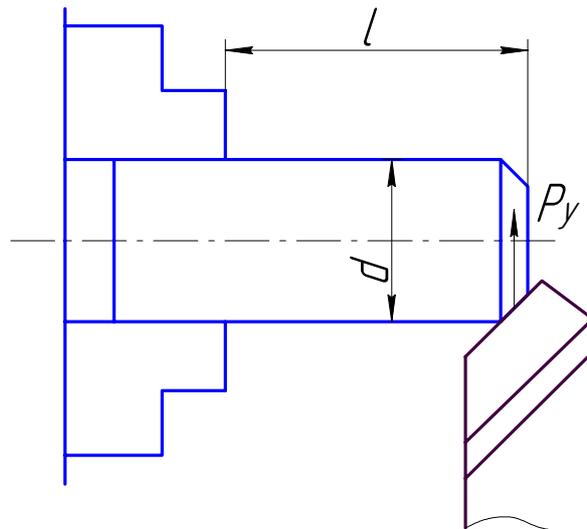


Рис. 3.88. Схема для расчета подачи, допускаемой прочностью заготовки, установленной в патроне

Этот расчет производится для особо тонких деталей ($L/d > 10$).

Расчетное условие:

$$M_{uz} \leq [M_{uz}],$$

где $M_{uz} = kP_y l \rightarrow$ – изгибающий момент в опасном сечении от действия силы P_y ;

$[M_{uz}] = [\sigma]_u \cdot 0,1 \cdot d^3$ – допускаемый изгибающий момент;

k – коэффициент, учитывающий способ закрепления обрабатываемой заготовки на станке;

$k = 1$ – заготовка крепится в патроне;

$k = 3/16$ – заготовка крепится в патроне и поддерживается центром задней бабки;

$k = 1/4$ – заготовка обрабатывается в центрах станка.

Тогда

$$S_4 \leq y_{py} \sqrt{\frac{[\sigma]_u \cdot 0,1 \cdot d^3}{C_{py} \cdot t^{x_{py}} \cdot k_{vy} \cdot k_{py} \cdot k \cdot l}}. \quad (3.86)$$

Подача, допускаемая жесткостью изделия (рис. 3.79).

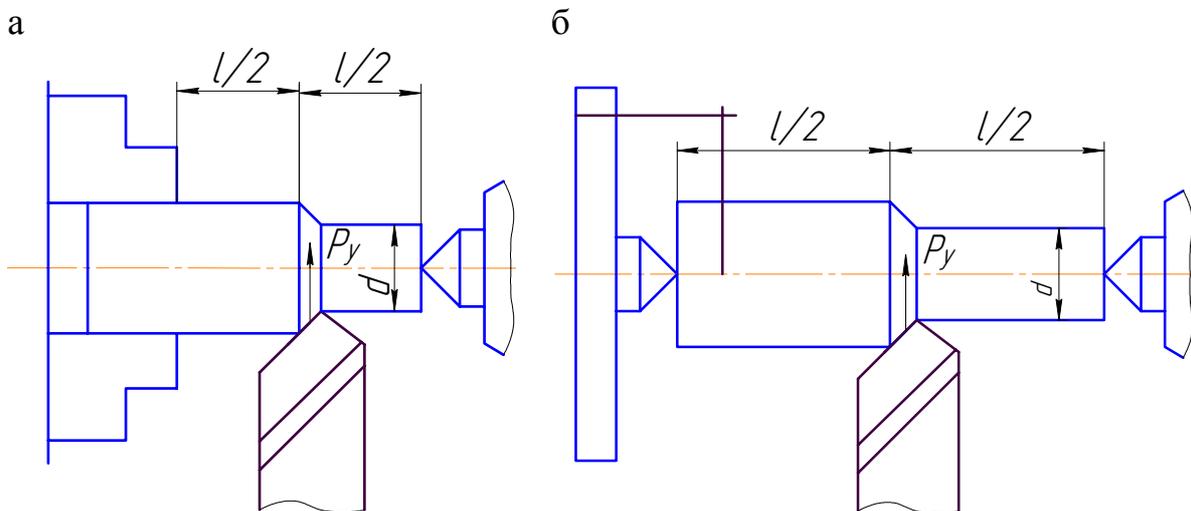


Рис. 3.89. Схема для расчета подачи допускаемой прочностью заготовки установленной в патроне и центре (а), в центрах (б)

Этот расчет производится при отношениях $\frac{L}{d} \geq 8 \dots 10$. Подача определяется из условия максимально допустимой стрелы прогиба:

$$f \leq [f];$$

$$\frac{P_y \cdot l^3}{kEI} \leq [f],$$

где k – коэффициент, учитывающий способ закрепления заготовки на станке.

Если данная операция предшествует токарной чистовой операции, то $[f] = 0,1 \dots 0,2$ мм. Если операция является окончательной, то $[f]$ должен быть увязан с допуском δ на точность изготовления:

$$[f] = \left(\frac{1}{7} \dots \frac{1}{8} \right) \delta.$$

Тогда

$$S_5 \leq y_{py} \sqrt{\frac{0,05kEd^4[f]}{C_{py} \cdot t^{x_{py}} \cdot k_{vy} \cdot k_{py} \cdot l^3}}. \quad (3.87)$$

Подача, допускаемая шероховатостью обработанной поверхности детали.

Расчетное условие:

$$h \leq R_z$$

– для острозаточенного резца с учетом формулы (3.66):

$$S'_6 \leq R_z \frac{\operatorname{tg}\varphi + \operatorname{tg}\varphi_1}{\operatorname{tg}\varphi \cdot \operatorname{tg}\varphi_1}; \quad (3.88)$$

– для резца с радиусом вершины с учетом формулы (3.67):

$$S''_6 \leq \sqrt{8r \cdot R_z}. \quad (3.89)$$

Из полученных шести значений подач выбирается наименьшее и согласовывается с паспортом станка. Эта подача S_6 будет являться наибольшей технологически допускаемой подачей.

Выбор скорости резания.

Скорость резания определяется исходя из заданной стойкости инструмента T и мощности на шпинделе станка N .

По стойкости инструмента

Расчетное условие:

$$T_1 > T,$$

Отсюда с учетом формулы (3.62) получаем:

$$v_1 = \frac{C_v}{T^m t^{x_{yv}} S_0^{y_v}} \cdot k_v; \quad (3.90)$$

$$n_1 = \frac{1000 \cdot C_v}{\pi d T^m t^{x_{yv}} \cdot S_0^{y_v}} \cdot k_v. \quad (3.91)$$

По мощности на шпинделе

Расчетное условие:

$$N_{рез} < N;$$

Отсюда с учетом формулы (3.34) получаем:

$$N_{рез} = \frac{P_z \cdot v}{60 \cdot 10^2}, \text{ кВт};$$

$$M_{кр} = 716200 \cdot 13,6 \cdot \frac{N}{n}, \text{ Н}\cdot\text{мм};$$

$$M_{рез} = \frac{P_z \cdot d}{2}, \text{ Н}\cdot\text{мм};$$

$$n_2 = \frac{716200 \cdot 13,6 \cdot 2N}{C_{pz} \cdot t^{x_{pz}} \cdot S_0^{y_{pz}} \cdot k_{vz} \cdot k_{pz} \cdot d}. \quad (3.92)$$

Из двух значений частот вращения n_1 и n_2 меньшее значение является лимитирующим, согласовывается с паспортом станка и используется в дальнейшем при обработке заготовок.

3.22.2. Особенности расчета режима резания при многоинструментальной обработке

Примерами многоинструментальной обработки могут служить работы, выполняемые на токарных автоматах и полуавтоматах, обработка отверстий с помощью многошпиндельных сверлильных головок, одновременное фрезерование нескольких поверхностей набором фрез на одно- или многошпиндельных фрезерных станках и т.д.

Выбор наивыгоднейшего режима резания при многоинструментальной обработке представляет сложную задачу, т.к. наряду с учетом особенностей работы каждого отдельного инструмента требуется общий анализ всей наладки, т.е. всей совокупности инструментов, используемых на станке, и распределения между ними работы резания, необходимой для выполнения данной операции.

Общие принципы расчета режима резания при многоинструментальной обработке аналогичны расчетам при одноинструментальной обработке.

На практике используют упрощенные методы расчета режима резания для многоинструментальных наладок, которые основаны на следующем. Обычно в наладке имеется небольшое количество инструментов с самой низкой стойкостью, а у некоторых малонагруженных инструментов стойкость очень велика. Инструмент, для которого стойкость, выраженная в количестве деталей, обработанных до затупления, будет наименьшей, называется *лимитирующим*. Поэтому в основу может быть положен расчет по лимитирующему инструменту. Это означает, что для данной наладки сначала устанавливают лимитирующий инструмент, затем для этого инструмента назначают наивыгоднейшую скорость резания, обеспечивающую ему достаточно высокую стойкость, и по ней рассчитывают необходимый режим работы станка.

Наивыгоднейший период стойкости лимитирующего инструмента, выраженный в минутах машинного времени, должен быть значительно больше, чем для условий одноинструментальной работы. При установле-

нии значения его величины учитывается сложность наладки и количество входящих в нее инструментов.

3.22.3. Особенности расчета режима резания при обработке на агрегатных станках и автоматических линиях

Характерной особенностью агрегатных станков и автоматических линий является то, что режим резания в этом случае устанавливается при их проектировании. При эксплуатации могут быть внесены лишь некоторые коррективы к режимам, принятым при проектировании. Также отличаются условия эксплуатации режущего инструмента на универсальных и автоматических линиях. В последнем случае непрерывное наблюдение за работой и состоянием каждого из многочисленных инструментов невозможно. Важное значение приобретает надежная работа всех одновременно работающих инструментов в период между двумя смежными моментами их групповой замены.

Оказывается, что расчет режима резания для автоматических линий, исходя из выбранного периода стойкости, не приводит к оптимальным условиям обработки. В существующей методике мало внимания уделяется количеству деталей, которое может быть обработано инструментом за период его стойкости. Это количество деталей в условиях работы автоматических линий имеет особо важное значение, т.к. оно определяет период времени между групповой сменой инструмента и связанные с этим простои. Количество деталей, обработанных за период стойкости T :

$$k = \frac{1000 \cdot S \cdot T}{f}, \quad (3.93)$$

где f – площадь обработанной поверхности детали.

3.22.4. Оптимизация режима резания методом линейного программирования

Применение ЭВМ позволяет определить оптимальные элементы режима резания с минимальной затратой времени. Методика расчета элементов режима резания включает создание математической модели, описывающей закономерности процесса резания, и составление уравнений технических ограничений и оптимизации.

Для построения математической модели процесса резания, например, точения, и использования метода линейного программирования необходимо все неравенства технических ограничений и уравнение целевой функции преобразовать в линейные формы. С целью исключения возможности появления отрицательных логарифмов, значения S во всех уравнениях и нера-

венствах умножаются на 100. После логарифмирования левых и правых частей уравнений и неравенств получаем:

$$\ln n + y_v \ln S \leq \ln \left(\frac{318 C_v}{T^m t^{x_v} D} K_v \right), \quad (3.94)$$

$$(1 + z_{p_z}) \ln n + y_{p_z} \ln S \leq \ln \left[\frac{6120 \cdot 1000^{1+z_{p_z}} N_3 \eta}{C_{p_z} (\pi D)^{1+z_{p_z}} K_{p_z}} \right], \quad (3.95)$$

$$\ln n + \ln S \geq \ln \left(\frac{L_{px} R}{60 K_3 r_d - T_{BH} R} \right), \quad (3.96)$$

$$\ln n \geq \ln n_{CT \min}, \quad (3.97)$$

$$\ln n \leq \ln n_{CT \max}, \quad (3.98)$$

$$z_{p_z} \ln n + y_{p_z} \ln S \leq \ln \left[\frac{1000^{z_{p_z}} B H^2 [\sigma_n]}{6 C_{p_z} t^{x_{p_z}} (\pi D)^{z_{p_z}} l_p K_{p_z}} \right], \quad (3.99)$$

$$z_{p_z} \ln n + y_{p_z} \ln S \leq \ln \left[\frac{1000^{z_{p_z}} E_p f_p B H^3}{4 C_{p_z} t^{x_{p_z}} (\pi D)^{z_{p_z}} l_p^3 K_{p_z}} \right], \quad (3.100)$$

$$z_{p_y} \ln n + y_{p_y} \ln S \leq \ln \left[\frac{0,05 \cdot 1000^{z_{p_y}} A f_3 E_3 D^{4-z_{p_y}}}{C_{p_y} t^{x_{p_y}} \pi^{z_{p_y}} L_p^3 K_{p_y}} \right], \quad (3.101)$$

$$z_{p_y} \ln n + y_{p_y} \ln S \leq \ln \left[\frac{0,05 \cdot 1000^{z_{p_y}} A f_3 E_3 D^{4-z_{p_y}}}{C_{p_y} t^{x_{p_y}} \pi^{z_{p_y}} L_p^3 K_{p_y}} \right], \quad (3.102)$$

$$z_{p_z} \ln n + y_{p_z} \ln S \leq \ln \left[\frac{34 \cdot 1000^{z_{p_z}} g^{1,25} \left(\frac{\sin 60^\circ}{\sin \varphi} \right)^{0,8} t^{0,77-x_{p_z}}}{C_{p_z} (\pi D)^{n_{p_z}} K_{p_z}} \right], \quad (3.103)$$

$$z_{p_z} \ln n + y_{p_z} \ln S \leq \ln \left[\frac{1000^{z_{p_z}} Q}{0,4 C_{p_z} t^{x_{p_z}} (\pi D)^{z_{p_z}} K_{p_z}} \right], \quad (3.104)$$

$$\ln S \leq \ln \left(\frac{C_H R_z^y r^u}{t^x \varphi^z \varphi_1^z} \right), \quad (3.105)$$

$$\ln(100S) \geq \ln(100S_{CT \min}), \quad (3.106)$$

$$\ln(100S) \leq \ln(100S_{\text{ст max}}), \quad (3.107)$$

Целевая функция:

$$\ln f = -\ln n - \ln S \quad (3.108)$$

Принимаем $\ln f = X_1$; $\ln S = X_2$; $\ln f = f_0$. Обозначая коэффициенты при X_1 в k -том неравенстве через a_{1k} , коэффициенты при X_2 – через a_{2k} и правые части неравенства – через b_k , получаем математическую модель процесса резания, например, точения, состоящую из линейной целевой функции и системы линейных неравенств

$$\left. \begin{aligned} a_{11}X_1 + a_{21}X_2 &\leq b_1; \\ a_{12}X_1 + a_{22}X_2 &\leq b_2; \\ a_{13}X_1 + a_{23}X_2 &\geq b_3; \\ a_{14}X_1 + a_{24}X_2 &\geq b_4; \\ a_{15}X_1 + a_{25}X_2 &\leq b_5; \\ a_{16}X_1 + a_{26}X_2 &\leq b_6; \\ a_{17}X_1 + a_{27}X_2 &\leq b_7; \\ a_{18}X_1 + a_{28}X_2 &\leq b_8; \\ a_{19}X_1 + a_{29}X_2 &\leq b_9; \\ a_{110}X_1 + a_{210}X_2 &\leq b_{10}; \\ a_{111}X_1 + a_{211}X_2 &\leq b_{11}; \\ a_{112}X_1 + a_{212}X_2 &\geq b_{12}; \\ a_{113}X_1 + a_{213}X_2 &\leq b_{13} \\ \hline f_0 &= (-X_1 - X_2)_{\max} \end{aligned} \right\} \quad (3.109)$$

Определение оптимального режима резания сводится к тому, чтобы среди возможных неотрицательных решений системы (3.109) найти такие X_{1opt} и X_{2opt} , при которых линейная функция принимает наибольшее значение.

Установим геометрический смысл математической модели процесса точения. Для этого введем систему координат X_1OX_2 (рис. 3.90). Каждому линейному неравенству геометрически соответствует прямая линия на плоскости X_1OX_2 . Чтобы не усложнять рисунок, на нем изображены не все линии, соответствующие математической модели.

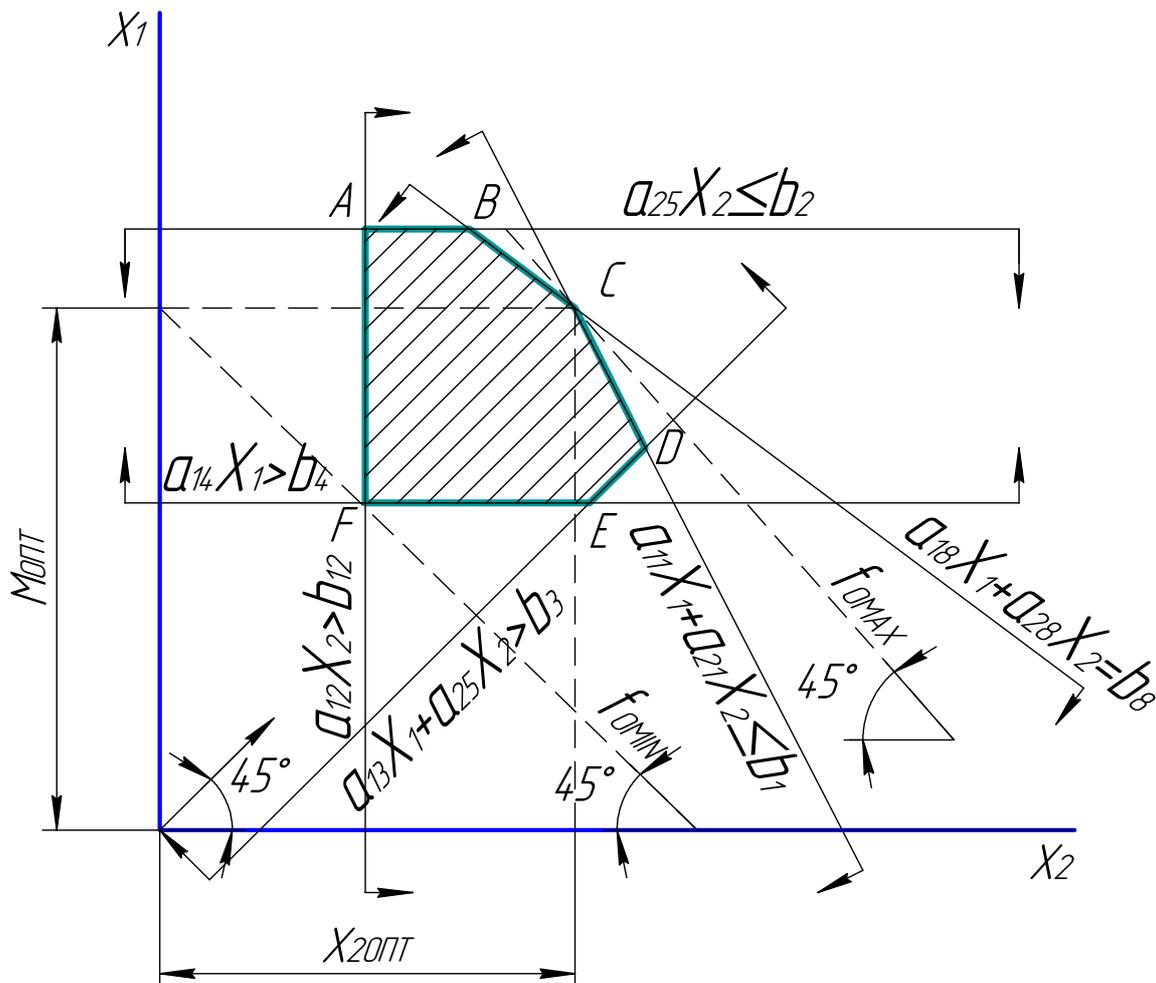


Рис. 3.90. Геометрическая интерпретация модели линейной оптимизации процесса резания

Каждая из прямых делит плоскость X_1OX_2 на две полуплоскости. Координаты точек одной из этих полуплоскостей удовлетворяют соответствующему неравенству, а другой – не удовлетворяют. Следовательно, каждому из неравенств соответствует полуплоскость плоскости X_1OX_2 , отмеченная на рис. 3.90 стрелками. Системе неравенств (3.109) соответствует та часть плоскости X_1OX_2 , которая принадлежит всем указанным полуплоскостям (на рис. 3.90 выделена штриховкой). Эта часть плоскости представляет собой выпуклый замкнутый многоугольник, координаты вершин которого являются корнями совместного решения неравенств системы (3.109).

Зависимость, подлежащая оптимизации, показана прямой линией, расположенной под углом 45° к осям координат.

Линейная функция $f_0 = X_1 + X_2$ будет максимальной в том случае, когда прямая линия, соответствующая ей, займет положение, при котором

расстояние от начала координат по перпендикуляру к ней будет наибольшим. Максимум будет достигнут, когда указанная линия пройдет через точку C многоугольника решений. Координаты этой точки и дадут оптимальные значения X_{1opt} и X_{2opt} .

Найдя координаты X_{1opt} и X_{2opt} , на основании уравнений логарифмирования, определяют оптимальные значения элементов режима резания:

$$\begin{aligned} n_{opt} &= e^{X_{1opt}}; \\ S_{opt} &= e^{X_{2opt}}. \end{aligned} \quad (3.110)$$

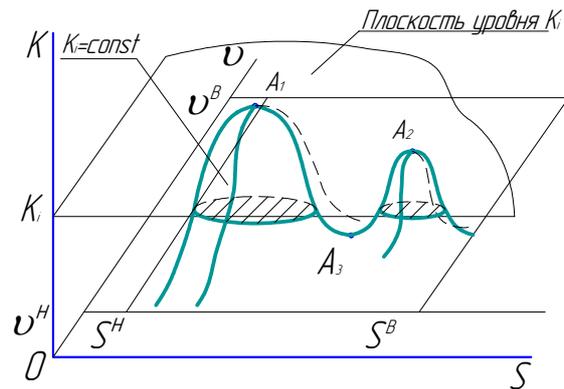
Если система неравенств (3.109) является несовместной, то это означает, что не учтены реальные возможности станка, инструмента и т.п. Для того чтобы привести систему к совместному виду, необходимо осуществить технологические, конструктивные или организационные мероприятия.

3.22.5. Оптимизация режима резания методом нелинейного программирования

Если выбранный критерий и функциональные ограничения нелинейны, то задача определения оптимального режима резания относится к задаче нелинейного программирования. Геометрическая интерпретация данной задачи резко усложняется и не всегда иллюстрирует идею ее решения. Топография критерия оптимальности представляет собой некоторую «местность» с «оврагами» и «возвышенностями» (рис. 3.91, а).

Задача определения оптимального режима резания, например, в случае минимизации критерия $K(S, v)$, состоит в нахождении самой низкой точки (A_3) «местности», ограниченной $\varphi_i \leq 0$ и $S^H < S < S^B$, $v^H < v < v^B$, а в случае максимизации критерия $K(S, v)$ самой высокой точки (A_1). Линии уровня критерия $K(S, v) = \text{const}$ представляют собой пересечение рельефа «местности» с плоскостью уровня K_i (рис. 3.91, б). Решение нелинейной задачи может находиться и внутри допустимой области D , и найти его перебором всех точек, как в случае линейной оптимизации, весьма сложно. Кроме того, поиск оптимального режима резания может быть осложнен наличием локального, или относительного (A_2) и глобального, или абсолютного (A_1) экстремума критерия оптимальности.

а



б

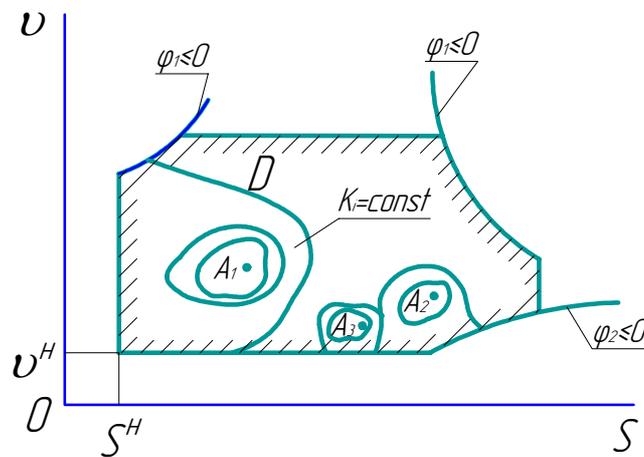


Рис. 3.91. Зависимость критерия оптимальности K от подачи S и скорости резания v (а) и допустимая область D изменения v и S при K_i уровне критерия оптимальности (б)

Методы решения задачи нелинейного программирования многочисленны (метод покоординатного и наискорейшего спуска, случайного поиска и множителей Лагранжа, штрафных функций, линеаризации – преобразования нелинейной задачи в линейную и др.). Численная реализация методов линейного и тем более нелинейного программирования немыслима без применения ЭВМ. Основной фактор выбора метода решения задачи поиска оптимального режима резания в реальном времени, что имеет особую значимость при эксплуатации станков с ЧПУ. Поиск оптимального, как и расчет рационального режима резания, должен выполняться в рамках САПР ТП или АСУ ТП.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Учебное пособие по теории резания включает полный набор методических материалов, как для аудиторных занятий студентов, так и для их самостоятельной работы. В нем изложена методика обучения и сформулированы требования по контролю знаний, умений и навыков студентов. Приведены перечни методических указаний к лабораторным работам, иллюстративных материалов к лекциям, учебников и учебных пособий, плакатов, наглядных пособий и стендов, а также необходимого оборудования и аппаратуры для проведения лабораторных работ на должном техническом уровне. Сформирован перечень понятий по теории резания и сформулированы вопросы для контроля знаний. Разработана тематика научно-исследовательской работы студентов, что придает лабораторным работам и самостоятельным занятиям характер исследований. Приведены формы протоколов по каждой лабораторной работе, которые ориентируют студентов на реализацию теоретических знаний в практических навыках работы на станках, с измерительной аппаратурой и приборами, в умении обрабатывать экспериментальные данные. Имеется электронная версия лекций и иллюстративных материалов, разработан сайт по дисциплине «Теория резания» (www.psu.by), что позволяет строить учебный процесс на современном уровне.

Материалы разделов курса отражают современные представления о резании материалов. От аналогичных публикаций их отличает краткость (конспективность) и четкость изложения, ориентированная на действующие стандарты. С учетом многочисленных дополнительных материалов, учебное пособие развивает стремление студентов к самостоятельной работе, поиску новых технических решений. Раздел кинематики резания ориентирует на создание новых способов формообразования поверхностей деталей, разработку новых конструкций режущих инструментов. Изучение деформационных, динамических и тепловых явлений вооружает студентов методикой расчета геометрических параметров, силы и температуры резания, что необходимо при проектировании технологического оборудования и оснастки. Понимание физики процесса резания способствует разработке предложений по повышению качества обработки, снижению износа инструмента. Причем эти знания представлены как на теоретическом, так и практическом уровнях в виде ознакомления с методикой классического эксперимента и планирования эксперимента, современными способами и устройствами для измерения углов лезвия, сил и температуры резания, износа инструмента.

Изложенные основы по системному подходу к процессу резания, управлению и оптимизации функционирования системы резания, позволяют использовать полученные знания для разработки САПР процесса резания, работы на автоматических линиях, агрегатных станках, станках с ЧПУ и с адаптивными системами управления.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	3
Введение.....	4
1. Методика обучения и контроля уровня знаний, умений и навыков.....	5
1.1. Общие положения.....	5
1.2. Контрольные вопросы.....	6
1.3. Тематика научно-исследовательской работы студентов.....	16
2. Рабочая программа.....	20
2.1. Цели и задачи дисциплины, ее место в учебном процессе.....	20
2.2. Содержание дисциплины.....	21
2.3. Учебно-методические материалы.....	24
2.3.1. Литература.....	24
2.3.2. Наглядные и другие пособия.....	25
2.3.3. Плакаты (слайды).....	26
2.3.4. Методические указания к лабораторным работам.....	27
2.3.5. Формы протоколов по учебно-исследовательским лабораторным работам.....	29
2.3.6. Учебно-методическая карта.....	38
3. Основные разделы курса.....	41
3.1. Теория резания как наука.....	41
3.1.1. Цели и задачи теории резания.....	41
3.1.2. Краткий исторический обзор развития теории и практики резания.....	42
3.2. Кинематика резания.....	46
3.2.1. Общая схема и система резания.....	46
3.2.2. Движение резания и его элементы.....	47
3.2.3. Основные виды обработки резанием, их краткая характеристика.....	53
3.2.4. Кинематические схемы и траектории резания.....	59
3.2.5. Поверхность резания и координатные системы.....	63
3.2.6. Поверхности и геометрические элементы заготовки.....	66
3.3. Режущие инструменты.....	70
3.3.1. Элементы и геометрические параметры режущих инструментов.....	70
3.3.2. Основные случаи изменения углов лезвия.....	72
3.3.3. Расчеты геометрических параметров лезвия инструмента.....	74
3.4. Инструментальные материалы.....	77

3.4.1. Требования, предъявляемые к инструментальным материалам.....	77
3.4.2. Основные разновидности инструментальных материалов.....	79
3.5. Механика стружкообразования.....	84
3.5.1. Пластическое деформирование и стружкообразование при резании, методы их изучения.....	84
3.5.2. Виды стружки.....	85
3.5.3. Механизм образования сливной стружки.....	87
3.5.4. Зона стружкообразования.....	88
3.5.5. Коэффициенты утолщения, укорочения и уширения стружки.....	89
3.5.6. Относительный сдвиг и скорость сдвига.....	92
3.6. Контактные процессы при резании.....	97
3.6.1. Площадки контакта и напряжения в зоне деформации.....	98
3.6.2. Трение на контактных площадках.....	99
3.6.3. Наростообразование при резании.....	100
3.7. Динамика резания.....	103
3.7.1. Сила резания и ее составляющие.....	103
3.7.2. Работа и мощность резания.....	104
3.7.3. Аппаратура для измерения составляющих силы резания.....	105
3.7.4. Аналитическое определение силы резания.....	108
3.7.5. Влияние условий обработки на составляющие силы резания.....	111
3.7.6. Колебания и вибрации в процессе резания.....	113
3.8. Тепловые процессы в технологических системах.....	116
3.8.1. Основные виды теплообмена.....	116
3.8.2. Дифференциальное уравнение теплопроводности.....	120
3.8.3. Схематизация элементов технологической системы.....	122
3.8.4. Методы решения уравнения теплопроводности.....	125
3.9. Теплота и температура при резании.....	131
3.9.1. Тепловой баланс при резании.....	131
3.9.2. Тепловые потоки в зоне резания.....	132
3.9.3. Влияние режима резания и геометрии инструмента на температуру резания.....	134
3.9.4. Управление тепловыми явлениями при резании.....	136
3.10. Методы экспериментального определения теплоты и температуры в элементах технологической системы.....	139
3.10.1. Контактные методы.....	139

3.10.2 Бесконтактные методы	145
3.11. Температурные деформации элементов технологической системы	146
3.11.1. Температурные деформации элементов технологической системы	146
3.11.2. Температурные деформации заготовок	148
3.11.3. Температурные деформации инструмента	149
3.12. Изнашивание и износ режущего инструмента	149
3.12.1. Виды изнашивания инструмента	149
3.12.2. Характер износа различных инструментов	153
3.13. Работоспособное состояние режущего инструмента	155
3.13.1. Предельное состояние инструмента	155
3.13.2. Влияние на стойкость инструмента режима резания и геометрии инструмента	156
3.13.3. Разрушение инструмента как результат образования и развития трещин	160
3.14. Качество обработанной поверхности детали	161
3.14.1. Характеристики качества поверхности детали	161
3.14.2. Влияние на шероховатость поверхности режима резания и геометрических параметров инструмента	162
3.14.3. Влияние условий обработки на физико-механические свойства поверхности слоя детали	165
3.15. Абразивная обработка	166
3.15.1. Особенности абразивной обработки	166
3.15.2. Основные направления совершенствования процесса шлифования	170
3.16. Особенности обработки материалов со специфическими свойствами	171
3.16.1. Особенности резания жаропрочных и нержавеющей сталей и сплавов	172
3.16.2. Особенности обработки титановых сплавов	173
3.16.3. Обрабатываемость чугунов	173
3.16.4. Обрабатываемость алюминиевых сплавов	174
3.16.5. Особенности обработки медных сплавов	174
3.16.6. Особенности обработки порошковых материалов и покрытий	175
3.16.7. Особенности обработки композиционных полимерных материалов и пластмасс	176

3.16.8. Особенности обработки углеграфитовых материалов.....	177
3.17. Система резания	177
3.17.1. Обработка резанием как система	177
3.17.2. Взаимосвязь явлений при обработке резанием.....	181
3.18. Резание с применением смазочно-охлаждающих средств	192
3.18.1. Разновидности смазочно-охлаждающих средств	192
3.18.2. Смазочно-охлаждающие жидкости и способы их подачи в зону резания	193
3.19. Комбинированная обработка резанием	197
3.19.1. Виды комбинированной обработки и их характеристики	197
3.20. Оптимизация функционирования системы резания.....	201
3.20.1. Общие представления об оптимизации	201
3.20.2. Оптимизация резания по критерию обрабатываемости.....	203
3.21. Постановка эксперимента при резании материалов.....	205
3.21.1. Классическая методика эксперимента при резании	205
3.21.2. Планирование экспериментов при резании.....	207
3.22. Определение рационального режима резания	210
3.22.1. Расчет режима резания при точении.....	211
3.22.2. Особенности расчета режима резания при многоинструментальной обработке	216
3.22.3. Особенности расчета режима резания при обработке на агрегатных станках и автоматических линиях.....	217
3.22.4. Оптимизация режима резания методом линейного программирования	217
3.22.5. Оптимизация режима резания методом нелинейного программирования	221
Заключение	223

Учебное издание

ПОПОК Николай Николаевич

ТЕОРИЯ РЕЗАНИЯ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Редактор *Ю.М. Казакевич*

Дизайн обложки *И.С. Васильевой*

Подписано в печать 13.07.06. Формат 60×84 1/16. Гарнитура Таймс. Бумага офсетная.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. 12,99. Уч.-изд. л. 11,96. Тираж 100 экз. Заказ 945

Издатель и полиграфическое исполнение:
Учреждение образования «Полоцкий государственный университет»

ЛИ 02330/0133020 от 30.04.04 ЛП № 02330/0133128 от 27.05.04

211440, г. Новополоцк, ул. Блохина, 29