

1544692

Московский ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени государственный
технический университет им. М.Э.Баумана

На правах рукописи

ЕРМАКОВ ЮРИЙ МИХАЙЛОВИЧ

РАЗРАБОТКА ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ СПОСОБОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ
ОБРАБОТКИ РЕЗАНИЕМ И МЕТАЛЛОРЕЗНИКИ СТАНКОМ НА ОСНОВЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОСВЯЗИ СПОСОБОВ

Специальность 05.03.01 – Процессы механической и
физико-технической обработки,
станки и инструменты

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва – 1994

С. С. Смирнов
РЗ

Работа выполнена в Московском институте приборостроения

Официальные оппоненты:

- доктор технических наук, профессор Прохоров А.Ф.
- доктор технических наук, профессор Гречишников Б.А.
- доктор технических наук, профессор Михайлов А.А.

Ведущее предприятие - АО "Московский станкозавод
им. Серго Орджоникидзе"

Защита состоится *6 14³⁰* *"16" марта* 1994 г. на заседании
специализированного Совета Д 053.15.04 при Московском ордена
Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового

Красного

им. Н.Э.

ул., д.

Ва

ный пест

С

им. Ч.С.

То

А

У

специа

К.

Подп.

т р. 100 экз. Ротاپринт МГТУ

зрители

манская

зверен-

МГТУ

ОВ

всем 2 п.л.

1544692

Актуальность проблемы. Перед отечественной промышленностью стоит задача к концу столетия поднять производственный потенциал при его качественном преобразовании, увеличить производительность общественного труда в 2,0-2,3 раза, снизить энергоемкость производства в 1,4 раза и металлоемкость почти в 2 раза. Необходимо опережающее развитие машиностроительного комплекса, прежде всего станкостроения, производства вычислительной техники, приборостроения, электротехнической и электронной промышленности.

В настоящее время в металлообработке преобладают классические способы резания, которые не претерпели изменений даже в самых современных, оснащенных системами числового программного управления станках. Повышение производительности резания традиционно происходило за счет увеличения режимов. Но темпы роста режимов быстро падают. Если в 1980 году скорости резания и подачи увеличилось втрое по сравнению с 1960 годом, то за последнее десятилетие - всего на 10%, а на гибких производственных системах даже уменьшились. Это показывает, что классические способы резания истощили свои основные резервы, и некоторое повышение их производительности достигается оптимизацией режимов с использованием систем адаптивного управления.

Дальнейшее развитие металлообработки возможно по пути освоения способов с принципиально новой кинематикой и схемой срезания припуска, что позволяет на порядок повысить производительность резания.

Диссертация посвящена теоретическому обоснованию классификации способов резания на базе их взаимосвязи, исследованию физических особенностей процесса резания и кинематико-технологическому анализу способов, на основании чего решена важная народнохозяйственная проблема, заключающаяся в создании методологии поискового проектирования новых высокопроизводительных способов резания, а также станочного оборудования и инструментов для реализации способов.

Ц е л ь р а б о т ы - повышение производительности резания, разработка комплексных способов резания и методологии

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1544692

Ермаков Ю.М. Разработка в



поискового проектирования новых способов и режущих инструментов, как основы высокопроизводительного станочного оборудования.

Научная новизна

1. Методология поискового проектирования новых способов механической обработки резанием, основанная на классификации способов, системном анализе кинематических и технологических параметров схем резания, энергостойкостном критерии сравнительной оценки и буквенно-цифровом кодировании параметров способов для ЭВМ.

2. Классификация способов механической обработки резанием на основе их взаимосвязи, отражающая переход базовых классических способов из одного вида в другой через комплексные способы по мере изменения кинематико-технологических параметров.

3. Кинематические и технологические особенности комплексных способов резания, соотношение скоростей движений заготовки и инструмента в области от 0,2 до 5, соответствующее соизмеримому приращению толщины и длины среза, уменьшению удельной силы и пути резания, повышению стойкости инструмента.

4. Зависимость линейной стойкости режущего инструмента от силы и скорости резания ($T_c = C_{FV} / (F \cdot V)^{1/(k+1)}$) и энергостойкостный критерий сравнительной оценки способов — удельная разрешающая сила резания $p_v = a^{y-1} \cdot v_r^{k_i-1}$, учитывающая обратную корреляционную связь стойкостной и силовой зависимостей от скорости резания.

5. Технические требования к станочному оборудованию на основе пп. 1-4: наличие двух и трех главных движений; соизмеримость мощности и диапазонов скоростей приводов заготовки и инструмента; самоадаптирующаяся связь между ними; непрерывность движения подачи; оснащение суппорта инструментальным шпинделем; компоновка металлорежущих станков по типу прокатно-штамповочного оборудования.

Практическая ценность. Результаты теоретических и экспериментальных исследований позволили разработать несколько десятков новых способов механической обработки и инструментов, в том числе реверсивного резания; определить резервы по повышению производительности и усовершенствовать классические способы точения, строгания,

сверления, фрезерования, протягивания, шлифования; расширить технологические возможности действующих станков, дать основы компоновки станков с равноскоростными движениями резания, обеспечивающими высокоскоростную обработку.

Предложена стойкостная зависимость инструмента, учитывающая связь линейной стойкости с силой резания в зависимости от скорости резания и позволяющая оптимизировать режимы резания.

Разработан метод многофакторного исследования и система кинематико-технологического анализа способов механической обработки; алгоритм поискового проектирования нового способа.

Предложены сквозные технологические процессы непрерывной механической обработки тел вращения на базе роторного и поперечно-винтового принципов действия.

Реализация работы. Свыше 70 новых способов, станков и инструментов, разработанных по материалам диссертации, внедрены на 310 предприятиях, отмечены семью медалями ВДНХ, премией ГКНТ на конкурсе "Завод XXI века". Годовой экономический эффект составляет 142 тыс. руб., за пять лет использования - 710 тыс. руб. (в ценах 1990 года).

Автор защищает.

1. Взаимосвязь способов механической обработки резанием, отражающую кинематико-технологический переход одного базового способа в другой через комплексные способы.

2. Обобщенную кинематическую схему резания и эффективное соотношение скоростей прямолинейного и кругового движений заготовки и инструмента комплексных способов в области от 0,2 до 5, соответствующей увеличению объема срезаемого материала при уменьшении удельной силы U резания.

3. Зависимость линейной стойкости режущего инструмента от силы и скорости резания и энергостойкостной критерий сравнительной оценки способов - удельную разрешающую силу резания.

4. Методологию поискового проектирования на ЭВМ нового способа механической обработки резанием, основанную на системе буквенно-цифрового кодирования и сравнительном анализе по энергостойкостному и экономическому критериям.

5. Новые технические требования к станочному оборудованию.

6. Новые способы механической обработки резанием, инструменты и станки; высокопроизводительные технологические процессы на базе роторной и поперечно-винтовой механической обработки.

А п р о б а ц и я р а б о т ы. Основные результаты диссертации докладывались автором на следующих конференциях, симпозиумах, семинарах и выставках:

- Всесоюзном научно-техническом симпозиуме "Перспективы развития резания конструкционных материалов", Ворошиловград, 1980 г.;

- Всесоюзном научно-техническом семинаре "Оптимизация условий эксплуатации и выбора характеристик абразивного инструмента в машиностроении" ("Оптимизация абразив - 81"), Ленинград, 1981 г.;

- Выставке "Достижения советских изобретателей и рационализаторов в области машиностроения", Минск, 1982 г., персональной выставке на ВДНХ, Москва, 1991 г.;

- Производственно-техническом семинаре "Оптимизация режимов обработки на металлорежущих станках", Челябинск, Уральский МДНТП, 1984 г.;

- Семинаре "Создание и внедрение прогрессивных конструкций токарных автоматов, автоматических линий и гибких производственных систем", РДЭНТИ, Киев, 1986 г.;

- Втором Всесоюзном совещании "Пути повышения эффективности использования режущего инструмента", Минстанкопром, Москва, 1986 г.;

- Секции НТС Минстанкопрома "Режущие и вспомогательные инструменты", НПО "ВНИИинструмент", Москва, 15 июня 1987 г.;

- Секции НТС Минстанкопрома "Технология механической обработки и металлорежущее оборудование", ЭНИМС, Москва 27 октября 1987 г.,

- Всесоюзном семинаре "Новые методы обработки резанием конструкционных материалов и эксплуатация режущих инструментов", МД НТП им. Ф.Э.Дзержинского, Москва, 1988 г.

По диссертационной работе были сделаны доклады на научных семинарах Московского авиационного института "Физические проблемы обработки резанием конструкционных материалов" в 1985 и 1986 г.г., заседаниях кафедр "Металлорежущие станки и инструменты интегрированного производства" Московского института приборостроения (1987, 1990, 1993 г.г.), "Технология

машиностроения, теория резания и металлорежущие инструменты" "Прецизионные станки и станочные модули" МГТУ им.Н.Э.Баумана (1987, 1990, 1993 г.г.).

Структура и объем работ. Диссертация состоит из введения, семи глав, выводов и списка литературы из 304 наименований на 30 страницах. Материал изложен на 429 страницах, содержит 118 рисунков на 115 страницах и 9 таблиц. Приложение содержит 96 страниц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

ГЛАВА I. ОБЩИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ И ВЗАИМОСВЯЗЬ СПОСОБОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ РЕЗАНИЕМ

Ключевым инструментом развития способов механообработки является классификационная система. Классификация схем резания впервые была предложена Г.И.Грановским. Она базировалась на сочетании двух элементарных движений: прямолинейного и кругового. Дальнейшим ее уточнением по технологическим признакам явилась классификация А.О.Этин. Кинематические признаки дополнили работы Н.А.Шевченко, С.И.Лашнева, позднее Е.Г.Коновалова, П.Р. Родина. По четырем видам пространственного взаимодействия инструмента и объекта обработки: точечному, линейному, поверхностному и объемному классифицирует способы Л.Н.Кошкин. Точечное и линейное взаимодействие инструмента и заготовки детализировал применительно к резанию А.А. Федотенок, введя понятия образующей и направляющей, и рассмотрев виды их взаимодействия: след, касание, обкат и копирование; применительно к режущему инструменту – В.А.Гречишников. Расширенную классификацию способов обработки по характеру подвода энергии, формообразования и механизму съема материала предложили А.А.Лившиц, В.Н.Подураев.

Большой вклад в разработку теории проектирования и совершенствования способов в общем технологическом процессе внесли А.М.Кузнецов, представивший способ как совокупность приемов формирования заданных параметров качества и производительности при минимальных затратах; А.И.Половинкин, предложивший методы поиска новых технических решений, широко используемые для автоматического проектирования техпроцессов на базе типовых операций; Б.Д.Цветков, создавший основы

Принципиально новую классификацию технологических процессов на базе модулей поверхностей предложил Б.М.Базров. Она позволяет группировать детали не только по предметному признаку - конфигурации (А.П.Соколовский, С.П.Митрофанов), но и по совокупности базирующих, рабочих и соединительных поверхностей.

The diagram is a circular classification system for cutting tools. It is organized into concentric rings and radial sectors. The outermost ring is labeled "Обработка" (Processing) and is divided into three main sections: "свободным абразивом" (with free abrasive), "абразивная" (abrasive), and "циклопозитная" (cyclonite). The next ring inward is labeled "с регулярным микрорельефом" (with regular micro-relief) and is divided into "Губчатая" (spongy) and "Насечная" (notched). The innermost ring is labeled "с регулярным макро-рельефом" (with regular macro-relief) and is divided into "Давление" (pressure) and "Скорость резания" (cutting speed). The central part of the diagram is a circle divided into four quadrants, each representing a different material for the cutting edge: "Т" (tool steel), "ТМ" (high-speed steel), "Тсв" (high-speed tool steel), and "ТФ" (high-speed tool steel). The quadrants are further divided into sub-quadrants labeled "ТВ", "ТС", "С", "Ф", "Ш", "Шс", "Шсв", "ФП", "Ф", "В", "СВ", "П", "СА", "САсв", "Х", "Хсв", "Хс", "Хсв". The diagram also includes labels for "группы" (groups) and "подклассы" (subclasses) along the outer edge.

6

По этим признакам все схемы независимо от числа движений инструмента и заготовки можно свести к трем элементарным базовым способам: точению (Т), строганию (С), обработке вращающимся резцом (В) и их комбинациям.

Точение (Т) – способ съема материала при относительном движении резания по окружности вокруг оси заготовки. Вектор скорости U_T касателен к обработанной поверхности. Точение переходит в строгание при радиусе заготовки, стремящемся к бесконечности.

Строгание (С) – способ съема материала при относительном прямолинейном движении резания. Вектор скорости U_C совпадает с обработанной поверхностью.

Вращающимся резцом обработка (В) – способ съема материала при относительном движении резания по окружности вокруг центра вращения резца. Вектор скорости U_B непрерывно изменяет направление относительно обработанной поверхности. При радиусе резца, стремящемся к бесконечности, процесс переходит в строгание.

В зависимости от соотношения скоростей инструмента и заготовки образуется бесчисленное множество переходных способов, в которых один базовый способ преобладает над другим. Способ обладающий в равной степени признаками базовых способов, называется комплексным.

Графически взаимосвязь между двумя любыми базовыми способами отображается на контуре базовых способов С–Т–В, внутри контура образуются переходные способы, сочетающиеся свойства трех базовых способов обработки. Возможны любые комбинации, например, КТСВ – точение с признаками строгания вращающимся резцом (рис. 1, точка 1) или КВСТ – обработка вращающимся резцом на скорости токарного строгания (рис. 1, точка 2).

При многорезцовой обработке базовые способы представлены многорезцовым точением (ТМ), протягиванием (П) и фрезерованием (Ф), а комплексные переходные способы называются: токарное протягивание (ТП), фрезепроотягивание (ФП) (рис. 1, точка 3), фрезоточение (ФТ); при абразивной – базовые способы шлифование (Ш), абразивное точение (ТА) и строгание (СА), а комплексные – хонингование (Х), шлифострогание (ШС), шлифоточение (ШТ). Сочетание трех базовых способов определяет

комплексный способ – токарное строгание вращающимся резцом (ТСВ); при многолезвийной обработке – токарное фрезепротягивание (ТФП); при абразивной – токарное шлифстрогание (ТШС).

Взаимосвязь способов отражает бесконечное увеличение числа режущих элементов и обрабатываемых воздействий вплоть до анодо-механических и электрофизических способов обработки. Рассматривая способы в зависимости от числа и размеров режущих элементов, можно отметить увеличение относительной скорости с ростом числа и уменьшением размеров режущих элементов. Если способы обработки однолезвийным инструментом имеют скорость резания до 5 м/с, многолезвийным, например фрезерование, – до 10 м/с, то абразивным – до 80–100 м/с. В электроэр-озионной обработке скорость импульсов ($U=0,3$ м/с) определяется частотой порядка 30000 Гц и длиной пробега частицы порядка 0,01 мм, а с наложением движения инструмента, например, заточного диска скорость электроимпульсного воздействия возрастает до 80 м/с.

В общем случае для оценки способа может служить соотношение скоростей составляющих движений: точения U_T , строгания U_C , вращения резца U_B . Результирующая скорость $\bar{U}_e = \bar{U}_B + \bar{U}_C + \bar{U}_T$ удобна для векторного анализа. Обозначив соотношение скоростей

$$k_C = U_C/U_B; \quad k_{CT} = U_C/U_T; \quad k_T = U_T/U_B = r/R,$$

где $i = \omega_T/\omega_B$ отношение угловых скоростей заготовки и резца, r и R соответственно их радиусы, получим выражение результирующей скорости $\bar{U}_e = \bar{U}_B + U_B \bar{k}_C + U_B \bar{k}_T$. (2)

При $k_C = 1$ и $k_T = 1$ имеет место комплексный способ с тремя равноскоростными движениями. Комбинации могут быть из двух любых движений: $\bar{U}_B$ и $\bar{U}_T$ при $k_C = 0$; $\bar{U}_B$ и $\bar{U}_C$ при $k_T = 0$;

U_T и U_C при $U_B = 0$, $k_C = \infty$, $k_T = \infty$. При сочетании движений в одной плоскости результирующая относительная скорость выражается алгебраической, а в двух плоскостях – геометрической суммой составляющих скоростей и равна нулю при равенстве противоположно направленных скоростей.

Выявить наиболее благоприятные соотношения скоростей позволяет сравнение энергозатрат, возрастающих экспоненциально с уменьшением толщины среза, и анализ стойкости инструмента.

ГЛАВА 2. СТОЙКОСТНЫЕ И СИЛОВЫЕ ЗАВИСИМОСТИ КАК ПРЕДПОСЫЛКИ ОПТИМИЗАЦИИ СПОСОБОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ РЕЗАНИЕМ

В настоящее время накоплен богатейший материал о характере и причинах износа, даны достоверные объяснения механических, физических и химических явлений в зоне трущихся пар в неограниченном для практического применения интервале скоростей. Трудami предшественников установлено, что в процессе резания действует порядка двадцати основных факторов, а количество вариантов их взаимодействия определяется числом сочетаний и достигает астрономической цифры — $3,8 \cdot 10^{31}$. Известная тейлоровская зависимость стойкости от скорости резания, предложенная в 1907 году, непрерывно уточнялась и интерпретировалась применительно к различным условиям обработки. Исследованием стойкости занимались на протяжении ряда лет Г.И. Грановский, А.М. Даниелян, А.И. Еремин, Н.Н. Зорев, М.В. Касьян, А.И. Каширин, М.И. Клушин, В.В. Коняшов, В.А. Кривоухов, Т.И. Лоладзе, А.Д. Макаров, С.С. Можаяев, Е.П. Надеинская, А.Н. Резников, А.М. Розенберг, Н.А. Сафонов, А.Н. Строшков, С.П. Шабашов, В.М. Ярославцев, С.М. Ву, Е.М. Трент, Д.С. Эрмер и многие другие. Было установлено, что минутная стойкостная зависимость от скорости резания в простых координатах имеет вид многогребной кривой (Г.И. Грановский), что ее экстремумы сдвигаются по оси скорости при представлении стойкости в длине пути резания $T_g = \frac{v}{T}$ или в площади срезанного материала $T_g = a \frac{v}{T}$ (Т.Н. Лоладзе).

Многообразие стойкостных зависимостей и их эмпирических выражений отражает сложный характер процесса резания. Сопоставление минутной стойкости и длины резания в зависимости от скорости резания, построенных соответственно в логарифмических и простых координатах, показывает их полную несхожесть. Возникает вопрос, какой же зависимостью пользоваться на практике?

В настоящее время действует нормативная зависимость минутной стойкости

$$T = C_T / (v^m t^k S^y), \quad (3)$$

учитывающая скорость резания, глубину и подачу. Однако коэффициенты и особенно степенные показатели в зависимости (3) даже при небольшом разбросе дают значительные расхождения в минутной стойкости. В этой связи возникла необходимость

экспресс-оценки нормативных режимов резания.

Были предложены ускоренные методы определения оптимальной скорости резания по температуре резания, определяемой через термо-ЭДС: М.И.Клушин – одинаковым температурам на режущих кромках соответствуют одинаковые стойкости; А.Д.Макаров – оптимальной скорости резания соответствует температура провала пластичности обрабатываемого материала; Т.Н.Лоладзе – поле режимов резания от верхней температуры резания, соответствующей пластической прочности материала инструмента, до нижней, соответствующей исчезновению нароста; А.И.Белоусов – температура резания с учетом охлаждающего эффекта резца. На практике установлено, что термо-ЭДС искажает картину пластических деформаций при колебаниях припуска и твердости обрабатываемого материала, при использовании СОЖ, а также при адгезии и наростообразовании на инструменте (С.В.Васильев). Поэтому некоторые ученые рекомендуют определять оптимальную стойкость по минимальной силе резания (С.С.Силин, В.К.Старков, В.А.Остафьев, А.А.Виноградов), полагая, что она соответствует температуре провала пластичности обрабатываемого материала.

Наряду с температурным анализом режима резания широко применяется метод экстраполяции износа при ускоренных испытаниях резцом с непрерывно увеличивающейся скоростью. К его недостаткам относятся значительное влияние на конечный результат начальной скорости резания и заранее обусловленная степенная зависимость стойкости от скорости.

Особое влияние на стойкость оказывает прерывистое резание. В зависимости от времени контакта и свободного хода, вызывающего охлаждение резца, стойкость может увеличиваться или уменьшаться по сравнению с непрерывным точением. Автором установлено, что при продолжительности реза от 2 до 3 с и полном охлаждении твердосплавного резца стойкость его выше, чем при непрерывном или прерывистом резании. Достоверная оценка стойкости инструмента возможна при комплексном исследовании процесса резания. С этой целью разработан способ непрерывного отделения корней стружек уменьшающейся толщины при тангенциальном точении. Экспериментальные исследования по стойкости и силам резания в зависимости от скорости и толщины среза проводились на токарном станке мод. Д - 350 фирмы Эрликсон с мощностью главного привода 100 кВт и с бесступенчатым регулированием частоты вращения шпинделя. Обрабатываемый

материал Сталь 60К (качественная), HB 229, $\sigma_B = 800$ МПа. Резание свободное, без охлаждения, ширина среза 4 мм, толщина $0,03 \div 0,15$ мм. Материал резца - твердый сплав P10 (ТТ20К9), P30. Высокая жесткость системы шпиндель - образец - задний центр (в горизонтальной плоскости 300 даН/мкм) и стабильность физико-механических свойств материала образца, единого для всей серии опытов, обеспечили высокую точность экспериментальных данных. Получение корней стружки производилось в диапазоне скоростей до 150 м/мин, исследование стойкости и сил резания - до 950 м/мин. Многолетние исследования автора при обработке сталей 40Х, 45, ШХ15 твердосплавными резцами ТТ5К6, позволили установить взаимосвязь стойкости и силовой зависимостей. Она заключается в том, что при общей тенденции к уменьшению стойкости и силы резания по мере увеличения скорости резания встречаются интервалы скоростей, в которых минимальной силе резания соответствует более высокая линейная стойкость, чем при меньшей скорости резания (рис. 2).

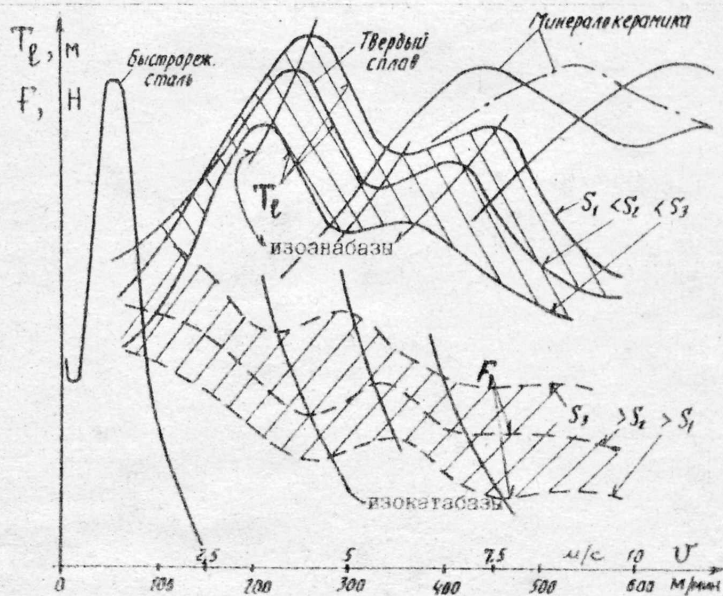


Рис. 2 Стойкость T_c и силовая F зависимости от скорости резания для различных подач

Стойкостная зависимость T_p от силы F и скорости резания U для конструкционных сталей имеет вид:

$$T_p = C_{Fv} / (Fv)^{M/k \pm 1}, \text{ м (4).}$$

Сопоставление (4) с нормативной стойкостной зависимостью (3) показывает их сходство в аргументе – параметрах силы резания. Оптимальная скорость резания в диапазоне скоростей, соответствующих минимальной динамической силе резания, может быть уточнена дополнительными показателями по минимальной амплитуде автоколебаний и по наибольшей разности "горячих" твердостей инструмента и заготовки. Энергостойкостный критерий оценки способов определяется, как отношение силы резания к объему срезаемого металла в единицу времени при скорости, соответствующей экономической стойкости. Сравнение удельной по площади p с удельной по объему p_v сил резания показывает их связь через скорость резания $p_v = p/v$. После преобразований, заключающихся в представлении силы резания через параметры срезаемого слоя и сокращении постоянного коэффициента для неизменной пары инструмент – заготовка, получается оператор "удельная разрешающая сила резания" – $p_v = a^{k-1} v^{k_i-1}$, Н/мм³ (5). Он учитывает влияние толщины среза и скорости резания при максимальной стойкости инструмента на энергоемкость процесса резания и является энергостойкостным критерием.

ГЛАВА 3. КИНЕМАТИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СПОСОБОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ РЕЗАНИЕМ

Кинематический анализ способов заключается в определении траекторий движения режущих лезвий, характер которых зависит от соотношения и направления скоростей инструмента и заготовки. Соизмеримость скоростей движений в комплексных способах позволяет их считать главными движениями резания. Скорость резания способов первой группы, сочетающих движения в одной плоскости, равна алгебраической; второй, во взаимноперпендикулярных плоскостях – геометрической сумме скоростей главных движений. Последнее приводит к разделению стружки на два потока со сходом одновременно по передней и задней граням режущего лезвия.

Определение параметров среза комплексных способов первой группы выполнено по обобщенной кинематической схеме (рис.3), сочетающей базовые способы фрезерование и строгание (шлифова-

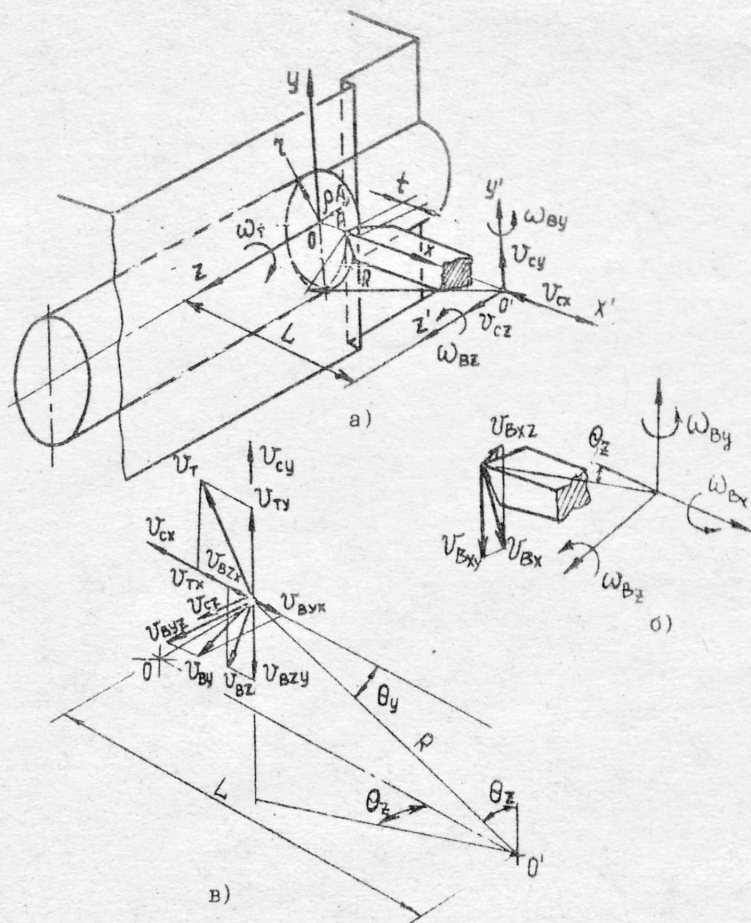


Рис. 3. Обобщенная кинематическая схема механической обработки резанием - а) и планы скоростей для ω_{Bx} - б) и без ω_{Bx} - в)

ние — по мере увеличения числа режущих элементов), Траекторией режущего лезвия является эволюта при встречном и циклоида при попутном направлении скоростей строгания V_c и фрезерования V_f . Из решения уравнений циклоиды (эволюты) определены толщина

$$a = \frac{2\pi k \sqrt{2Rt - c}}{(1 \pm k) z}, \quad (6) \text{ и длина среза } l = k\pi R/z + (1 \pm k)\sqrt{2Rt}, \quad (7);$$

здесь: k — соотношение скоростей заготовки и инструмента;

k_c — для плоского фрезерования (шлифования), $C = 0$;

k_T — для круглого, $C = t^2$.

Знак минус (-) в формулах соответствует попутному направлению скоростей инструмента и заготовки.

Анализ толщины, длины и объема среза $V = al$ на единицу ширины среза) в зависимости от соотношения скоростей составляющих движений показывает, что до $k = 1$ преимущественное влияние на увеличение объема оказывает приращение толщины среза, а при $k > 1$ — длины среза (рис. 4). Объем срезаемого материала за оборот инструмента увеличивается прямо пропорционально с увеличением k . Наиболее эффективная область соотношения скоростей главных движений резания находится в пределах $0,2 \leq k \leq 5$, т.е. соответствует соизмеримым и равным (при $k = 1$) скоростям комплексных способов резания. Она характеризуется увеличением объема срезаемого материала при уменьшении удельной силы и пути резания. Коэффициент $k_2 = \frac{k_1(1+k_2)}{k_2(1+k_1)}$ уменьшения пути резания показывает, что при $k_1 = 1$ путь резания в 50 раз меньше, чем при $k_2 = 10^{-2}$ (см. рис. 4)

Для обобщенной кинематической схемы, охватывающей все комбинации движений инструмента и заготовки (рис. 3), составлена система дифференциальных уравнений скоростей режущей точки.

$$\begin{cases} \dot{x} = -V_{cx} - V_T \sin(\omega_T t) + V_{By} \sin(\omega_{By} t) + V_{Bz} \sin(\omega_{Bz} t), \\ \dot{y} = V_{cy} + V_T \cos(\omega_T t) - V_{Bx} \sin(\omega_{Bx} t) \sin(\omega_{By} t) - V_{Bz} \cos(\omega_{Bz} t), \\ \dot{z} = V_{cz} + V_{By} \cos(\omega_{By} t) - V_{Bx} \sin(\omega_{Bx} t) \cos(\omega_{Bz} t), \end{cases}$$

где V_{cx}, V_{cy}, V_{cz} и V_{Bx}, V_{By}, V_{Bz} — линейные составляющие скоростей V_c и V_B по осям координат x, y, z ;

$\omega_T, \omega_{Bx}, \omega_{By}, \omega_{Bz}$ — круговые частоты вращения заготовки и инструмента вокруг соответствующих осей;

$V_T = \omega_T (r - v_{cx} t)$; t — время, с.

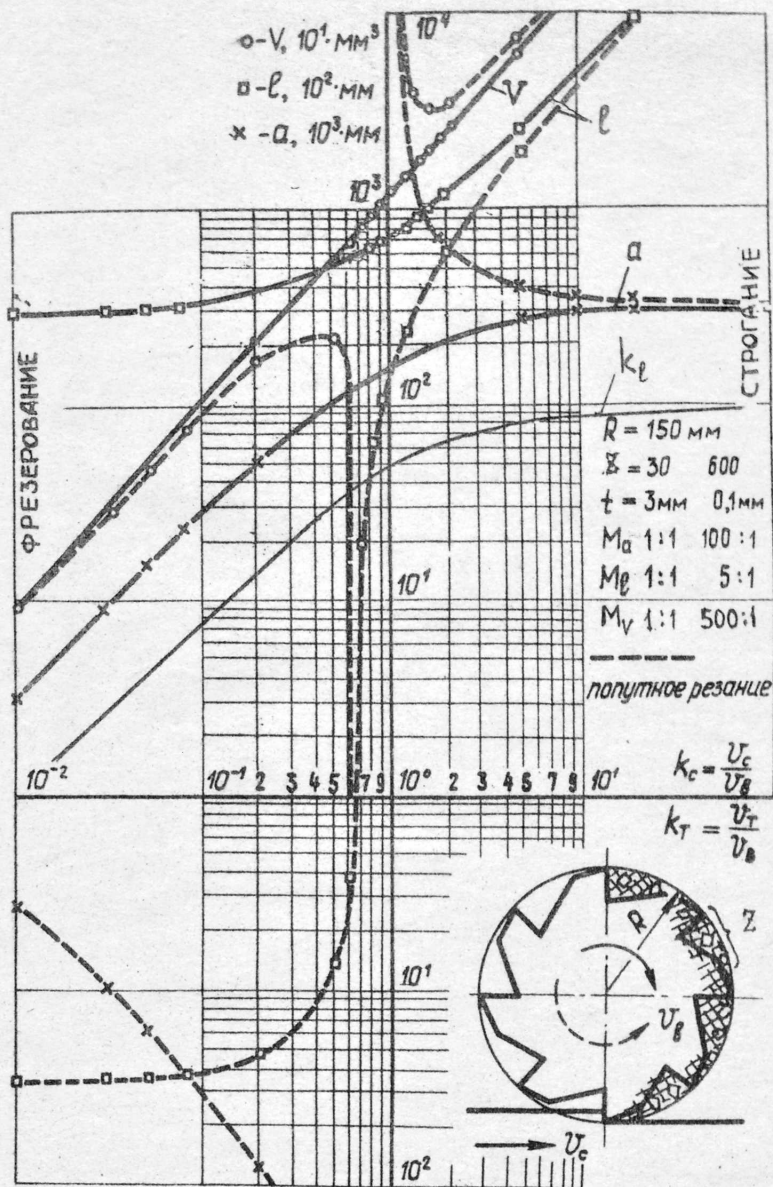


Рис. 4. Зависимости параметров и объема среза от
 соотношения скоростей $k_c (k_T)$

Решение системы дифференциальных уравнений в замкнутом виде затруднено и может быть получено численно с использованием ЭВМ. Структурная схема алгоритма расчета и таблица 3.1 уравнений движения режущего лезвия по трем координатам приводятся в диссертации. Приводимые уравнения позволяют определить толщину среза за любой текущий момент или угол поворота заготовки.

Виды инструментов непосредственно определяют схемы срезания припуска, учитывающие число режущих элементов. Σ . Основные требования к схемам резания сформулированы в работах советских ученых И.И.Семенченко, Г.И.Грановского, П.П.Грудова, А.О.Этин, М.И.Юликова. Выбор рациональной схемы срезания припуска представляет наибольшую сложность при переменном резании: фрезеровании и тангенциальном точении. Применительно к эти условиям рассмотрены четыре наиболее распространенные схемы съема припуска: одним резцом на всю ширину и глубину, профильная и две генераторные с прямыми и проходными резцами. Проведен их сравнительный анализ по силе резания F_t , степени ее равномерности по пути резания $k_{\Delta F} = \sum F_i dl / (\Sigma F_{max})$ времени резания и по протяженности рабочих движений в общем цикле обработки $k_{ep} = (\sum l_i) / L$. Сравнение схем срезания припуска подтверждает, что резание с большей толщиной среза выгоднее, чем с большей шириной, и значительно эффективнее цилиндрического фрезерования или профильного протягивания с малыми толщинами, порядка сотых миллиметра. Анализ позволяет выбрать наиболее эффективный способ резания, увеличить производительность фрезерования и протягивания путем кинематического перераспределения параметров среза.

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПЛЕКСНЫХ СПОСОБОВ ЛЕЗВИЙНОГО РЕЗАНИЯ

Во взаимосвязи способов механической обработки резанием (см. рис. 1) с постепенным переходом от классического способа к комплексному базовый способ строгание (С) имеет одно прямолинейное движение резания и периодическую подачу на ход резца. Замена периодической подачи на непрерывную упрощает кинематику станка и улучшает динамику строгания; увеличение скорости непрерывной подачи до скорости главного движения приводит к резанию двумя гранями режущего лезвия и новой конструкции строгального станка, а при замене прямолинейного движения подачи

рических поверхности резцов при соотношении движений токарного строгания обеспечивает обработку цилиндрической поверхности – токарное протягивание (ТП). Из условия минимальной энергоемкости токарного протягивания сталей скорость поступательного движения протяжки должна в 1,7 раза превышать скорость вращения детали.

Разновидности токарного протягивания – челночное и осевое с самовращением детали от протяжки с винтовым зубом имеют эффективную область применения в крупносерийном производстве.

Применение вместо гребенки круглого многолезвийного резца или фрезы и сообщение инструменту вращения вокруг своей оси обеспечивает новый способ токарной обработки – фрезоточение (ФТ). При установке оси резца перпендикулярно к оси детали толщина сечения среза определяется из схемы фрезострогания (6) (см. рис. 3), а длина среза – по числу оборотов заготовки за время контакта режущего лезвия. Рассмотрены разновидности фрезоточения торцовым инструментом, зуботочение долбяком, ротострогание, обработка вращающимися строгальными ножами, волновая лезвийная обработка.

Фрезострогание (ФС) и фрезопротягивание (ФП) имеют преимущества перед фрезерованием, заключающиеся в более равномерной толщине среза и в отсутствии микротолщин при входе зубьев в заготовку. Сравнительный анализ параметров и объема среза при соотношении скоростей фрезерования ($k_c = 10^{-2}$) и фрезострогания ($k_c = 1$) показывает (см. рис. 4), что в последнем случае объем срезаемого металла увеличивается в 100 раз, толщина среза – в 60 раз. Учитывая, что при таком увеличении толщины среза удельная сила резания уменьшается в 17 раз, производительность фрезострогания при неизменной силе резания будет в 20 раз выше. На базе фрезострогания рассматривается модернизация инструмента и способа фрезерования с целью выравнивания толщин среза. Сравнительные данные комплексных и переходных способов лезвийной обработки приведены в таблице 4.1 диссертации.

ГЛАВА 5. РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПЛЕКСНЫХ СПОСОБОВ МАКРОЛЕЗВИЙНОГО И АБРАЗИВНОГО РЕЗАНИЯ

В настоящее время накоплен обширный материал по выбору инструмента и режимов алмазно-абразивной обработки, хорошо изучена физика контактного взаимодействия при скоростном и

сверхскоростном шлифовании, определены основные требования к абразивной обработке, разработаны критерии оценки и сравнения способов (Б.А.Глазовский, П.Е.Дьяченко, М.Г.Ипполитов, А.В.Королев, С.Н.Корчак, Г.Б.Дурье, Н.П.Малевский, Е.Н.Маслов, П.Н.Орлов, А.В.Подзей, С.А.Попов, С.Г.Редько, Л.М.Терещенко, Л.Н.Филимонов, Е.Е.Фрагин, В.А.Хрульков, Л.В.Худобин, И.Х.Чеповецкий, П.И.Ящерицын; из иностранных К.Диттман, К.Гюринг, Г.Молен, Е.Сали).

Повышение эффективности макролезвийной и абразивной обработки возможно за счет изменения кинематических соотношений между заготовкой и инструментом, а также совмещения физико-химических процессов с механическими. Макро- и микролезвийное резание значительно улучшается в комплексных способах, осуществляемых при соизмеримых и равных скоростях заготовки и инструмента. Соизмеримость скоростей позволяет выравнивать толщины среза, удвоить объем срезаемого слоя при неизменной максимальной силе резания (см. рис. 4). Соответственно сокращается путь резания и повышается стойкость инструмента. С учетом уменьшения удельной силы резания производительность резания увеличивается в 3-5 раз. Во взаимосвязи с базовыми способами макролезвийной и абразивной обработки: абразивным точением (ТА), строганием (СА) и шлифованием (Ш), рассмотрены комплексные способы хонингование (Х), шлифострогание (ШС), шлифоточение (ШТ) (см. рис. 1). Применительно к иглолезвийной обработке комплексными способами являются иглотокарное строгание (ИТС), иглофрезострогание (ИФС), иглофрезоточение (ИФТ).

Шлифострогание цилиндрическим кругом обеспечивает повышение производительности съема по сравнению с плоским шлифованием в десятки раз при неизменной удельной силе резания. Шероховатость обработанной поверхности определяется зависимостью $H = \frac{P_t k_c}{8R(k_c + 1)}$, где P_t - средний шаг режущих зерен, $k_c = v_{ca}/v_w$ - соотношение скоростей заготовки и круга. Шлифострогание торцовым инструментом обеспечивает сетку траекторий хонингования. Угол пересечения траекторий пропорционален k_c и увеличивается по мере перехода от попутного к встречному направлению движений.

Волновая абразивная обработка обеспечивает бегущий контакт и непрерывное обновление режущего участка инструмента. Соотношение скоростей движений может находиться в широких пределах от абразивного точения до шлифования.

При вращении заготовки и возвратно-поступательном движении инструмента с соизмеримой скоростью, обеспечивается перекрестная сетка траекторий на цилиндрической поверхности. Хонингование шлифовальным кругом — шлифхонингование (ШХ) позволяет вести обработку наружных и внутренних поверхностей со скоростью на полтора-два порядка выше, чем обычное хонингование. При этом повышаются производительность и на порядок стойкость инструмента; снижаются энергозатраты.

Разновидности шлифхонингования определяются формой и положением круга. Особенно эффективно перекрестное шлифхонингование торцом чашечного круга, в том числе сферическим для обработки желобов и фасонных поверхностей. Равные скорости инструмента и заготовки позволяют при средней скорости круга (30–40 м/с) осуществлять высокоскоростное шлифхонингование (60–80 м/с). Такой способ на порядок эффективнее по удельным энергозатратам и технически проще традиционному наращивания скорости шлифовального круга до 80–100 м/с.

Эффективные области применения различных способов шлифования представлены на рис. 6.

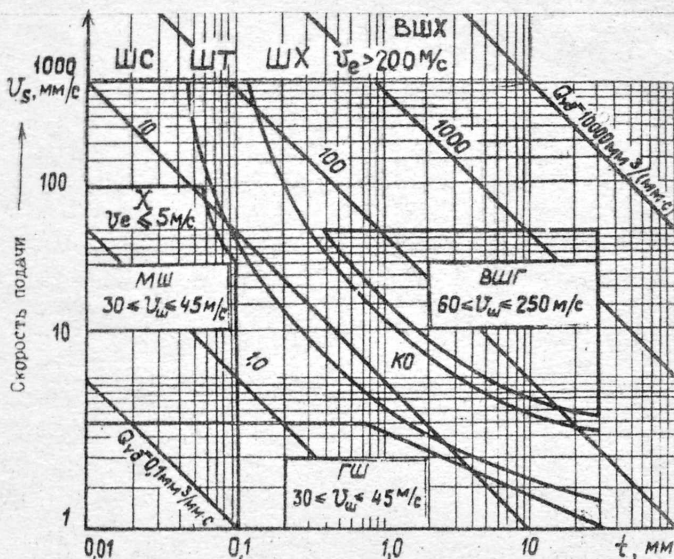


Рис. 6 Области применения способов шлифования.

Взаимосвязь способов макролезвийной и абразивной обработки позволила усовершенствовать классические способы круглого и плоского шлифования. Замена традиционной прерывистой поперечной подачи на непрерывную повышает стойкость кругов, производительность и точность обработки в 5-6 раз. Имеет перспективы многошпиндельное шлифование, высокая производительность которого обеспечивается непрерывностью подачи, соизмеримыми скоростями заготовок и круга, прерывистым контактом круга и надежным охлаждением заготовок за время их свободного пробега.

ГЛАВА 6. КОМБИНИРОВАННЫЕ СПОСОБЫ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ И ОСНОВЫ ПРОГРАММИРОВАННОГО ПОИСКА НОВОГО СПОСОБА

Комплексные способы механической обработки резанием входят в многообразную систему комбинированных способов, различающихся видами воздействия, обрабатываемыми инструментами, приемами реализации. Простые способы образуют комбинации, число которых определяется сочетаниями составляющих способов одного и нескольких уровней. Для поискового проектирования способов предложена классификация по уровням значимости, которая детализирована по классу резания и позволяет рассматривать простые и комбинированные способы.

Комбинированные способы межклассового уровня основаны на сочетании различных видов воздействия, зависящих от материала и величины припуска.

В комбинированных способах подклассового уровня с одинаковым характером воздействия используются инструменты с различной рабочей частью: абразивные, иглолезвийные, лезвийные. Комбинированные способы межгруппового уровня (комплексные) подробно рассмотрены в главах 3-5.

Комбинации способов с использованием различных по форме режущих инструментов характеризуются многообразием схем срезания припуска при кинематической общности главных движений. В качестве режущих инструментов используются резцовые гребенки, комбинированные фрезы, осевые инструменты, сверла-метчики и резцовые головки. Параллельно-смешанная комбинация способов является наиболее распространенной, она позволяет осуществлять одним инструментом фрезепротягивание, сверление, растачивание и зенкерование; протягивание резб; тангенциальное точение.

Комбинации способов обработки по форме режущих инструментов позволяют выровнять и уравнивать силы резания, сократить переходы, уменьшить время контакта резцов с деталью и повысить стойкость инструмента. Комбинация резцов в одном инструменте повышает точность настройки и точность обработанных поверхностей, увеличивает производительность и упрощает станочные движения. Комбинация двух и более подач имеет место в диагональном фрезеровании, копировально-тангенциальном точении, адаптивном управлении подачей.

Перспективными являются способы с синергетическим эффектом, обеспечиваемым специальными инструментами или режимами обработки: точение и выглаживание конусным резцом; резание дисками трения, обеспечивающее термообработку поверхностного слоя; бескопирное точение прямым резцом фасонных поверхностей с касательной подачей.

Комбинации способов различных уровней, разнообразных видов обработки позволяют совместить сварку трением и срезание избыточного слоя; термоточение, нанесение покрытий и выглаживание. Одной из главных процедур при проектировании технологических процессов на ЭВМ является выбор рационального способа формообразования. Не упрощая задачу поиска нового способа формализацией предопределенных решений, предлагаемая методология сочетает творческий процесс на высших уровнях с компьютерным анализом на низших уровнях классификации. Структурная схема алгоритма поиска способа предполагает диалоговый режим ЭВМ при выборе типа способа с программированным анализом технологического режима (рис. 7). В процессе программированного поиска ведется кодирование признаков способа в буквенно-цифровом коде (БЦК). Русскими буквами обозначены подклассы, группы и виды способов, римскими цифрами уровни классификации в возрастающем порядке по мере понижения уровня, арабскими цифрами — число движений и соотношение скоростей в группах способов, вид подачи в типе способа. Коэффициенты соотношения скоростей базовых способов определяются графически, через соотношения углов на круговой диаграмме взаимосвязи способов (см. рис. 1), которые соответствуют угловым частотам вращения заготовки ω_r и инструмента ω_g при равенстве радиусов вращения:

$k_r = (120^\circ - \omega_r) / \omega_r$; $k_g = \omega_g / (120^\circ - \omega_g)$; $k_{cr} = \omega_r / (120^\circ - \omega_r)$.
Уровень базовой скорости учитывается скоростным коэффициентом k_v .

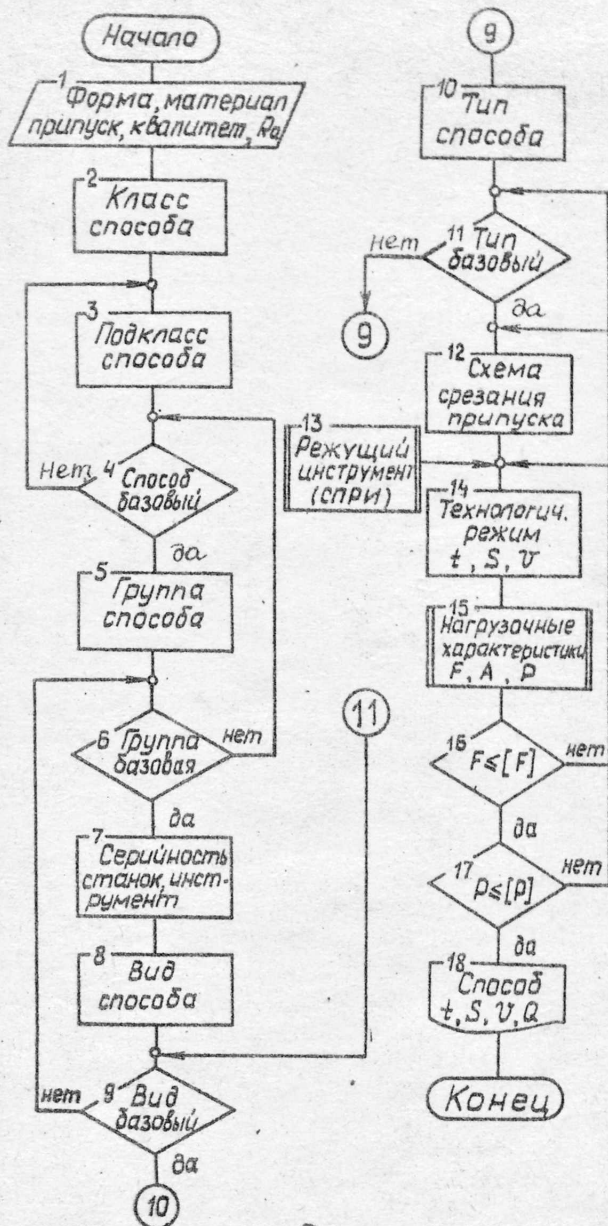


Рис. 7 Структурная схема алгоритма поиска способа механической обработки

Например, в коде БИКС запись способа фрезоточения глухих кольцевых канавок, полученного поисковым проектированием, имеет вид П М ШЗ 10^3 Т С 120Φ 2 IY OG Y4 и расшифровывается как многолезвийное резание (П М) при трех главных движениях (ШЗ) точения (Т), строгания (С) и фрезерования (Φ), с соотношением на единицу прямолинейной скорости (С) 10^3 скорости точения (Т) и 120 скорости фрезерования (Φ) и сочетающихся в двух плоскостях (2). Инструмент огибающего типа (IY OG); движение подачи - продольное (Y4).

Режимы выбираются (см. рис. 8 блок I2) по характеристике обрабатываемого материала согласно нормативным данным и посредством скоростного коэффициента для суммарной скорости от составляющих движений вводятся в формулу способа.

ГЛАВА 7. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СТАНОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ, РАЗРАБОТКА НОВЫХ МЕТАЛЛОРЕЗУЩИХ СТАНКОВ И АВТОМАТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

На основе системного анализа взаимосвязи способов механической обработки резанием выявлены дополнительные технические требования к станочному оборудованию. Важнейшие из них: наличие двух и трех главных движений, соизмеримость мощности и диапазонов скоростей приводов заготовки и инструмента, самоадаптирующаяся кинематическая связь заготовки с инструментом, непрерывность движений подач, оснащение суппорта инструментальным шпинделем, компоновка металлорежущих станков по типу прокатно-штамповочного оборудования. Показаны направления развития станков и станочных систем (табл. 7.1 дисс).

Приведены кинематические и конструктивные схемы типовых представителей перспективных станков: тангенциального и поперечно-винтового точения, фрезотокарного с самоадаптирующейся кинематической связью приводов заготовки с инструментом, широкоуниверсального зубообрабатывающего с ЧПУ, многоцелевого токарного с барабанным суппорт-магазин-оператором, барабанного плоскошлифовального, шлифохонинговального.

Представлена классификация станочного оборудования непрерывного действия, учитывающая особенности формообразующего транспортного движения, в том числе и периодического, совмещенного с технологическим (Рис. 8). Учтены и наиболее прогрессивные технологические процессы, когда сам объект обработки служит одновременно транспортным средством: прутки и

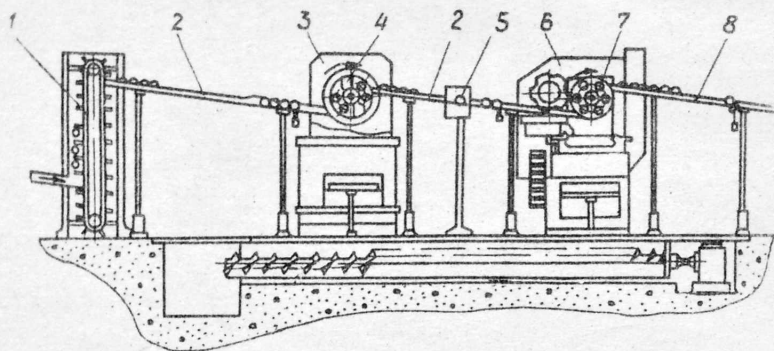


Ⓘ — лентонавивочные (валы, корпуса, кольца)

Рис. 8 Классификация станочного оборудования непрерывного действия

штанги на бесцентровой, фасонно-продольной и поперечно-винтовой обработке, ленты на штамповочных автоматах и на специальных технологических машинах, например, лентонавивочных для производства витых валов, втулок, корпусов. Классификация позволила помимо традиционных роторных машин с независимым транспортным движением выявить новые группы станков непрерывного действия, в которых транспортное движение входит в кинематику движений резания.

Рассмотрены особенности и схемы обработки перспективных металлорежущих станков непрерывного действия: горизонтальных роторно-токарных и шлифовальных, поперечно-винтового точения и шлифования. На их базе разработаны принципиальные схемы линий непрерывного действия: роторной (рис.9) и поперечно-винтовой обработки, неизвестные за рубежом.



1 - Магазин заготовок, 2 - лоток, 3 - роторный торцецентрировальный автомат, 4 - шпиндельный блок, 5 - лазерный индикатор, 6 - роторный токарный автомат с ЧПУ, 7 - шпиндельный блок, 8 - лоток деталей

Рис. 9 Заготовительно-токарный участок роторно-конвейрной линии по обработке валов

Особенностью горизонтальной роторной линии, предназначенной для обработки валов и фланцев, является горизонтальная компоновка роторов, простота транспортных средств — лотков, служащих одновременно накопителями, возможность одновременной обработки двух деталей из одной заготовки, надежное кинематическое деление стружки на короткие отрезки, быстрота переналадки от системы ЧПУ. Производительность линии при обработке валов диаметром до 100 мм и длиной до 1000 мм — 120...60 шт/ч.

Линия поперечно-винтовой обработки предназначена для производства фасонных тел вращения типа подшипниковых колец. Она увязывает в единый технологический процесс металлургическое (стан поперечно-винтовой прокатки), металлорежущее (станки поперечно-винтового точения и шлифования) и термическое оборудование. Сквозная обработка способами различных классов по единой схеме обеспечивает единство баз и транспортной системы, идентичность форм инструментов. По сравнению с традиционными автоматизированными участками на базе ППС линия ПВО значительно проще и занимает площадь в 3 раза меньше. Достигается экономия электроэнергии за счет использования тепла металлургического процесса для резания с подогревом на последующих операциях. Линия обладает высокой мобильностью; время переналадки составляет 1...2 ч. Производительность линии при обработке подшипниковых колец в час диаметром 70-80 мм — 600 шт/ч.

Сочетание предельной простоты с высокой производительностью и гибкостью обеспечивают наибольшую эффективность линий в быстросменном массовом и крупносерийном производстве.

ВЫВОДЫ

1. Рассмотрена взаимосвязь способов механической обработки резанием, заключающаяся в переходе классических способов обработки из одного вида в другой через комплексные способы с соизмеримыми скоростями составляющих движений по мере изменения кинематико-технологических признаков: соотношения скоростей прямолинейного и вращательного движений заготовки инструмента, числа режущих лезвий, параметров среза.

2. Исследованы две принципиальные группы комплексных способов, сочетающих движения в одной плоскости и во взаимоперпендикулярных плоскостях. Показано, что соотношение скоростей

составляющих движений в области от 0,2 до 5 обеспечивает увеличение объема срезаемого материала при уменьшении пути и удельной силы резания.

3. Уточнено понятие скорости резания применительно к базовым способам обработки: точению, строганию и фрезерованию (шлифованию); введено понятие обобщенной скорости резания — скорости формообразования, дано представление о двух и трех главных движениях.

4. Разработан комплексный метод исследования способа резания, включающий непрерывное получение корней стружек убывающей толщины, экспресс-поиск оптимальной скорости резания путем измерения сил резания, температур и вибраций в нормативном поле скоростей. Предложен кинематико-технологический метод анализа способов механической обработки, в основу которого положены кинематика резания, схема срезания припуска, единство режущего клина всех видов режущего инструмента, корреляционная связь стойкостных и силовых зависимостей от скорости резания, энергетические и стойкостные критерии оценки производительности обработки.

5. Установлена обратно пропорциональная связь линейной стойкости и силы резания в зависимости от скорости резания, позволяющая эффективно использовать систему адаптивного управления режимами резания. Разработан энергостойкостный критерий оценки эффективности способов механической обработки — удельная разрешающая сила резания, учитывающая параметры среза и стойкость режущего элемента.

6. Представлена методология поискового проектирования новых способов механической обработки. Она включает кодирование способов на базе общей классификации, определение параметров резания для конкретных видов механической обработки на основе общих уравнений кинематики движения; сравнительную оценку по удельной и суммарной силам резания, энергостойкостному критерию.

7. На теоретических положениях взаимосвязи способов резания разработаны десятки новых способов лезвийной, абразивной и комбинированной механической обработки. Среди них: токарное строгание, осевое протягивание с круговой подачей, фрезоточение, поперечно-винтовое и продольно-тангенциальное точение, зуботочение, многшпиндельное шлифование, шлифохонингование, шлифоточение и шлифострогание, волновое и реверсивное

резание.

8. Разработаны новые требования к металлорежущим станкам. С их учетом и на базе комплексных способов предложены принципиально новые станки роторной, поперечно-винтовой и комбинированной обработки, непрерывного протягивания, шлифоконингования, сверхскоростного резания, с самонаращивающейся кинематической связью приводов, с одинаковым распределением мощности между ними, а также гибкие автоматические линии с непрерывным сквозным потоком различных видов производств.

По теме диссертации опубликовано свыше 300 работ, из них 12 монографий, один учебник, 212 изобретений, 87 научных статей. Основное содержание диссертации отражено в следующих работах:

1. Ермаков Ю.М. Анализ схем съема припусков при наружной обработке тел вращения попутным точением // Станки, технология инструмент. - М.: МВТУ им.Н.Э.Баумана, 1969. - С. 73-88.
2. Ермаков Ю.М. Комбинированные методы обработки на базе тангенциального точения // Станки и инструмент. - 1977. - № 10. С.17-20.
3. Ермаков Ю.М. Осевое протягивание отверстий с круговой подачей // Станки и инструмент. - 1978. - № 12 - С. 26-28.
4. Ермаков Ю.М. Технология и станки тангенциального точения. - М.: Машиностроение. - 1979. - 152 с.
5. Ермаков Ю.М. Комбинированная бесцентровая механическая обработка колец на жестких опорах // Вестник машиностроения. - 1980. - № 6. - С. 49-52.
6. Ермаков Ю.М. Перспективы эффективного применения абразивной обработки. - М.: НИИМаш, 1982. - 56 с.
7. Ермаков Ю.М. Современные тенденции в развитии лезвийной обработки. - М.: НИИМаш, 1983. - 68 с.
8. Ермаков Ю.М. Круглое шлифование с непрерывной поперечной подачей // Машиностроитель. - 1984. - № 4. - С. 21-22.
9. Ермаков Ю.М., Ершов А.А. Перспективы применения алмазного выглаживания. - М.: НИИМаш, 1984. - 64 с.
10. Ермаков Ю.М. Состояние и тенденции развития комбинированных способов механической обработки. - М.: ВНИИТЭМР, 1985. - 48 с.
11. Ермаков Ю.М., Фролов Б.А. Металлорежущие станки. - М.: Машиностроение, 1985. - 320 с.

12. Ермаков Ю.М. Выбор оптимальной скорости резания на основе стойкостной зависимости для режущего инструмента. - М.: ВНИИТЭМР, 1986. - 64 с.
13. Ермаков Ю.М., Степанов Ю.С., Кулаков А.Ф. Повышение точности продольного круглого шлифования в системе СПИД переменной жесткости // Станки и инструмент. - 1986. - № 9 - С. 21-23.
14. Ермаков Ю.М. Эффективность механической обработки упруго-демпфированными инструментами. - М.: ВНИИТЭМР, 1987. - 48 с.
15. Ермаков Ю.М. Перспективы развития и эффективного использования режущего инструмента // Станки и инструмент. - 1988. - № 2. - С. 16-19.
16. Ермаков Ю.М. Перспективы применения способов реверсивного резания. М.: ВНИИТЭМР, 1988. - 62 с.
17. Ермаков Ю.М. Развитие способов ротационного резания. - М.: ВНИИТЭМР, 1989. - 56 с.
18. Ермаков Ю.М. Перспективы развития технологических процессов и автоматических линий для механической обработки тел вращения. - М.: ВНИИТЭМР, 1990. - 64 с.
19. Ермаков Ю.М. Взаимосвязь способов резания как основа развития металлообработки. // Проблемы эксплуатации инструмента в металлообрабатывающей промышленности. - М.: ЦРДЗ, 1992. - С. 7-14.
20. Ермаков Ю.М. К вопросу о стойкости // Станки и инструмент. - 1992. - № 8. - С. 37.
21. Ермаков Ю.М., Степанов Ю.С. Современные способы эффективной абразивной обработки. - М.: ВНИИТЭМР, 1993. - 64 с.
22. Ермаков Ю.М. Не легкие пути растачивания // Станки и инструмент. - 1993. - № 3. - с. 30-36.
23. Ermakow J., Matthias E. Besonderheiten des Tangentialdrehens mit geradlinigem Vorschub // Fertigung, (Bern). - 1974. - Nr.1. - S.9-15.
24. Ermakow J., Matthias E. Spanbildung beim Tangentialdrehen // Fertigung, (Bern). - 1974. - Nr.2. - S.45-48.
25. А.с. 201873 СССР, МКИ В23В 1/01. Способ обработки тел вращения резцовой головкой. /Ю.М.Ермаков // БИ. -1967. - № 18.
26. А.с. 261865 СССР, МКИ В23В 1/01. Способ обработки металлов со снятием стружки многолезвийным инструментом. /Ю.М.Ермаков и Б.А.Фролов // БИ. - 1970. - № 5.

27. А.с. 268129 СССР, МКИ В23Д 37/00. Способ протягивания /Ю.М.Ермаков // БИ. - 1970 - № 13.
28. А.с. 310745 СССР, МКИ В23Д 7/00. Способ строгания. /Ю.М.Ермаков и Б.А.Фролов // БИ. - 1971. - № 24.
29. А.с. 338308 СССР, МКИ В23В 29/03. Комбинированный инструмент /Г.А.Шаумян, Ю.М.Ермаков и В.В.Сутугин// БИ. - 1972. - № 16.
30. А.с. 354987 СССР, МКИ В24В 5/12. Устройство для одновременного шлифования наружных и внутренних поверхностей /Ю.М.Ермаков и Б.А.Фролов// БИ. - 1972. - № 31.
31. А.с. 393072 СССР, МКИ В24В 1/00. Способ механической обработки тел вращения / Ю.М.Ермаков // БИ. - 1973. - № 33.
32. А.с. 465274 СССР, МКИ В23В 1/00. Способ токарной обработки./Ю.М.Ермаков и Б.А.Фролов// БИ. - 1975. - № 12.
33. А.с. 465275 СССР, МКИ В23В 1/00. Способ фасонной обработки / Б.А.Фролов и Ю.М.Ермаков // БИ. - 1975. - № 12.
- 34.А.с. 476099 СССР, МКИ В23В 35/00. Способ вибрационного сверления /Ю.М.Ермаков// БИ. - 1975. - № 25.
35. А.с. 552138 СССР, МКИ В23В 1/00. Способ получения корней стружки /Ю.М.Ермаков// БИ. - 1977. - № 12.
36. А.с. 563218 СССР, МКИ В23В 1/00. Способ тангенциального точения./Ю.М.Ермаков// БИ. - 1977. - № 24.
37. А.с. 566687 СССР, МКИ В23Г 5/12. Способ нарезания цилиндрических зубчатых колес / Ю.М.Ермаков// БИ. - 1977. - № 28.
38. А.с. 592581 СССР, МКИ В24В 37/04. Устройство для плоско-параллельной доводки / Ю.М.Ермаков// БИ. - 1978. - № 6.
39. А.с. 622579 СССР, МКИ В23В 1/00. Способ обработки металлов резанием /Ю.М.Ермаков// БИ. - 1978. - № 33.
40. А.с. 626937 СССР, МКИ В24В 1/00. Способ круглого шлифования /Ю.М.Ермаков// БИ. - 1978. - № 37.
41. А.с. 715293 СССР, МКИ В24В 1/00. Способ механической обработки тел вращения /Ю.М.Ермаков // БИ. - 1980. - № 6.
42. А.с. 764942 СССР, МКИ В24В 1/00. Способ абразивной обработки / Ю.М.Ермаков// БИ. - 1980. - № 35.
43. А.с. 818824 СССР, МКИ В24В 1/00. Способ плоского шлифования /Ю.М.Ермаков// БИ. - 1981. - № 13.
44. А.с. 878458 СССР, МКИ В23Г 5/12. Способ нарезания конических колес /Ю.М.Ермаков// БИ. - 1981. - № 41.
45. А.с. 910365 СССР, МКИ В23В 1/00. Способ обработки резанием самовращающимися многолезвийными инструментами // БИ.-1982.-№ 9.

46. А.с. I060347 СССР, МКИ В23С 3/00. Автомат для обработки деталей кольцевого периодически повторяющегося профиля /Ю.М.Ермаков // БИ. - 1983. - № 46.
47. А.с. I117193 СССР, МКИ В23В 1/00. Способ круглого шлифования /Ю.М.Ермаков// БИ. - 1984. - № 37.
48. А.с. I240498 СССР, МКИ В23В 1/00. Способ механической обработки со снятием стружки /Ю.М.Ермаков// БИ. - 1986. - № 24.
49. А.с. I248768 СССР, МКИ В24В 5/04. Способ круглого шлифования /Ю.М.Ермаков, В.В.Блохин, С.Д.Гарцман, З.П.Каретный, А.А.Осокин и А.А.Филатов// БИ. - 1986. - № 29.
50. А.с. I266664 СССР, МКИ В23В 27/00. Режущая вставка /Ю.М.Ермаков// БИ. - 1986 - № 40.
51. А.с. I393534 СССР, МКИ В23В 27/16. Резец /Ю.М.Ермаков // БИ. - 1988. - № 17.
52. А.с. I397201 СССР, МКИ В23Г 5/16. Способ долбления зубчатых колес и инструментальный суппорт для его осуществления. /Ю.М.Ермаков, В.С.Шашкин, Б.А.Фролов, Л.А.Роговский, Б.В.Рябов // БИ. - 1988. - № 19
53. А.с. I553289 СССР, МКИ В23С 3/04. Способ обработки тел вращения и инструмент для его осуществления /Ю.М.Ермаков // БИ. - 1990. - № 12.
54. А.с. I590342 СССР, МКИ В24В 5/18. Устройство для круглого бесцентрового шлифования// В.В.Блохин, Ю.М.Ермаков// БИ. - 1990. - № 33.
55. А.с. I715520 СССР, МКИ В23Г 5/12. Универсальный зубообрабатывающий станок с ЧПУ /Ю.М.Ермаков, М.А.Биканов, Б.А.Фролов, Ю.В.Базаров, В.В.Денисов// БИ. - 1992. - № 8.
56. А.с. I602695 СССР, МКИ В23Q 41/00. Автоматическая линия для обработки деталей типа тел вращения /Ю.М.Ермаков// БИ. - 1990. - № 40.
57. А.с. I646796 СССР, МКИ В23Q 41/02. Автоматическая линия для бесцентровой обработки деталей // Ю.М.Ермаков, Ю.В.Пальцев, А.В.Чурилин, В.В.Зиновьев, Н.А.Кобзев// БИ. - 1991. - № 17.

