Э. М. Дечко М. М. Дечко

РЕЗАНИЕ МЕТАЛЛОВ И РЕЖУЩИЙ ИНСТРУМЕНТ

Для студентов учреждений высшего образования

Э.М. Дечко М.М. Дечко

РЕЗАНИЕ МЕТАЛЛОВ И РЕЖУЩИЙ ИНСТРУМЕНТ

Допущено
Министерством образования Республики Беларусь
в качестве учебного пособия
для студентов учреждений высшего образования по специальностям
«Технология машиностроения»,
«Технологическое оборудование машиностроительного производства»

Минск
«Вышэйшая школа»
2020

УДК [621.91+621.9.06-05](075.8)
ББК 34.63я73
Д39

Р е ц е н з е н т ы: кафедра «Технология машиностроения» межгосударственного образования учреждения высшего образования «Белорусско-Российский университет» (проректор по научной работе доктор технических наук, профессор *В.М. Пашкевич*); главный научный сотрудник лаборатории металлургии в машиностроении ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси» доктор технических наук, доцент *В.Е. Антонюк*

Дечко, Э. М.

Д39 Резание металлов и режущий инструмент : учебное пособие / Э. М. Дечко, М. М. Дечко. Минск : Вышэйшая школа, 2020. – 287 с. : ил.

ISBN 978-985-06-3268-5.

Представлены материалы по современным тенденциям в области обработки металлов резанием, конструкциям и системам режущих инстументов, интенсификации процессов резания, отражен опыт ведущих зарубежных фирм, представлены результаты компьютерного моделирования нагрузок в режущей и крепежной частях сверл, фрез и ленточных пил в процессе механической обработки.

Для студентов, магистрантов и аспирантов учреждений высшего образования машиностроительного профиля.

УДК [621.91+621.9.06-05](075.8)
ББК 34.63я73

Все права на данное издание защищены. Воспроизведение всей книги или любой ее части не может быть осуществлено без разрешения издательства.

ISBN 978-985-06-3268-5

©Дечко Э.М., Дечко М.М., 2020
© Оформление. УП «Издательство "Вышэйшая школа"», 2020

Условные обозначения

АСИ – автоматизированная смена инструментов
ВК – однокарбидный сплав
ЗК – зубчатое колесо
КНБ – кристаллический нитрид бора
МНП – многокромочная неперетачиваемая пластина
ПКНБ – поликристаллический нитрид бора
ПЛК (PLC) – программированный логический контроллер
РТК – робототехнические комплексы
СМП – сменная металлокерамическая пластинка
СОЖ – смазочно-охлаждающая жидкость
СОС – смазочно-охлаждающая среда
СОТС – смазочно-охлаждающая технологическая смазка
СПИД – Станок – Приспособление – Инструмент – Деталь
СТМ – сверхтвердый материал
ТК – двухкарбидный сплав
ТН – безвольфрамовый сплав
ТПС – технологическая подсиситема
ТП – технологический процесс
ТС – технологическая система
ТТК – трехкарбидный сплав
ЧПУ – числовое программное управление
ЧМФ – червячно-модульная фреза
ЭВМ – электронно-вычислительная машина
HSM – высокоскоростная обработка

Введение

Обработка металлов резанием является наиболее распространенным завершающим технологическим процессом, обеспечивающим получение деталей необходимых форм, размеров и оказывающим влияние на эксплуатационные свойства машин и механизмов. В процессе механической обработки в поверхностях деталей наблюдаются изменения качества поверхностного слоя, характеризуемого шероховатостью, наклепом, напряжениями, изменением структуры металлов и другими показателями. Эти изменения предопределяют выбор последующих операций обработки и в конечном счете сказываются на точности размеров, надежности и долговечности изделий.

Изучение дисциплины «Теория резания материалов» («Обработка материалов резанием»), как правило, начинается на 3-м курсе. На первых курсах студенты изучают дисциплины «Механика материалов», «Технология конструкционных материалов», «Детали машин», «Материаловедение» и др.

Традиционно изложение дисциплины «Теория резания материалов» («Обработка материалов резанием»), согласно учебным программам и планам, начинается с напоминания основных видов обработки материалов резанием, геометрических и конструктивных параметров инструментов, сечений среза, сочетаний движений детали и инструмента. Далее рассматриваются инструментальные материалы, стружкообразование, силы резания, тепловые процессы, изнашивание инструментов и их стойкость, обрабатываемость различных материалов, рациональные режимы резания и их оптимизация, особенности работы на станках с ЧПУ, современные тенденции в развитии процессов резания и др.

В результате изучения дисциплины «Теория резания материалов» предусматривается освоение методик выбора режущего инструмента и расчета режимов резания для различных видов обработки на основе справочно-нормативной базы, зарубежных каталогов, использования вычислительной техники для оптимизации процессов обработки. Накопленный опыт в области обработки металлов резанием позволяет использовать системный подход при преподавании данной дисциплины с учетом взаимосвязанных факторов, сопутствующих этому процессу.

Раздел 1
РЕЗАНИЕ МЕТАЛЛОВ

Глава 1. **Тенденции развития металлообработки и станкостроения**

1.1. Тенденции развития металлообработки

Исходя из анализа технической литературы в области металлообработки, технической литературы, экспозиций и каталогов международных выставок в 2010–2019 гг. в Германии, Польше, России, Беларуси, можно отметить следующие тенденции развития металлообработки.

1. Разрабатываются новые материалы для режущих инструментов со специальными свойствами, влияющими на формирование изделий с учетом качества поверхностей деталей после обработки: высокая прочность; низкая или высокая теплопроводность; сложные микроструктуры поверхностных и внутренних слоев; устойчивость к резким температурным перепадам, переменным нагрузкам и др.

2. Некоторые обрабатываемые материалы имеет низкую обрабатываемость резанием по уровням допускаемых скоростей резания, качеству поверхности, силам и температурам резания, истирающему воздействию на инструмент.

3. Наблюдается усложнение форм обрабатываемых поверхностей заготовок и повышение требований к их качеству, к точности размеров деталей до 0,002–0,003 мм.

4. Разрабатываются многослойные и наноизносостойкие покрытия для режущих инструментов; специальные технологии обработки покрытий и изменений структур основы; покрытия, обеспечивающие обработку заготовок без смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ).

5. Совершенствуются формы как передних, так и опорных поверхностей сменных режущих пластин с учетом обеспечения дробления стружки, жесткости, точности их позиционирования, затрат времени на их замену.

6. Предлагаются практически все группы инструментов с внутренним подводом СОЖ, направленных непосредственно в зону резания под высоким давлением.

7. Расширяется использование комбинированных инструментов на станках с числовым программым управлением (ЧПУ), предлагаются специальные модульные инструментальные системы для типовых деталей (шатуны, валы, корпуса и др.), имеющих сложные формы поверхностей заготовок, и т.п.

8. Осуществляются оптимизация процессов обработки и компьютеризация организации производства, сокращение сроков подготовки производства, проектирования инструментальной оснастки и технологических процессов.

9. Ведущие фирмы – производители режущего инструмента публикуют в каталогах справочные материалы по режимам резания для сталей, чугунов, цветных металлов, титана и их сплавов и др.

10. Происходят специализация производств, переделы рынка, размещение производств в иных странах.

1.2. Тенденции развития станкостроения и ведущие мировые фирмы по производству станков и металлорежущего инструмента

Исходя из анализа литературы по вопросам стойкостроения, можно отметить следующие тенденции развития станкостроения.

1. Разрабатываются многоцелевые высокоскоростные многокоординатные станки, обрабатывающие центры, станки с термозащитными рабочими зонами, с частотой вращения шпинделей до 10 000–100 000 об/мин.

2. Наблюдается дальнейшее увеличение уровня скоростей резания, в первую очередь на операциях точения, фрезерования, сверления, на заготовительных операциях.

3. Предлагаются расчеты режимов резания на электронно-вычислительных машинах (ЭВМ) по программам фирм – производителей режущих инструментов.

4. Сокращается вспомогательное время: скорость перемещений – 45–100 м/мин, смена инструментов – за 0,1 с.

5. Увеличивается количество инструментов в магазинах, паллетах, а также их вынос за пределы станины.

6. Повышаются точность обработки, производительность и надежность процесса обработки.

7. Предусматривается защита узлов станков от продуктов резания, температурных перепадов и пыли в цеху.

8. Возрастает внимание к технике безопасности и экологии, в том числе защита оборудования и др.

Все это в свою очередь требует особых условий в цехах (термо- и теплозащита); качественных материалов заготовок; высокоточного и быстродействующего вспомогательного, режущего инструмента и инструментальных систем; разработки соответствующих современных технологий; создания сервисных служб и др. Должен быть комплексный подход к решению этих задач. В настоящее время практически в большинстве конструкций режущих инструментов используются твердые сплавы и износостойкие покрытия.

Основные задачи в металлообработке в условиях глобализации, возрастающей конкуренции, специализации предприятий, борьбы технологий, непрерывного обновления и совершенствования продукции – обеспечение ка-

чества обработки (размеры и состояние поверхности), заданной производительности, минимизация производственных затрат.

Таким образом, имеем цепочку «технология – оборудование – качество – цена». Термин «цена – качество» вообще стал общепринятым. Все это неразрывно связано с оптимизацией процессов резания и технологического процесса в целом, с обеспечением надежности многообразных групп режущих инструментов и управлением процессами обработки по определенным критериям.

Производители станков, например в Японии, утверждают, что они повысили «уровень интеллекта» станков. Фирма OKUMA внедрила в станках ряд новшеств:

• систему *предупреждения столкновений* движущихся частей станков – Anti-kollision, обеспечивающую безопасную работу на высоких скоростях и сокращающую время обработки;

• систему *компенсации температурных деформаций станка* для высокоточной обработки, что сохраняет точностные характеристики деталей даже при работе оборудования без предварительного прогрева зоны резания и в цехах без специальной системы кондиционирования воздуха;

• систему Machining Navi, позволяющую определять *оптимальные условия резания для высокоэффективной обработки*;

• систему *предотвращения перегрузки* станков – Collision Avoidence Sistem для обеспечения безопасности работы на высоких скоростях и сокращения время обработки.

Фирма MAKINO использует инновационные технологии производства высокоскоростных шпинделей, управление перемещением и регулированием температурных режимов. Отрасли применения: космическая промышленность, автомобилестроение, энергетика. Общая задача – рост производительности при снижении расходов.

На рис. 1.1 показан станок фирмы MORISEIKI – MH 503 (обороты шпинделя – 6000 об/мин; емкость магазина – до 240 инструментов).

На рис. 1.2. показан многоцелевой горизонтальный обрабатывающий центр с боковым устройством смены инструментов фирмы HAAS.

Токарный обрабатывающий центр с ЧПУ фирмы DIAMOND 20/32 показан на рис. 1.3. В магазине центра 25 инструментов, скорость перемещений – 18 м/мин; мощность двигателя – 5,5 кВт; обороты шпинделя – 8000 об/мин; расход воздуха – 10 л/мин, давление – 5 кг. Количество инструментов в главном шпинделе: пять инструментов для наружной обработки; четыре неподвижных инструмента для внутренней обработки; шесть поперечных приводных инструментов; три фронтальных приводных инструмента; четыре неподвижных инструмента в противошпинделе для внутренней обработки; три приводных инструмента в противошпинделе для обработки с обратной стороны.

Большинство многоцелевых станков оснащаются одной или двумя револьверными головками, работающими по принципу обычного токарного

а *б*

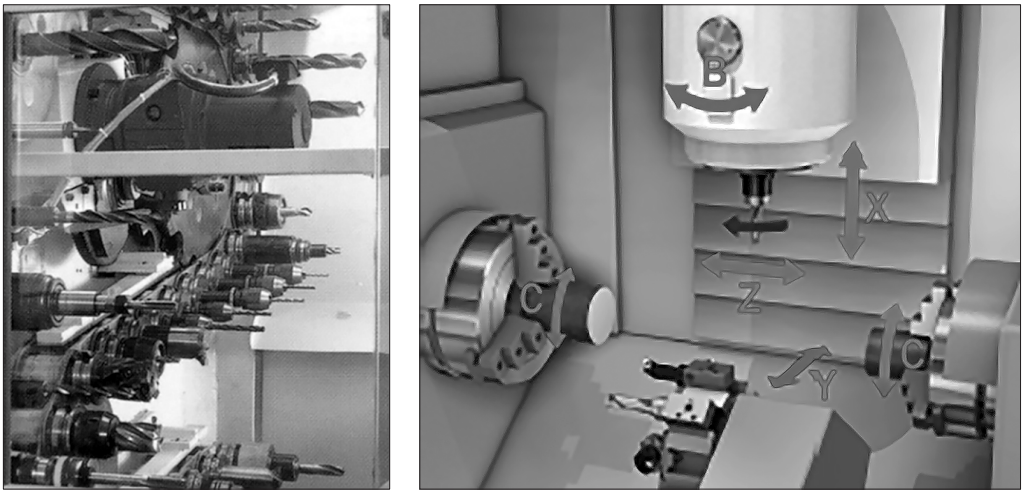


Рис. 1.1. Станок МН 503:
а – установка и снятие инструментов с помощью двухпозиционной системы паллет; *б* – движения шпинделей и револьверной головки

а *б*

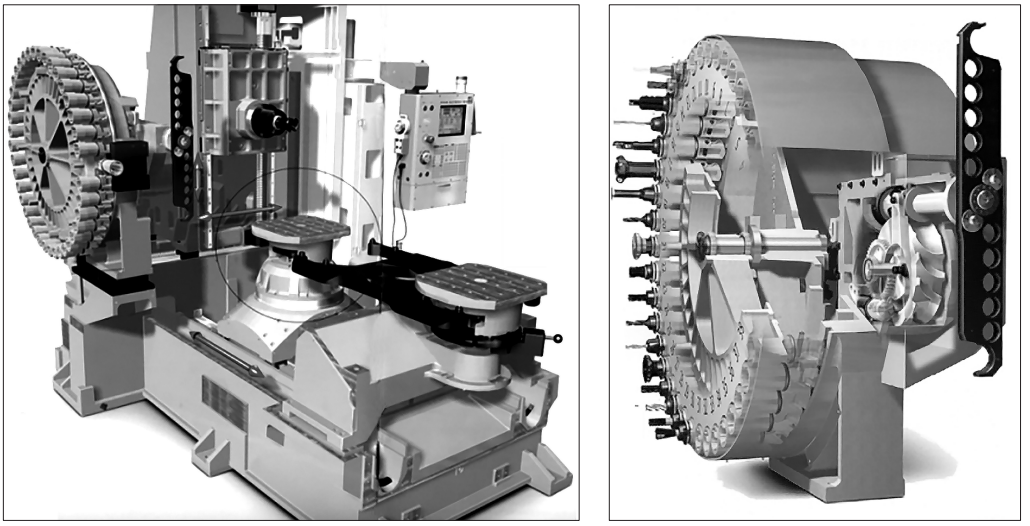


Рис. 1.2. Многоцелевой горизонтальный обрабатывающий центр с боковым устройством смены инструментов, обеспечивающим фрезерование, сверление, нарезание резьбы и другие операции за один установ с пяти сторон:
а – общий вид станка с системами электронной тепловой компенсации для шариковых винтовых пар; *б* – устройство бокового исполнения смены инструмента емкостью 40–70 гнезд

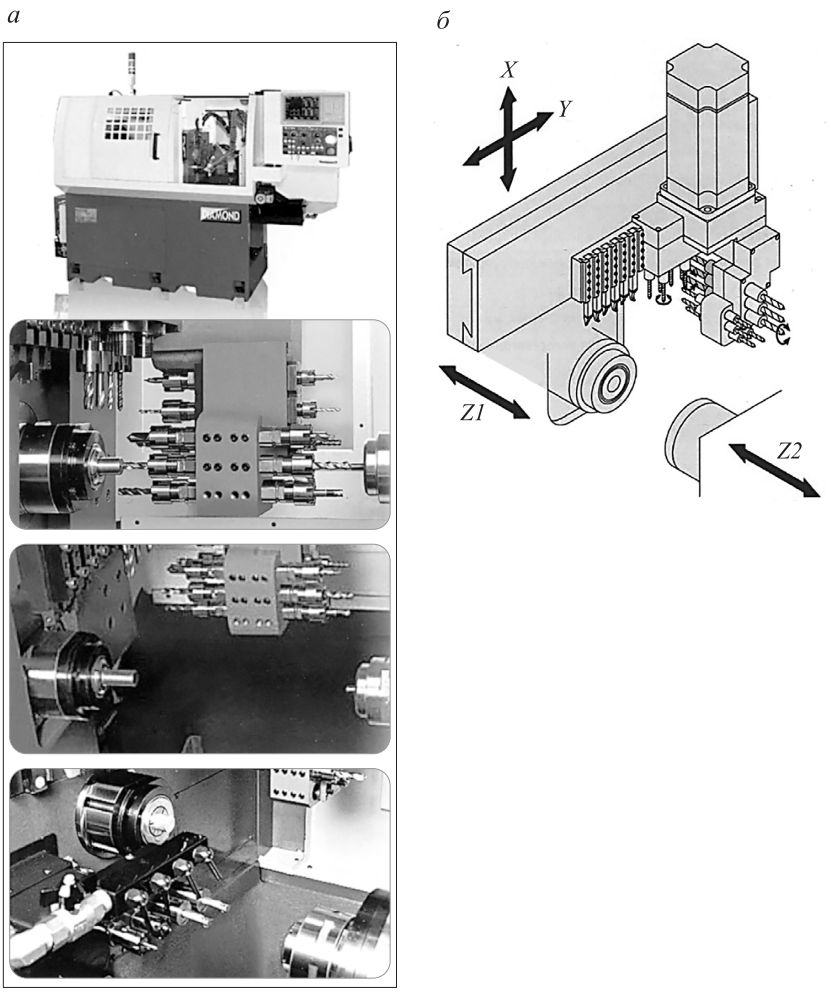


Рис. 1.3. Токарный обрабатывающий центр с ЧПУ 20/32

центра; инструментальным шпинделем; шпинделем, в котором можно использовать вращающийся инструмент и применять который можно для выполнения токарных операций.

Автоматическая смена инструмента и возможность наклона шпинделя вокруг оси предъявляют к токарному инструменту следующие требования:

- один инструмент для работы при различных подводах и траекториях;
- специализированный инструмент для установки в инструментальный шпиндель, развернутый под углом 45°;
- достаточный вылет и геометрическая проходимость инструмента;
- быстрая и согласованная смена инструмента;
- экономия пространства инструментального магазина.

К ведущим странам – производителям металлорежущих станков на мировом рынке относятся Германия, Италия, США, Япония, Китай, Тайвань

и страны бывшей Югославии. Среди потребителей металлорежущего оборудования на первых местах находятся Китай, Япония, Германия, США, Швейцария.

По данным фирмы ISCAR, Китай, Япония, Германия, США, Италия, Южная Корея, Тайвань более 10 лет назад потребляли 68% мирового выпуска станков.

1.3. Классификация обрабатывающего оборудования

Современное обрабатывающее оборудование подразделяется на три класса (рис. 1.4):

- 1-й класс – станки с ЧПУ, самый многочисленный и представительный класс;
- 2-й класс – производственные комплексы на базе программируемых логических контроллеров (PLC – ПЛК);
- 3-й класс – робототехнические комплексы (РТК), выполненные на базе промышленных роботов.

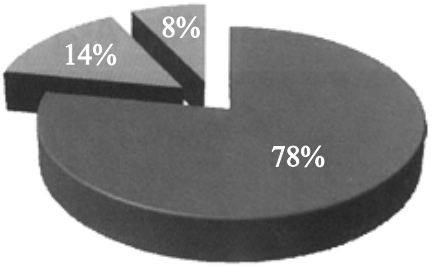


Рис. 1.4. Состав мирового рынка обрабатывающего оборудования:
78% – станки с ЧПУ; 14% – производственные комплексы на базе програмируемых логических контроллеров; 8% – промышленные роботы

Технические характеристики современных промышленных роботов достигли таких значений, что это позволяет использовать их на технологических операциях, ранее выполняемых на станках с ЧПУ.

Компания KUKA ROBOTIKS первая среди производителей промышленных роботов стала развивать свою концепцию их применения в приложениях, традиционно считавшихся прерогативой станочного оборудования с ЧПУ. Обрабатывающие центры, разработанные на базе роботов, используются в различных отраслях промышленности: в аэрокосмической (сверление, обрезка, клепка, укладка слоев ленточных материалов); в металлообработке (точение, фрезерование, сверление, пиление); в литейном производстве (обрезка литников и прибылей, фрезерование, снятие заусенцев); в моделировании (фрезерование, сверление); деревообработке; обработке камня и др.

Существенное отличие систем управления РТК заключается в том, что они «понимают» привычные для программистов станков с ЧПУ CNC-коды.

В противоположность станкам с ЧПУ использование роботов обеспечивает дополнительные преимущества:

• робот «становится» станком с ЧПУ (полный набор команд DINISOCode, G-CODE; стандартные, дополнительные функции и команды);

• огромная рабочая зона, высокая степень свободы, гибкость в установке, малые габариты, дешевизна по сравнению со станком;

• удобство использования: прямой интерфейс с CAD/CAM системами, выполнение G-кодов, копирование программ;

• высокая точность: контроллер считывает большое количество точек вперед, сплайн-интерполяция, различные компенсационные модули.

Глава 2. **Технологические системы и схемы резания**

2.1. Технологические системы

Обработка материалов неразрывно связана с оптимизацией процессов резания и технологического процесса в целом, с обеспечением надежности режущего инструмента и управлением процессами обработки по определенным критериям. Технологические системы (ТС) – это совокупность функционально взаимосвязанных средств оснащения, предметов производства и исполнителей, предназначенных для выполнения в регламентированных условиях производства заданных технологических процессов или операций (ГОСТ 27.004–85).

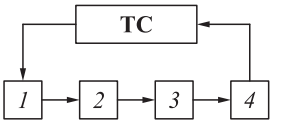


Рис. 2.1. Схема технологической системы:
1 – предмет производства; *2* – исполнитель; *3* – оснащение, оборудование; *4* – технология для выполнения технологических операций

Вид ТС определяется в первую очередь предметом производства (рис. 2.1). Все системы обладают общими признаками:

• система функционирует только при подведении к ней одного или нескольких видов энергии;

• функционирующая система может подразделяться на подсистемы, которые функционируют параллельно или последовательно;

• технологические системы содержат как минимум четыре основных компонента, связанных между собой.

При анализе тепловых явлений в процессе обработки системы подразделяют на технологические подсистемы (ТПС) трех уровней.

Технологическая подсистема первого уровня ТПС-1 – предусматривает получение на заготовке или детали отдельных поверхностей или изменение свойств обрабатываемого материала (рис. 2.2).

Компоненты технологической системы ТПС-1: обрабатываемая деталь или материал; оборудование; инструмент; средство контроля и управления;

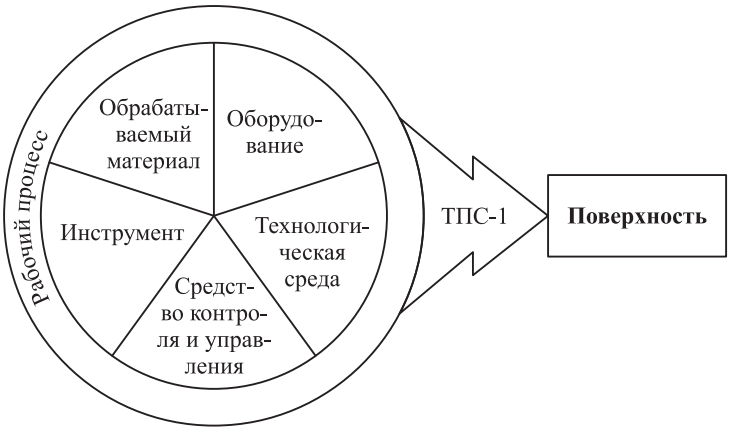


Рис. 2.2. Технологическая подсистема первого уровня ТПС-1

технологическая среда. Все объединяется рабочим процессом и обеспечивает получение поверхности детали.

Технологическая подсистема второго уровня ТПС-2 – объединение ТПС-1 в одну или несколько операций или технологическую линию (рис. 2.3). Технологическая подсистема ТПС-2, включающая ТПС-1.1, ТПС-1.2, ТПС-1.3, ТПС-1.4, ТПС-1.5, обеспечивает получение детали машины, но при этом предусматривается, что другие виды обработки, кроме осуществляемых с помощью объединенных ТПС-1, для получения готовых деталей не требуется.

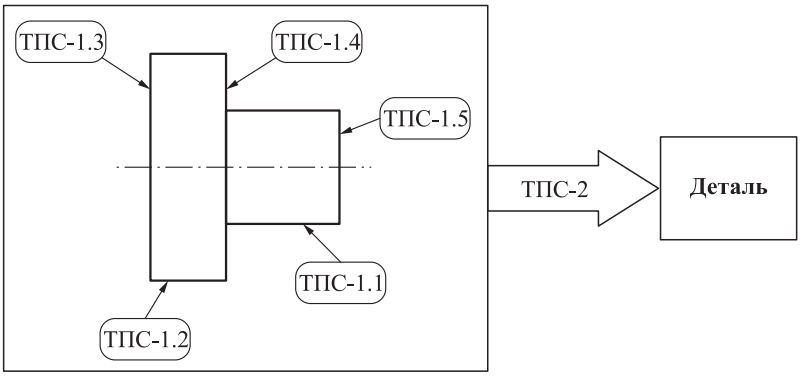


Рис. 2.3. Технологическая подсистема второго уровня ТПС-2

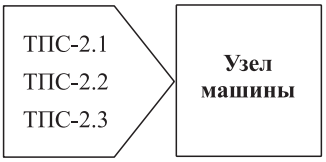


Рис. 2.4. Технологическая подсистема третьего уровня ТПС-3

Технологическая подсистема третьего уровня ТПС-3 – объединение нескольких подсистем второго уровня (ТПС-2.1, ТПС-2.2, ТПС-2.3) при той или иной организации процессов сборки, сварки или других способов соединения деталей. Данная подсистема обеспечивает получение узла машины (рис. 2.4).

Объединение нескольких ТПС-3 с помощью соответствующих процессов, контроля и управления образует технологическую систему ТС-4, результатом функционирования которой является изделие или машина.

Следует отметить, что основная часть тепловых процессов происходит в подсистемах первого и второго уровня. Именно здесь осуществляется изменение форм и свойств заготовки с целью ее превращения в деталь. В настоящее время наряду с традиционно используемыми видами энергии – механической, тепловой, электрической, химической – все большее применение в технологических системах находят энергия плазмы, лазера, заряженных частиц, атомная и др.

Теплота, внесенная внешними или внутренними источниками, распределяется между всеми компонентами ТПС. Теплообмен между компонентами подсистем осуществляется такими способами, как теплопроводность, конвекция излучением. Возможна комбинация этих способов.

Технологические системы, обеспечивающие получение детали машины, классифицируются по видам способами воздействия (рис. 2.5).

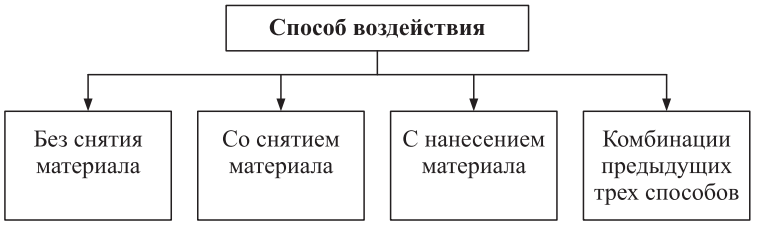


Рис. 2.5. Классификация ТС способами воздействия

Классификация способов воздействия:

1) без снятия материала:
   а) холодное пластическое деформирование;
   б) горячее пластическое деформирование;
   в) пластическое деформирование в состоянии сверхпластичности;
   г) комбинация способов а–в и др.;
2) со снятием материала:
   а) резание лезвийным инструментом;
   б) резание абразивным инструментом;
   в) разрушение;
   г) оплавление;
   д) сочетание способов а–г;
3) с нанесением материала:
   а) напыление;
   б) наплавление;
   в) гальванизация;
   г) химическое осаждение;
   д) физико-химическое осаждение;
   е) другие способы;
4) комбинация способов 1–3.

Метод обработки характеризует процесс формирования параметров качества, каждый из которых зависит от ряда технологических факторов, подразделяющихся на пять групп:

- факторы, обусловленные принятым способом воздействия на обрабатываемый материал;
- кинематические факторы;
- факторы, связанные с применяемым инструментом;
- динамические факторы;
- статические факторы.

Понятие «способ воздействия» отличается от понятия «процесс обработки».

Процесс обработки включает одновременно вид воздействия на материал и определенные кинематические характеристики (траектория, направление движения, скорость относительного движения инструмента по обрабатываемой поверхности).

Отличие способа воздействия от процесса обработки состоит в том, что под способом воздействия понимают физические, механические, химические и другие способы воздействия на обрабатываемый материал изолировано от инструмента, кинематики, динамических и статических характеристик метода обработки.

Сущность способа воздействия характеризуется законами и закономерностями различных процессов и явлений, которые используются в качестве средства воздействия на обрабатываемый материал**.** Таким образом, устанавливается связь между фундаментальными науками и основами технологии машиностроения. При этом необходимо учитывать физико-механические свойства обрабатываемого материала при различных видах его состояния.

Способ воздействия определяет производительность и качество обработки. Производительность может характеризоваться съемом металла в единицу времени, скоростью перемещаемого металла, скоростью наносимого металла в единицу времени и др.

2.2. Схемы и системы резания

Описание схем и систем резания отражено в работах Н.Н. Зорева, М.И. Клушина, В.Н. Подураева, В.Ф. Боброва и др.

Известны различные подходы к описанию схем резания. Профессором Г.И. Грановским, например, предложены 282 кинематические схемы резания, которые не только отражают различные методы обработки металлов резанием, но и дают возможность разрабатывать новые процессы механической обработки. Академиком АН Беларуси Е.Г. Коноваловым описана универсальная схема, которая включает элементарные кинематические схемы, где обрабатываемая деталь и режущий инструмент каждый в своей системе координат имеют три вращательных и три поступательных движения. В дальнейшем принцип комбинирования кинематических схем положен в основу разработки новых способов металлообработки. Известны типовые математические модели и алгоритмы расчета оптимальных режимов для одноинструментной обработки материалов резанием.

В структурных схемах, системах и моделях процесса резания описывается многообразие связей между отдельными элементами. Эти связи могут дополнять или ослаблять друг друга, а сама связь может быть косвенной или непосредственной. Процесс резания сопровождается упругими и пластическими деформациями обрабатываемого материала, разрушениями в зоне резания, трением в зонах контакта инструмента с изделием и стружкой, адгезионным, абразивным, диффузионным и другими видами взаимодействия между инструментом и обрабатываемым материалом.

При переходе от элементарной системы к системе более высокого уровня возможен переход к системам управления процессами резания. При этом необходимо учитывать следующее:

- наличие причинно-следственных связей между элементами системы, причем обратная связь является одним из важнейших условий управления;
- динамичность системы, предусматривающая возможность перехода из первоначального состояния в иное;
- наличие управляемых и управляющего блоков;
- наличие элемента, усиливающего управляющее воздействие, а также возможность передачи, накопления и преобразования управляющей информации.

Целостность системы – это не набор отдельных элементов, а их тесная взаимосвязь. С позиции системного подхода при исследовании обработки материалов резанием характеристики системы можно представить следующим образом:

- наличие в блоках и элементах свойств, образующих единое целое в отдельности;
- представление в количественной форме процессов, происходящих внутри блоков и отдельных элементов, входящих в них;
- представление конечного результата в виде результата взаимосвязи процессов, взаимозависимостей и их взаимного влияния;
- представление системы в виде отдельных взаимосвязей блоков и возможность конкретного описания, оценки каждого блока и отдельных элементов, влияющих на конечный результат;
- возможность целенаправленного воздействия, регулирования, управления как отдельным элементом, так и всей системой для получения конкретного результата обработки.

2.2.1. Схема взаимодействия процессов при прямоугольном свободном резании

Профессор Н.Н. Зорев разработал схему взаимодействия основных факторов, сопровождающих процесс прямоугольного свободного резания, в которой были приняты следующие допущения: сдвиговые деформации сконцентрированы вдоль условной плоскости сдвига; процесс резания осуществляется без нароста; опущены некоторые второстепенные факторы, сопутствующие процессу резания (рис. 2.6).

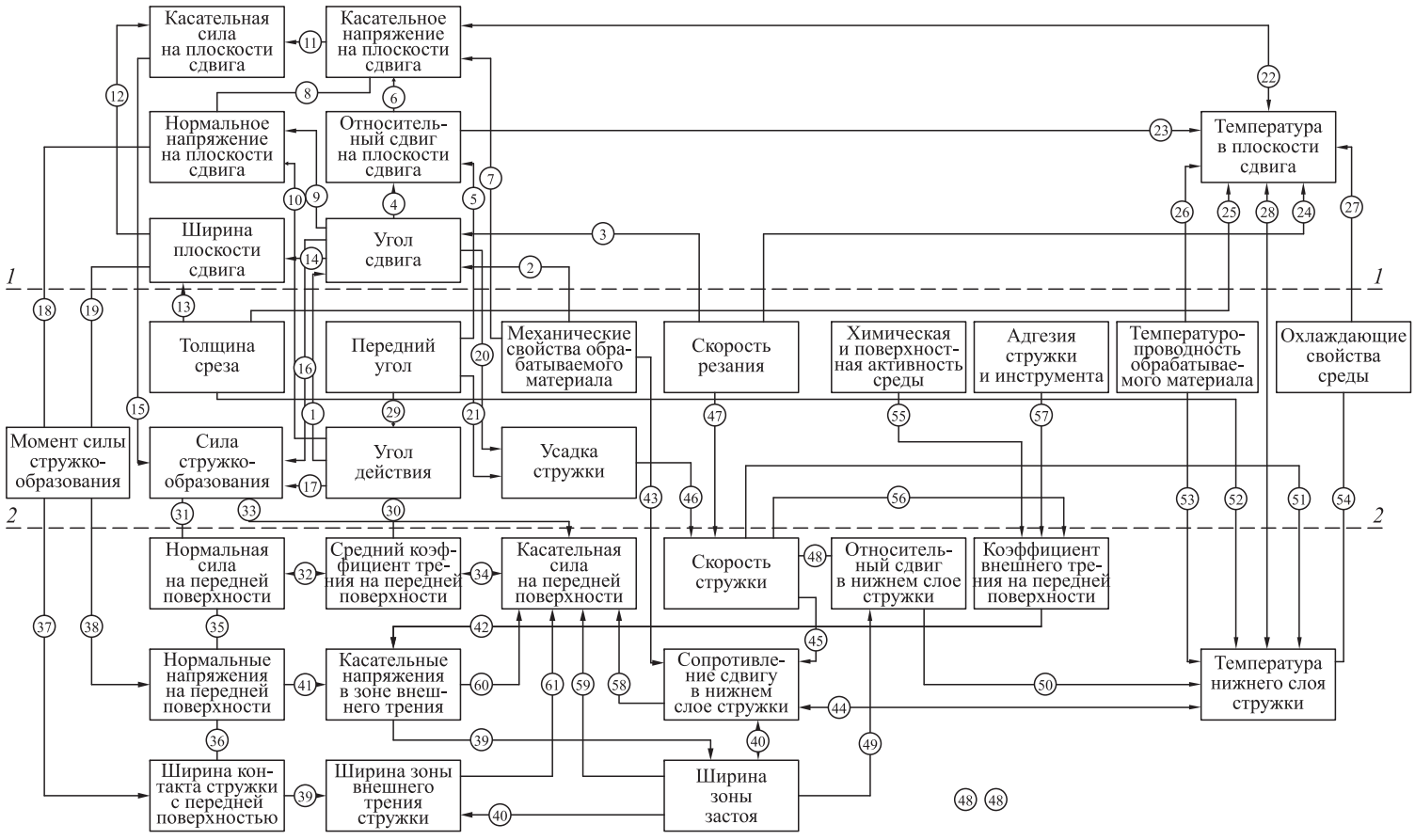


Рис. 2.6. Схема взаимодействия основных факторов в процессе прямоугольного свободного резания (описание дано в тексте)

На процессы стружкообразования наибольшее внешнее воздействие оказывают четыре фактора: передний угол, угол действия, скорость резания, свойства обрабатываемого материала.

Отмечается как непосредственное, так и косвенное влияние этих факторов на процесс резания. Косвенное влияние может осуществляться несколькими промежуточными факторами и сразу несколькими путями.

Все учтенные факторы сгруппированы по определенным признакам. На схеме, приведенной на рис. 2.6, над пунктирной линией *1–1* представлены зависимые факторы, тесно связанные с процессами в зоне стружкообразования. Ниже пунктирной линии *2–2* находятся зависимые факторы, связанные с процессами на передней поверхности инструмента.

Между линиями *1–1* и *2–2* в верхнем ряду расположены независимые факторы, каждый из которых может изменяться независимо друг от друга. Между линиями *1–1* и *2–2* в нижнем ряду расположены зависимые факторы, определяющие взаимодействие между процессами в зоне стружкообразования и на передней поверхности. Связи между отдельными факторами, обозначенными в прямоугольниках, отмечены соединительными линиями с соответствующими цифрами. На схеме отмечается как непосредственное, так и косвенное влияние этих факторов на процесс резания. Косвенное влияние может осуществляться несколькими промежуточными факторами и сразу несколькими путями.

Выполнена группировка факторов, их взаимодействие и взаимовлияние в зоне стружкообразования, отмечены процессы в области передней поверхности инструмента. Далее следуют факторы, определяющие взаимодействие между процессами в зоне резания и на передней поверхности, и рассматриваются независимые факторы, признаками которых служит то, что они могут изменяться независимо друг от друга.

Указывая на сложность и взаимовлияние многообразных связей при резании, их взаимосвязь и взаимообусловленность, Н.Н. Зорев предостерегает от попыток сведения роли многочисленных процессов к одному универсальному фактору и подчеркивает необходимость такого методического проведения исследований, которое учитывает действие многих факторов, позволяет выделять группу основных и максимально приближает к сущности происходящего явления.

2.2.2. Единая система резания

Профессором М.И. Клушиным предложена единая система резания металлов, которая учитывает взаимосвязанность и одновременное взаимодействие упругих и пластических деформаций срезаемого слоя металла, обрабатываемой поверхности, износа режущего инструмента и др.

Система включает ряд элементов, имеющих различную природу, которые сами могут рассматриваться как отдельные процессы. Поэтому весьма трудно создание достаточно содержательных моделей процессов деформации и разрушения тел при обработке их резанием.

При всестороннем анализе исследуемого объекта необходимо учитывать одновременно протекающие механические, физические, химические, физико-механические и прочие явления и процессы. В связи с этим целесообразно рассматривать полную математическую модель как состоящую из отдельных блоков, которые могут быть самостоятельными объектами исследований. Исследование физической сущности протекающих процессов во взаимосвязи с другими блоками приближают нас к познанию процесса во всем многообразии его проявлений. Путь познания систем – это нормированное изменение внешних воздействий на нее на входе и изучение ее реакций на выходе. Реакции системы на выходе принято называть функциями системы или параметрами ее функционирования.

Переменные факторы системы включают следующее:

- обрабатываемый материал (свойства);
- форма и размеры заготовки;
- операция обработки (припуск, длина обработки);
- материал инструмента (свойства);
- вид инструмента (конструктивные и геометрические параметры);
- станок (кинематические и динамические характеристики);
- жесткость системы Станок – Приспособление – Инструмент – Деталь (СПИД) (свойства);
- состав и физико-химическая активность среды;
- состав и способ применения искусственно вводимой в зону обработки внешней среды;
- режимы резания.

Параметры результатов функционирования системы:

- темп износа инструмента;
- критерий затупления инструмента;
- шероховатость обработанной поверхности;
- наклеп и напряженное состояние под обработанной поверхностью;
- точность обработанной детали;
- мощность, расходуемая на резание;
- виброустойчивость процесса;
- стружколомание и стружкозавивание;
- сохранность кромок изделия.

На каждый из параметров функционирования системы резания в большей или меньшей степени влияют все переменные факторы ее состояния. В целом система резания металлов характеризуется большим числом возможных состояний и многочисленностью связей между ее элементами.

2.2.3. Структурная система резания В.Н. Подураева

Профессор В.Н. Подураев отмечает, что «изыскание рациональных условий обработки должно проводиться комплексно на основе выяснения физи-

ко-химического механизма процесса резания, и прежде всего основных явлений, его определяющих». Предлагается общая структурная система обработки с первичными параметрами, задаваемыми конструкторами, и вторичными, определяющими результаты обработки. Первичные параметры – входные – блок с процессами резания, сопутствующими снятию стружки, вторичные параметры – выходные (рис. 2.7).

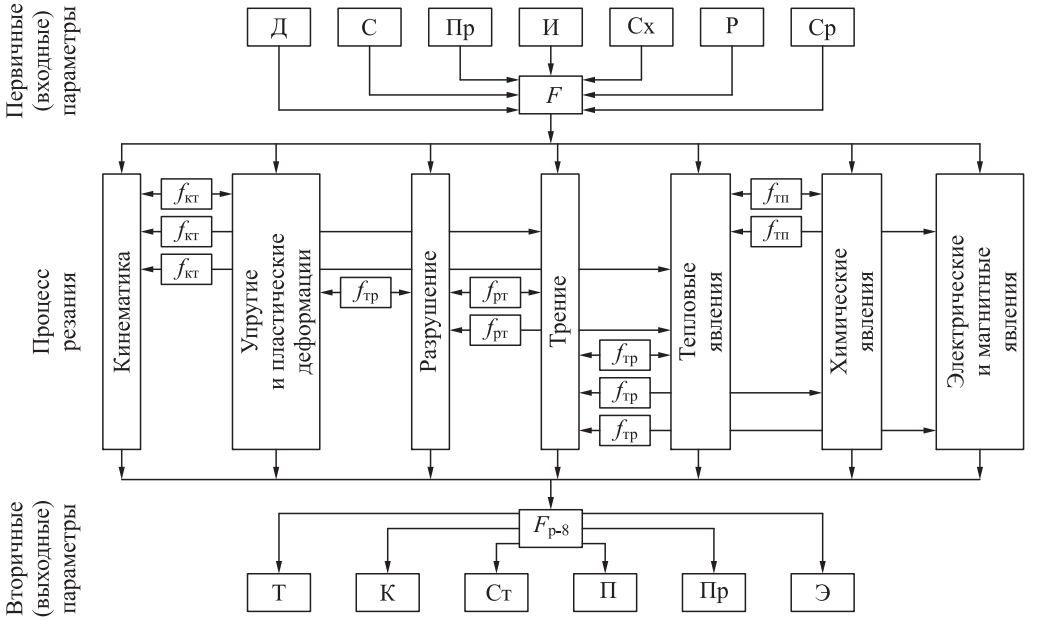


Рис. 2.7. Система резания:

входные параметры: Д – деталь; С – станок; Пр – приспособление; И – инструмент; Сх, Р, Ср – соответственно схема обработки, режим обработки, технологическая среда; выходные параметры: Т, К, Ст, П, Пр, Э – соответственно точность, качество, стойкость, прочность, производительность, экономичность

Структурная система показывает наличие не только прямой, но и обратной связи между отдельными сторонами процесса резания. Она позволяет методически правильно проводить исследования, рационально решать задачу выполнения операции с учетом производительности обработки, определять рациональные границы данного метода обработки, необходимость введения дополнительных операций и т.д.

В дальнейшем был разработан ряд структурных схем резания и предложено для них следующая формулировка: «Система обработки резанием представляет собой необходимую для обработки данной заготовки на станке регулируемую совокупность инструментов, приспособлений и технической среды, с одной стороны, и процесса резания – с другой». Вводятся понятия физической схемы резания; конструктивной модели метода обработки; структурной схемы резания; математической модели обработки резанием. Отмечается, что условия протекания процесса резания определяются кинематической схемой

резания, упругими и пластическими деформациями обрабатываемого материала, разрушениями в зоне резания, трением, тепловыми, химическими, электрическими, магнитными и другими явлениями. Связи между элементами структурной схемы могут дополняться, усиливаться или ослаблять друг друга, могут быть непосредственными или косвенными.

Последовательное изучение физических явлений, анализ моделей и схем резания, представление структурной моделей со связями, взаимовлиянием и ограничениями дают возможность перейти к математической модели резания. Эта модель позволит оптимизировать процессы обработки и найти такие режимы резания, которые обеспечивают оптимальное сочетание для данной операции технологических факторов в условиях наименьшей себестоимости, наибольшей производительности при определенных требованиях к качеству поверхности и точности размеров обработанных деталей.

Профессор В.Ф. Бобров отмечает сложную взаимосвязь факторов косвенных и непосредственных, которые оказывают влияние на процесс резания. Факторы разделены на следующие группы:

• внешние: обрабатываемый материал; материал инструмента; геометрические параметры инструмента; режимы резания; СОЖ и ее свойства;

• внутренние: угол действия; средний коэффициент трения; ширина площади контакта инструмента с изделием; действительный передний угол с учетом нароста и др.

Профессор М.Ф. Полетика схему взаимодействия факторов в процессе резания описывает следующим образом. Геометрические параметры инструмента совместно с режимами резания определяют температуру резания и коэффициент трения стружки о резец. Трение совместно с передним углом резца определяют угол действия равнодействующей силы на передней поверхности, этот угол влияет на угол плоскости сдвига и через него – на усадку стружки. На взаимовлияние различных факторов в процессе резания воздействуют в первую очередь свойства обрабатываемого материала и температура резания.

2.2.4. Типовые модели процессов обработки материалов резанием

В 1985 г. были изданы типовые математические модели и алгоритмы расчета оптимальных режимов для одноинструментной обработки материалов резанием (Методические рекомендации МР 119-85, Москва). Эти рекомендации основаны главным образом на экспериментальных данных справочников по металлообработке. Согласно типовым математическим моделям и алгоритмам расчета оптимальных режимов резания для одноинструментной обработки материала предлагается учитывать взаимосвязи входных факторов и выходных параметров, которые характеризуют непосредственно процесс резания.

Совокупность функциональных зависимостей между входными факторами и выходными параметрами образует математическую модель процесса, в общем случае носящего вероятностный характер. Вероятностные модели наиболее адекватны, но сложны для анализа, поэтому большее распространение получили детерминированные модели, построенные на базе усредненных характеристик.

Входные параметры следующие.

1. Обрабатываемая деталь и инструмент.
   1.1. Обрабатываемый материал, характеризуемый физико-химическими свойствами и химическим составом.
   1.2. Заготовка определенной формы, точностными параметрами и состоянием поверхностного слоя.
   1.3. Инструмент, характеризуемый конструктивными и геометрическими параметрами, материалом режущей части и его физико-механическими свойствами.
2. Режимы резания.
   2.1. Скорость резания.
   2.2. Глубина резания.
   2.3. Подача.
3. Технико-экономические показатели обработки.
   3.1. Затраты на эксплуатацию станков.
   3.2. Стоимость инструмента.
   3.3. Время на настройку системы СПИД.
   3.4. Время на смену инструмента.
   3.5. Затраты по простою станка.

Выходные параметры следующие.

1. Физико-механические показатели процесса обработки.
   1.1. Стойкость режущего инструмента.
   1.2. Составляющие сил резания.
   1.3. Температура в зоне резания.
   1.4. Мощность резания.
   1.5. Тип и форма стружки.
   1.6. Характеристика контактного взаимодействия инструмента с обрабатываемой заготовкой.
2. Технико-экономические показатели обработки.
   2.1. Себестоимость.
   2.2. Время: штучное, основное, технологическое.
   2.3. Обслуживание.
   2.4. Расход режущего инструмента.

Известны также другие подходы к схемам резания. Профессор Г.И. Грановский, например, предложил 282 кинематические схемы резания, которые не только отражают различные методы обработки металлов резанием, но и дают возможность разрабатывать новые процессы механической обработки. Академиком АН БССР Е.Г. Коноваловым описана универсальная схема,

включающая элементарные кинематические схемы, где обрабатываемая деталь и режущий инструмент каждый в своей системе координат имеют три вращательных и три поступательных движения. В дальнейшем принцип комбинирования кинематических схем положен в основу разработки новых способов металлообработки.

2.2.5. Система процесса резания при сверлении

По результатам исследования процессов резания при глубоком сверлении сталей шнековыми сверлами была разработана система оптимизации глубокого сверления отверстий, где учтены подходы к решению подобных задач, предложенные рядом ученых: Н.Н. Зоревым, М.И. Клушиным, В.Н. Подураевым, Е.Г. Коноваловым, В.Ф. Бобровым, Г.И. Грановским, D.F. Galloway и др. (рис. 2.8).

Большое количество факторов, сложность и взаимосвязь различных процессов, сопутствующих глубокому сверлению отверстий, различное их математическое описание – все это вызывает необходимость при оптимизации процесса расчленять общую модель на отдельные самостоятельные элементы.

Схема направлений оптимизации процессов глубокого сверления включает три блока – входной, функциональный и выходной.

Первый блок содержит условия процесса обработки: материал детали, диаметр и глубину сверления, точность размеров и качество поверхности, стойкость инструмента, заданную производительность и др.

Второй блок отражает процессы, связанные с инструментом, образованием и отводом стружки, силовыми и тепловыми нагрузками, жесткостными показателями системы СПИД. Взаимовлияние конструктивных, геометрических параметров сверл, контактных процессов в зоне инструмент – деталь, жесткость системы отражают элементы, включающие стойкостные и точностные зависимости.

Третий блок – это практическая реализация вскрытых закономерностей, включающая уровни режимов резания, точность размеров, качество поверхности, производительность.

Отличительная особенность процессов глубокого сверления – это возможность исключения периодических выводов сверла из отверстия для удаления стружки, обеспечивая ее дробление в зоне резания.

Для сверл шнекового типа разработаны принципы интенсификации процесса глубокого сверления отверстий при $l/d \leqslant 40$ в сталях. Эти принципы включают сочетание самоустанавливающегося низкочастотного колебательного движения режущих кромок по винтовой линии и устойчивого дробления и отвода стружки из зоны резания за счет конструктивных особенностей сверла с углом подъема винтовой канавки $\omega \geqslant 600$ и специальной заточки его режущей части.

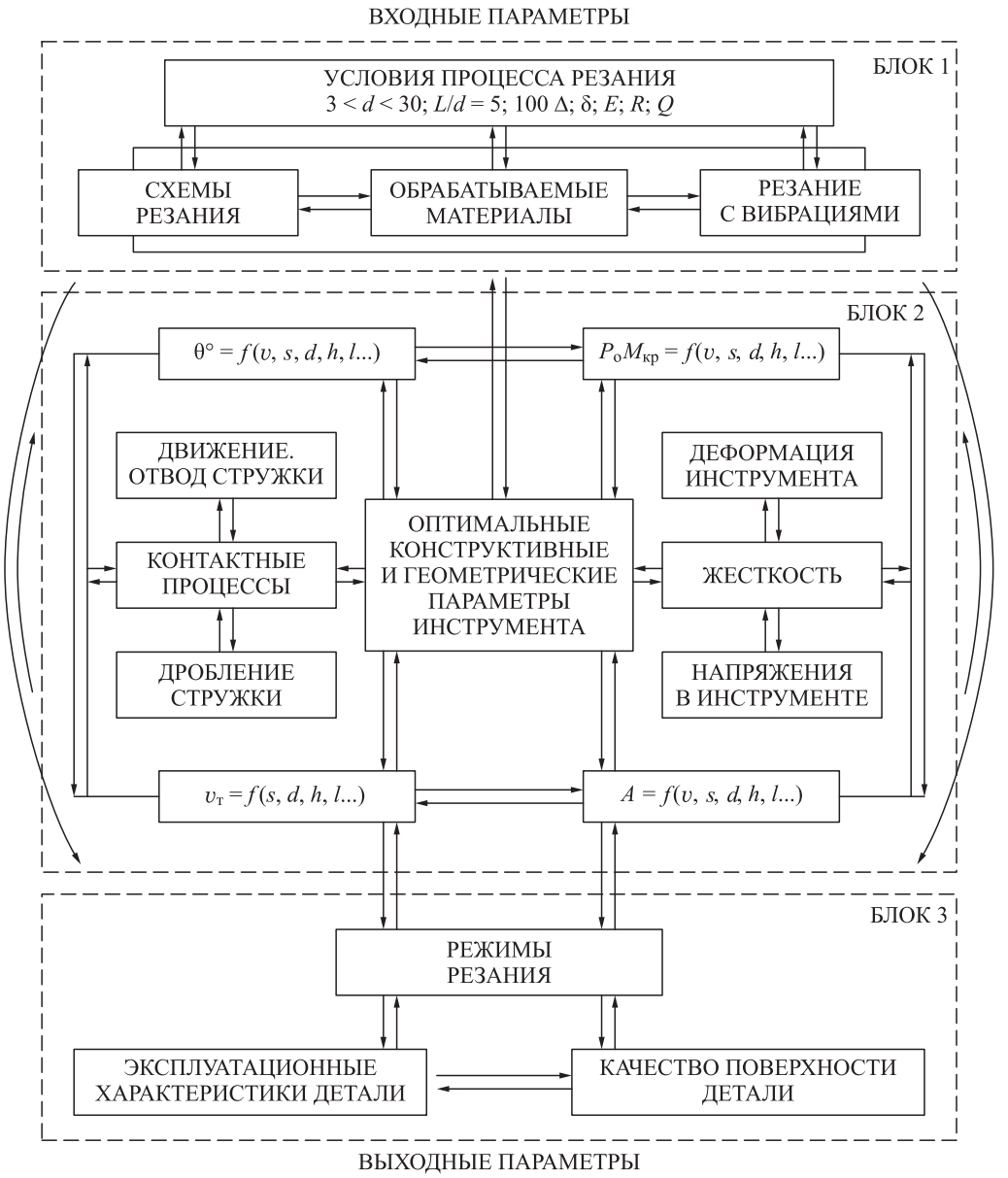


Рис. 2.8. Система оптимизации процесса глубокого сверления (описание дано в тексте):
d – диаметр сверла; L – глубина отверстия; Δ – увод оси отверстия; δ – разбивка отверстия; E – погрешность формы отверстия в продольном сечении; R – шероховатость поверхности отверстия; Q – производительность; θ – температура резания; v – скорость резания; s – подача; h – износ инструмента; l – вылет сверла; A – точностные параметры отверстия

2.2.3. Последовательность расчетов режимов резания

В справочниках по металлообработке, в системах резания материалов, методических материалах и учебниках по обработке материалов резанием отражается порядок расчета режимов резания для различных операций (рис. 2.9).

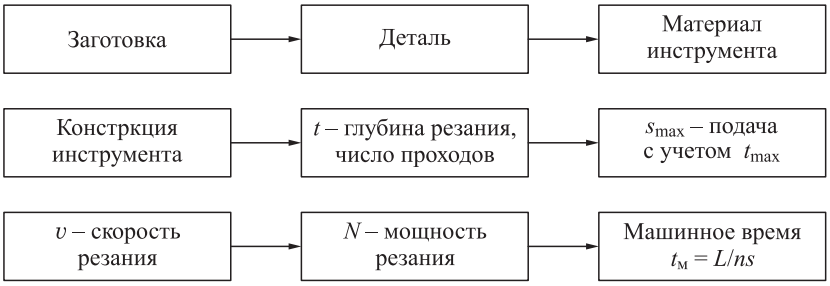


Рис. 2.9. Схема расчетов режимов резания

Алгоритм расчета режимов резания включает следующее.

1. Анализ материала и требований к детали.
2. Анализ необходимых операций для получения готовой детали.
3. Выбор инструментального материала.
4. Выбор геометрических и конструктивных параметров инструмента.
5. Расчет максимальной глубины резания с учетом требований к детали и возможностей станка.
6. Расчет подачи с учетом принятой максимальной глубины и требований к поверхности детали.
7. Коррекция подачи по кинематике станка.
8. Расчет скорости резания с учетом глубины, подачи и стойкости инструмента.
9. Расчет частоты вращения шпинделя с учетом кинематики станка.
10. Коррекция частоты вращения шпинделя по кинематике станка (± 10%).
11. Расчет сил резания, выполнение необходимых проверок по прочности и точности.
12. Расчет мощности резания и сравнение мощности резания с мощностью станка.
13. Расчет машинного времени.

Глава 3. **Материалы режущей части инструментов**

3.1. Требования к инструментальным материалам

Материалы, применяемые для режущих инструментов, должны обладать следующими свойствами:

- высокой теплостойкостью;

• твердостью: 62–65 HRC – для стали, 92–93 HRA – для твердого сплава;

• высокой износостойкостью, т.е. сопротивлением адгезии, истиранию и т.п. при температурах в зоне резания;

• высокой прочностью при достаточной вязкости;

• устойчивостью против воздействия щелочей и кислот при температурах и давлениях в зоне резания;

• удовлетворительными технологическими свойствами: способностью поддаваться различным видам химико-термической и механической обработки.

На рис. 3.1 приведены этапы разработки материалов для режущих инструментов, на рис. 3.2 – поликристаллический нитрид бора (ПКНБ) и области его применения.

Фирма SECO производит несколь марок ПКНБ (название SEKOMAX), которые различаются по типу керамической связки, по размеру и концентрации зерен кристаллического нитрида бора (КНБ). Схожий по свойствам с ПКНБ алмаз не пригоден для обработки железоуглеродистых сплавов, так как в процессе резания при высоких температурах возникает химическая реакция, вызывающая катастрофический износ режущей пластины. ПКНБ инертен и подходит для обработки сплавов, в состав которых входит углерод:

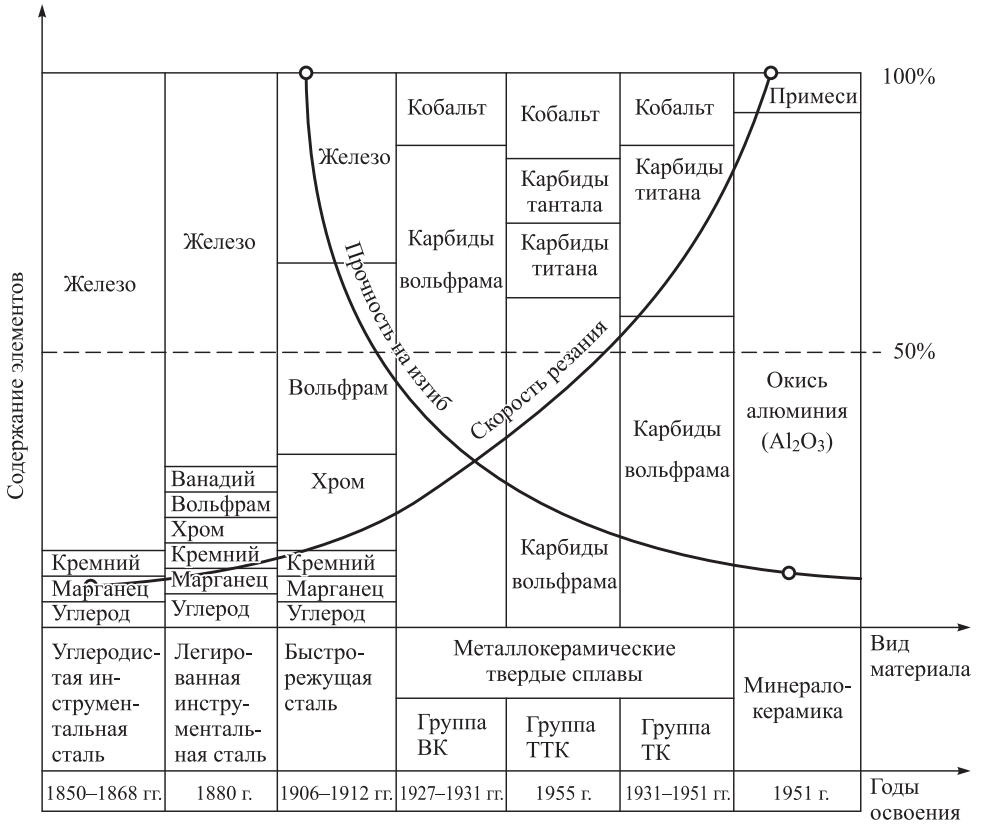


Рис. 3.1. Этапы разработки материалов для режущих инструментов

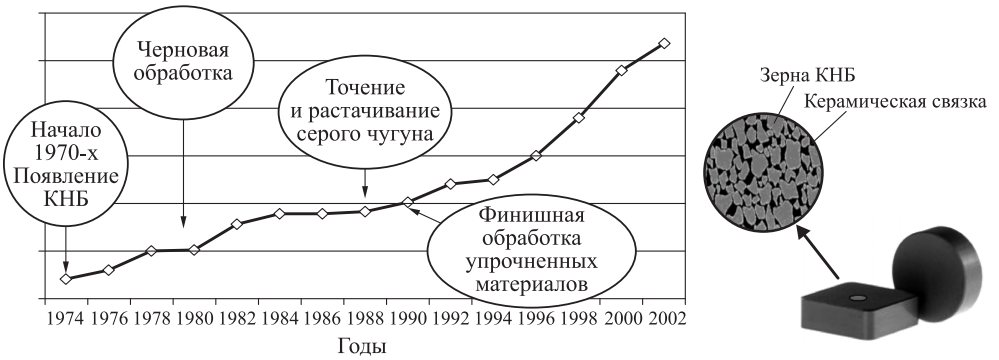


Рис. 3.2. Поликристаллический нитрид бора и области его применения

- упрочненные стали, чугуны твердостью 45–70 HRC;
- чугун и другие материалы с высокими абразивными свойствами;
- труднообрабатываемые материалы, жаропрочные стали и сплавы;
- поверхностно упрочненные стали, твердые сплавы.

3.2. Группы инструментальных материалов и их свойства

Инструментальные материалы подразделяются на следующие группы:

- высокоуглеродистые стали;
- легированные стали;
- быстрорежущие стали: умеренной теплостойкости (620–630 °С); повышенной теплостойкости (630–650 °С); высокой теплостойкости (700–720 °С);
- твердые сплавы: однокарбидные (ВК); двухкарбидные (ТК); трехкарбидные (ТТК); безвольфрамовые (ТН);
- минералокерамика;
- сверхтвердые материалы (СТМ): алмаз, композиты.

Высокоуглеродистые стали. Используются для работы на скоростях резания $v \leqslant 15$ м/мин. Обеспечивают низкую шероховатость поверхности и обладают хорошей технологичностью. Для режущих инструментов применяют стали У10А–У13А. Твердость 60–62 HRC, теплостойкость 200–250 °С. Изготавливаются сверла малых диаметров, развертки, метчики и др.

Легированные инструментальные стали. Для улучшения свойств углеродистых сталей в их состав добавляются следующие легирующие элементы: Cr – повышает твердость, улучшает прокаливаемость, износостойкость; W – повышает красностойкость; Mn – улучшает структуру и меньшие объемные деформации при закалке.

Марки сталей: 9ХС, ХВГ, ХВ5. Твердость 62–64 HRC, теплостойкость 250–300 °С, скорость резания $v \leqslant 20$ м/мин.

Быстрорежущие стали. К ним относятся стали умеренной, повышенной и высокой теплостойкости.

Стали умеренной теплостойкости: Р9, Р18, Р6М5. Твердость 62–64 HRC, теплостойкость 620–630 °С, скорость резания $v \leqslant 50$ м/мин. Наибольшее распространение получила сталь марки Р6М5.

Стали повышенной теплостойкости: Р10К5Ф5, Р6М5К5, Р18Ф2К8, Р9М14 К8, Р9К5. Твердость 63–68 HRC, теплостойкость 630–650 °С, скорость резания $\upsilon \leqslant 50–60$ м/мин.

Стали высокой теплостойкости: В11М7К23, В18М7К25. Твердость 68–69 HRC, теплостойкость 700–720 °С, скорость резания $\upsilon \leqslant 60$ м/мин. Применяются для изготовления сложнопрофильных инструментов – зуборезных инструментов, протяжек, инструментов для обработки жаропрочных, коррозионно-стойких сталей, титановых сплавов.

Твердые сплавы. Спеченный твердый сплав (WC-Co) был создан в 1923 г. Затем сплав совершенствовался путем добавок TiC и TaC. В 1969 г. была разработана технология химического нанесения покрытия CVD, которая нашла широкое применение. Основа металлокерамики TiC-TiN была разработана в 1974 г. Сплавы позволяют увеличить скорость резания в 5–10 раз по сравнению с быстрорежущими сталями. Микротвердость 88–96 HRA, теплостойкость 870–900 °С, предел прочности при изгибе 900–2000 МПа.

Вольфрамокобальтовые сплавы (*ВК*) для обработки чугуна:

- ВК2, ВК3, ВК3-М – чистовая обработка;
- ВК6, ВК8, ВК8-В – черновая обработка;
- ВК12, ВК18,ВК24 – для сложнопрофильного инструмента;
- ВК6-М, ВК10-ОМ – для жаропрочных, коррозионно-стойких сталей; высокопрочных чугунов и алюминиевых сплавов.

Титанокобальтовые (*ТК*) сплавы для обработки сталей:

- Т15К6, Т5К10 – черновая обработка;
- Т60К6, Т30К4 – чистовая обработка.

Титано-вольфрамо-кобальтовые (*ТТК*) сплавы для обработки стальных поковок, труднообрабатываемых сталей, титановых сплавов: ТТ7К12, ТТ8К6, ТТ10К8, ТТ20К9.

Безвольфрамовые сплавы на основе карбидов и карбонитридов титана с никельмолибденовой связкой (до 12–19%): ТН20, КТН-16, КТН-20, КТН-30. Теплостойкость 900–1000 °С. Используются для чистовых операций.

Согласно международной системе стандартов твердые сплавы для обработки резанием делятся на три основные группы резания:

- Р (синяя окраска): Р10, Р20, Р30, ... Группы применения по уровню $\upsilon_{рез}$ снижаются в направлении увеличения цифры в названии марки. Прочность и допустимое сечение среза увеличивается в том же направлении. Применяются для обработки углеродистых сталей, стального литья, ковких чугунов, цветных металлов, сталей средней и низкой прочности с включениями раковин и песка. Стружка сливная и надлома;
- М (желтая окраска): М10, М20, М30. Применяются для обработки коррозионно-стойких, жаропрочных сталей и сплавов, титановых сплавов, низкоуглеродистых сталей с низкой прочностью. Стружка сливная и надлома;
- К (красная окраска): обработка всех видов чугунов, в том числе и отбеленных; цветных металлов и их сплавов, неметаллических материалов. Стружка надлома.