

л 494615

МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА,
ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ
И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.Э.БАУМАНА

На правах рукописи

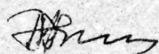
МАМЕДОВ ДЖАББАР МИРЗА оглы

УДК 621.73:681.3

ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ
МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПУТЕМ УПРАВЛЕНИЯ СИЛОВЫМ ПОЛЕМ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Специальность 05.02.08 -- Технология
машиностроения

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук



Москва - 1991

Работа выполнена в Азербайджанском политехническом
институте

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Митрофанов В.Г.
доктор технических наук,
профессор Чернянский П.М.
доктор технических наук,
профессор Ямников А.С.

Ведущая организация - Оргстанкинпром, г.Москва

Защита диссертации состоится "___" апрель 19 91 г.
на заседании специализированного совета Д053.15.04 в Московском
государственном техническом университете им. Н.Э.Баумана по адре-
су

библиотеке МГТУ

не, заверенный

г.

Б.А.

Э.Баумана

Подпи
Объем

И 498615

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Решениями партии и правительства в программе модернизации машиностроительного комплекса страны важное место уделяется задачам дальнейшего повышения технического уровня и качества выпускаемой продукции с доведением их параметров до уровня высших мировых образцов.

Важную роль в решении этих задач играет проблема повышения точности и производительности механообработки.

Проблемы точности и производительности особую актуальность приобретают в условиях комплексной автоматизации производства на основе технологического оборудования с ЧПУ, робототехнических систем, информационной и управляющей техники, где точность обработки достигается с помощью заранее разработанной программы управления, либо путем управления ходом технологического процесса.

Вопросы точности и производительности обработки, как важнейшие взаимозависимые показатели процесса, следует рассматривать совместно. Наиболее эффективными следует считать разработки, позволяющие одновременное повышение точности и производительности обработки.

Тенденция современного машиностроения по дальнейшему совершенствованию технологического оборудования, оснастки и инструмента существенно ограничивается в связи с трудоемкостью и сложностью решения задачи обеспечения точности, особенно при многоинструментной обработке, которая строится по принципу высокой концентрации переходов. Этим в частности объясняются нестабильные показатели многоинструментной обработки по качеству и производительности, что в свою очередь обуславливает ограничение области их использования.

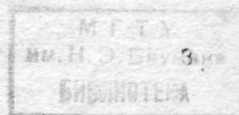
К настоящему времени достигнуты значительные успехи в решении проблемы обеспечения точности и производительности обработки; разработаны научные основы формирования погрешностей изготовления деталей на различных станках, созданы методы расчета, учитывающие действие многочисленных факторов на выходные показатели технологического процесса. Однако, несмотря на достигнутые успехи, недостаточное внимание уделено комплексному подходу к решению проблемы точности. Имеющиеся рекомендации носят ориентировочный характер, которые при практическом использовании на конкретном технологическом оборудовании требуют дополнительного экспериментального уточнения.

НИИ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1497615

Мамедов Д.М. Основы повыше



Важность силового фактора, действующего в процессе обработки, его доминирующий характер обусловило большое количество исследований, посвященных его изучению и разработке путей, способов, методов по снижению влияния этого фактора как на точность, так и на производительность обработки. Однако, многочисленные частные решения (учитывающие ту или иную силу) вызывают серьезные затруднения в поиске оптимальных решений в каждом конкретном случае, не позволяют в полной мере эффективно использовать приобретенное знание в этой области.

В связи с изложенным приобретают особую актуальность как в научном, так и в практическом плане решение важной научной проблемы — разработка научных основ управления силовым полем технологического процесса, включающих в себя: основы теории силового поля, создание расчетной основы комплексного учета всех действующих сил, формирующих силовое поле (СП), с целью разработки наиболее эффективного технологического процесса механической обработки, установление и исследование зависимостей между обобщенными характеристиками СП и погрешностями обработки, разработку путей, методов и принципов управления СП.

Решение этой научной проблемы обеспечит одновременное повышение точности и производительности механической обработки, особенно при многоинструментной и многошпиндельной обработках.

Цель работы — повышение точности и производительности механической обработки деталей на станках путем управления СП, действующим в технологической системе.

Методы исследований. Проведение исследований базировалось на научных основах технологии машиностроения теории базирования, размерного анализа, расчетов на точность, методах математического моделирования на ЭВМ, математического программирования, теории автоматического регулирования и адаптивных систем, основных положений теоретической механики, теории бесконечно малых, геометрических преобразований.

Автор защищает научные основы управления СП, включающие:

1. Понятие технологического СП, позволяющее описать механизм образования погрешностей обработки, обусловленных действием силового фактора технологического процесса.
2. Закономерности формирования СП, раскрывающие совместные влияния действующих в технологической системе сил, их величин, направлений и точек приложения на возникновение погрешности обработки под каждым инструментом в каждый момент времени обработ-

ки.

3. Методы прогнозирования точности механической обработки.
 4. Методы оценки по критерию точности обработки компоновку станка, инструментальной наладки, геометрии режущего инструмента, режимов резания.
 5. Методы разработки операции технологической системы, обеспечивающей наилучшие обобщенные характеристики СП.
 6. Математическую модель процесса образования погрешностей обработки на основе зависимостей между обобщенными характеристиками СП и погрешностями обработки, которая позволяет проводить исследование как при одноинструментной, так и при многоинструментной и многошпиндельной обработках.
 7. Пути управления СП, осуществляемые изменением характеристик и состава сил, действующих в технологической системе и приложением внешних сил к этой системе.
 8. Методы управления СП технологической системы как с помощью разработанной программы, так и путем слежения и внесения коррективов в процессе обработки.
 9. Принципы управления СП технологической системы: обеспечением заданной точности обработки, выбором управляющих воздействий переменных, управлением характеристиками СП заготовки или режущего инструмента.
 10. Научно-обоснованную классификацию СП технологической системы по обобщенным характеристикам и функциональные связи между обобщенными характеристиками СП, упругими перемещениями технологической системы и погрешностью обработки.
 11. Результаты теоретических и экспериментальных исследований закономерностей влияния обобщенных характеристик СП и их управления на показатели эффективности технологического процесса.
 12. Системы управления СП технологического процесса.
- Научная новизна. Введено понятие технологического СП и его главные характеристики.
- Предложена модель силового воздействия на технологическую систему.
- Раскрыт механизм формирования погрешностей при последовательном и одновременном изготовлении детали несколькими однотипными и разными инструментами.
- Разработаны методы:
- прогнозирования точности обработки;
 - оценки по критерию точности, обработки: компоновки станка, инструментальной наладки, геометрии режущего инструмента, режимов

резания как в отдельности так и в их совокупности.

- разработки операции проектирования технологической системы, обеспечивающих наилучшие обобщенные характеристики СП.

Разработана научно-обоснованная классификация СП технологической системы по обобщенным характеристикам и функциональные связи между обобщенными характеристиками, упругими перемещениями технологической системы и погрешностью обработки.

Разработаны пути, методы и принципы управления СП, предполагающие управление теми или иными параметрами, определяющими ход технологического процесса с целью повышения его эффективности.

Практическая ценность работы. Проведенные в работе исследования позволили создать расчетную основу комплексного учета всех действующих сил и моментов с целью разработки наиболее эффективного технологического процесса изготовления деталей на станках.

Разработаны методики для:

- прогнозирования точности обработки;
- компоновки станка и инструментальной наладки;
- разработки операции технологической системы, обеспечивающих наилучшие обобщенные характеристики СП.

Разработаны алгоритмы и программы к ЭВМ для расчета точности обработки.

Разработаны системы управления СП технологического процесса.

Реализация результатов работы. Результаты работы реализованы и внедрены на поточно-механизированной линии по изготовлению замков на машиностроительном заводе им.С.М.Кирова (г.Баку), на резбонарезных станках в ПО "Куйбышевбурмаш" (Минхимнефтемаш), на головках для круглых гребенок и контрольных приспособлениях в Московском инструментальном заводе (Минстанкопром), на муфтообрабатывающих патронах в Азербайджанском трубопрокатном заводе им. В.И.Ленина (Минчермет).

Результаты исследований используются в Всесоюзном научно-исследовательском и проектно-технологическом институте нефтяного машиностроения (ВНИИПНефтемаш) при разработке технологических процессов механической обработки, создании специальных станков и технологической оснастки.

Эффективность внедренных результатов работы составляет более 1,5 миллионов рублей.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы регулярно докладывались и обсуждались на республиканских, закар-

казских и всесоюзных научно-технических конференциях (1968-1989г.).

Полное изложение содержания диссертации обсуждалось: на расширенных заседаниях кафедры "Металлорежущие станки и инструменты" Азербайджанского политехнического института им. Ч.Ильдырма, на кафедре "Технология газонефтяного и нефтехимического машиностроения и приборостроения МИНХ и ГП им. Губкина, на кафедре "Технология механосборочного производства" МГТУ им. Н.Э.Баумана.

Публикации. Основные содержания диссертации изложены в 31 научных трудах. По теме диссертации, получено 3 авторских свидетельства на изобретения.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 7 глав, практических рекомендаций, общих выводов, списка литературы из 224 наименований и приложения.

Работа содержит 261 страниц машинописного текста, 94 рисунков, 12 таблиц, 18 страниц текста приложений.

Общий объем работы составляет 356 страниц сквозной нумерации.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение. Во введении показана актуальность проблемы повышения точности и производительности станков и ограниченные возможности традиционных путей ее решения. Обоснована необходимость нового научного подхода к решению проблемы – разработки научных основ управления СП технологического процесса и создание аппарата, с помощью которого на основе всестороннего и комплексного учета действующих сил становится возможным разработка наиболее эффективного технологического процесса изготовления деталей на станках.

В связи с неуклонным повышением требований к точности обработки, изучению и решению вопросов этой проблемы уделяется неослабное внимание со стороны исследователей, проектировщиков и работников промышленности.

Большой вклад в создание и развитие науки о точности механической обработки внесли А.П.Соколовский, В.М. Кован, В.С.Корсаков, Б.С.Балакшин, Э.А.Сатель, А.Б.Яхин, А.Н.Гаврилов, А.М.Дальский, А.А.Маталин, В.Г.Митрофанов, Б.М.Базров и другие ученые.

Вопросам точности и производительности станков, в известной мере обуславливающих точность и производительность механической обработки посвящены работы Д.Н.Решетова, А.С.Проникова, В.А.Кулинова, Г.А.Шаумяна, Л.И.Волчекевича, В.В.Каминской, З.М.Левиной, В.Э.Пуша, В.Н.Подураева, П.М.Чернянского, В.Ф.Горнева, В.Т.Порт-

мана и других.

1. Состояние проблемы повышения точности и
производительности изготовления
деталей на станках.

На сегодня значительное развитие получили методы изучения образования погрешностей изготовления деталей под действием отдельных технологических факторов. Обоснована необходимость развития методов изучения суммарной погрешности, учитывающих взаимосвязанное влияние всех действующих факторов.

Комплексный учет всех сил и моментов, действующих в технологической системе делают механизм упругих перемещений этой системы весьма сложным и многообразным, особенно при многоинструментной и многошпиндельной обработках.

Известно, что в процессе механической обработки заготовок на станках технологическая система находится под действием большого количества силовых факторов. К ним относятся силы резания, силы закрепления заготовки, силы трения, инерционные силы, силы, обусловленные технологическими остаточными напряжениями, силы тяжести элементов системы и др. Характеристики указанных сил в процессе обработки изменяются во времени и в пространстве. Следовательно, технологическая система в процессе обработки находится под воздействием переменного СП.

Силовым полем технологической системы называется часть пространства, в котором силовые факторы действуют на элементы этой системы.

В технологической системе под воздействием СП возникают упругие перемещения ее элементов, что вызывает изменение состояния обрабатываемой заготовки. Такое изменение чаще всего связано с возникновением погрешностей.

В основе поиска путей сведения к минимуму влияния силовых факторов на упругие перемещения деталей технологической системы лежит изучение структуры СП, его характеристик, обусловленных составом, величинами, направлениями и точками приложения сил, формирующих СП.

Поскольку погрешности обработки детали обуславливаются нарушениями заданного относительного расположения и движения режущего инструмента и заготовки, то любые силовые факторы, созданные любыми причинами (резание, закрепление, инерция, тепло и др.) должны быть приведены к заготовке и инструменту, так как их взаимодействие формирует точность обработки (и качество вообще).

Размерный анализ технологической системы показывает, что в общем случае обработки с помощью ряда инструментов заготовка своими размерами входит в размерные цепи каждого инструмента, являясь общим звеном этой системы. Следовательно, изменение положения заготовки под действием силового фактора одного инструмента будет сказываться на точности обработки ее поверхностей, обрабатываемых другими инструментами. Отсюда становится очевидной важность задачи сведения к минимуму изменения положения именно заготовки под действием силового фактора.

Если представить, что во время обработки заготовка не меняет своего первоначального положения, т.е. обеспечена определенность базирования, то погрешность обработки каждой поверхности будет возникать только от перемещений инструмента, обрабатывающего данную поверхность. Однако, значительную часть этой погрешности легко сократить корректировкой размера статической настройки, а оставшую часть можно свести к минимуму, повысив жесткость ветви размерной цепи инструмента.

Для оценки совокупного влияния силового фактора технологической системы на точность обработки необходимо установить количественное и качественное выражения СП.

2. Силовое поле технологической системы и его характеристики.

В общем случае заготовка, обрабатываемая с помощью n инструментов, находится под действием системы сил $\vec{P}_1, \vec{P}_2, \dots, \vec{P}_n, \dots, \vec{P}_N$, образующих переменное СП технологической системы. Пользуясь методом теоретической механики произвольную пространственную систему сил, действующую на заготовку можно заменить главным вектором $\vec{R}_z^r$, приложенным в точке приведения и главным моментом $\vec{M}_{Oz}^r$ относительно указанного центра.

Поскольку $\vec{R}_z^r$ и $\vec{M}_{Oz}^r$ являются количественными мерами СП и с их помощью можно проводить исследование механизма образования погрешностей обработки, поэтому главный вектор $\vec{R}_z^r$ и главный момент $\vec{M}_{Oz}^r$ системы действующих сил принимаем за обобщенные характеристики СП технологической системы. Пользуясь обобщенными характеристиками СП технологической системы $\vec{R}_z^r, \vec{M}_{Oz}^r$ можно проводить комплексное исследование погрешностей обработки, из-за упругих перемещений элементов технологической системы, т.е. не требуется рассматривать влияние на погрешность каждой действующей силы (силы резания, силы закрепления, вес заготов-

ки и т.д.).

При оценке СП различных методов обработки с помощью обобщенных характеристик $\bar{R}^r$, $\bar{M}_o^r$ могут иметь место следующие четыре случая: 1) силы находятся в равновесии $-\bar{R}^r = 0$, $\bar{M}_o^r = 0$; 2) силы приводятся к паре $-\bar{R}^r = 0$; $\bar{M}_o^r \neq 0$; 3) силы приводятся к равнодействующей $-\bar{R}^r \neq 0$, $\bar{M}_o^r = 0$; 4) силы приводятся к динамическому винту $-\bar{R}^r \neq 0$, $\bar{M}_o^r \neq 0$.

С точки зрения достижения высокой точности обработки эти случаи существенно различны. Наиболее благоприятными являются методы обработки, у которых обобщенные характеристики СП равняются нулю.

Результаты исследования влияния СП технологической системы на точность обработки с помощью обобщенных характеристик показывают, что в каждом конкретном случае (методе обработки) на показатели точности, т.е. точности размера, формы и относительных поворотов поверхностей доминирующее влияние оказывают те или иные проекции этих характеристик, которые называем "Определяющими". Количество проекций обобщенных характеристик, участвующих в образовании погрешностей обработки в зависимости от метода обработки и его СП может колебаться от нуля до шести. Например, при токарной обработке цилиндрической поверхности детали продольной подачей определяющими проекциями обобщенных характеристик являются M_{oz}^r , а при нарезании резьбы резцом в этих же условиях определяющих проекций три — R_x^r , M_{ox}^r , M_{oz}^r . При врезном шлифовании всего два определяющих проекция — M_{oz}^r . В связи с изложенным, по-видимому следует установить критерий оценки степени уравновешенности технологической системы в виде $K = \frac{C_u}{C_o}$, где K — степень уравновешенности технологической системы ($0 < K < 1$), C_o — число определяющих проекций обобщенных характеристик СП, C_u — число уравновешенных определяющих проекций обобщенных характеристик. Можно написать: 1) при $C_u = 0$, $K = 0$, т.е. все определяющие проекции неуравновешены (погрешность обработки максимальна); 2) при $C_u = C_o$, $K = 1$, т.е. все определяющие проекции уравновешены (погрешность обработки минимальна).

Таким образом, с помощью простого соотношения представляется возможным давать оценку совершенству метода обработки и компоновок технологической системы с точки зрения достижения заданной точности обработки.

Поскольку в процессе обработки главный вектор и главный момент переменны, можно написать:

$$\bar{R}_3^r = \bar{R}^r + \bar{R}^r, \quad \bar{M}_{o3}^r = \bar{M}^r + \bar{M}^r$$

где $\bar{R}_z^r; \bar{M}_{\theta z}^r$ - обобщенные характеристики СП заготовки;
 $\bar{R}^r, \bar{M}^r$ - постоянные составляющие обобщенных характеристик;

$$\bar{R}^r = \sum \bar{P}_i, \quad \bar{M}^r = \bar{M}(\bar{P}_i)$$

$\tilde{R}^r, \tilde{M}^r$ - переменные составляющие обобщенных характеристик.

Для определения влияния переменных составляющих силовых факторов на точность обработки исследованы колебания заготовки. Из теоретической механики известно, что для решения такой задачи надо составить дифференциальные уравнения движения заготовки. Всего имеются шесть обобщенных координат $x_0, y_0, z_0, \varphi, \psi, \theta$. Следовательно, в соответствии с этим имеем шесть уравнений Лагранжа

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} = Q_i \quad (2.1)$$

где T - кинетическая энергия заготовки;
 q_i - обобщенные координаты $(x_0, y_0, z_0, \varphi, \psi, \theta)$;
 $\dot{q}_i$ - обобщенные скорости $(\dot{x}_0, \dot{y}_0, \dot{z}_0, \dot{\varphi}, \dot{\psi}, \dot{\theta})$;
 Q_i - обобщенные силы.

Составляющие обобщенных силовых характеристик представлены в следующем виде:

$$R_x^r = R_{x_0}^r + H_1 \sin(\omega t + \delta_1)$$

$$R_y^r = R_{y_0}^r + H_2 \sin(\omega t + \delta_2)$$

$$R_z^r = R_{z_0}^r + H_3 \sin(\omega t + \delta_3)$$

$$M_x^r = M_{x_0}^r + H_4 \sin(\omega t + \delta_4)$$

$$M_y^r = M_{y_0}^r + H_5 \sin(\omega t + \delta_5)$$

$$M_z^r = M_{z_0}^r + H_6 \sin(\omega t + \delta_6)$$

где $H_i \sin(\omega t + \delta_i)$ - переменная составляющая обобщенных характеристик;

H_i - амплитуда возмущающего силового фактора;

ω - частота возмущающего силового фактора;

δ_i - смещение фаз; t - время.

После нахождения производных $\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right)$ и подстановки их значений и значений обобщенных сил уравнения Лагранжа (2.1.) принимают вид:

$$\begin{aligned}
M\ddot{x}_0 + Mz_c\ddot{\psi} - My_c\ddot{\theta} + (j_{ox} + j_{ax})x_0 - R_{x_0}^r &= H_1 \sin(\omega t + \delta_1) \\
M\ddot{y}_0 - Mz_c\dot{\psi} + Mx_c\ddot{\theta} + (j_{oy} + j_{ay})y_0 - R_{y_0}^r &= H_2 \sin(\omega t + \delta_2) \\
M\ddot{z}_0 + My_c\ddot{\psi} - Mx_c\dot{\psi} + (j_{oz} + j_{az})z_0 - R_{z_0}^r &= H_3 \sin(\omega t + \delta_3) \\
-Mz_c\ddot{y}_0 + My_c\ddot{z}_0 + \mathcal{I}_x\ddot{\psi} - \mathcal{I}_{xy}\ddot{\psi} - \mathcal{I}_{xz}\ddot{\theta} + j_{az} \cdot DA \cdot \varphi - M_{x_0} &= H_4 \sin(\omega t + \delta_4) \\
-Mz_c\ddot{x}_0 + Mx_c\ddot{z}_0 - \mathcal{I}_{xy}\ddot{\psi} + \mathcal{I}_y\ddot{\psi} - \mathcal{I}_y\ddot{\theta} - M_{y_0} &= H_5 \sin(\omega t + \delta_5) \\
-M_{y_0}\ddot{x}_0 + Mx_c\ddot{y}_0 - \mathcal{I}_{xz}\ddot{\psi} - \mathcal{I}_{yz}\ddot{\psi} + \mathcal{I}_z\ddot{\theta} + j_{ax} \cdot DA \cdot \theta - M_{z_0} &= H_6 \sin(\omega t + \delta_6)
\end{aligned} \tag{2.2}$$

Решение этих уравнений получаются сложением собственных и вынужденных колебаний. Однако, в условиях сильного демпфирования, обусловленного большим количеством контактирующих поверхностей элементов технологической системы, вызывающих силы трения, собственные колебания быстро затухают и ими можно пренебречь.

Решение уравнений установившихся вынужденных колебаний ищем в виде

$$q_i = A_i \sin(\omega t + \delta_i)$$

где $A_1, \dots, A_6$ — амплитуда вынужденных колебаний; ω — частота вынужденных колебаний заготовки.

Поскольку с точки зрения образования погрешности обработки важны наибольшие отклонения, то интерес представляет прежде всего амплитуда вынужденных колебаний A_i . Их величины можно найти, если составить следующую систему линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{aligned}
(j_x - M\omega^2)A_1 + My_c\omega^2 A_6 &= H_1 \\
(j_y - M\omega^2)A_2 &= H_2 \\
(j_z - M\omega^2)A_3 - My_c\omega^2 A_4 &= H_3 \\
(j_{az} \cdot DA - \mathcal{I}_x\omega^2)A_4 - My_c\omega^2 A_3 + \mathcal{I}_{xz}\omega^2 A_6 &= H_4 \\
(-\mathcal{I}_y)\omega^2 A_5 &= H_5 \\
(j_{ax} \cdot DA - \mathcal{I}_z\omega^2)A_6 + My_c\omega^2 A_4 &= H_6
\end{aligned} \tag{2.3}$$

Исследования и имеющиеся данные показывают, что учет динамики, при обычных скоростях резания повышает точность статических расчетов в среднем на 10%. Поэтому в дальнейшем на стадии проектирования технологических систем и поиска возможностей управления будем пользоваться лишь статическими перемещениями и рассмотрим математическую модель с упругими статическими перемещениями. Динамическую модель потребуется привлекать лишь для проверочных расчетов и обработки на высоких скоростях.

3. Установление и исследование зависимостей между обобщенными характеристиками силового поля и погрешностями обработки.

Задача достижения заданной точности обработки, в общей постановке, в работе решается установлением и исследованием зависимостей между обобщенными характеристиками СП технологической системы и погрешностями обработки. Эта задача решена построением математических моделей процесса образования погрешностей под воздействием силового фактора при многоинструментной и многошпиндельной обработках и ее реализацией на ЭВМ в двух постановках — относительно точной, но трудоемкой, с привлечением метода координатных систем и упрощенной, но практической с использованием свойств бесконечно малых величин.

При установлении и исследовании зависимостей между $\bar{R}^r, \bar{M}_0$ и погрешностью обработки методом координатных систем за погрешность обработки принято отклонение $\Delta \bar{\tau}_i$ фактического радиус-вектора $\Delta \bar{\tau}_{\varphi_i}$ i -й точки обработанной поверхности детали от заданного $\bar{\tau}_{zi}$. Переходя из подвижных систем отсчета инструментов и заготовки в неподвижную систему станка путем преобразования координат, получаем уравнение относительного движения обрабатываемой заготовки и инструментов в зависимости от параметра движения φ .

$$\bar{\tau}_z(\varphi) = M_z^{-1}(\varphi) (\bar{M}_{uj}(\varphi) \bar{\tau}_{uj} + \bar{\tau}_{ouj} + \bar{S}_{uj}(\varphi) - \bar{S}_j(\varphi) - \bar{\tau}_{oz})$$

где $\bar{\tau}_{oz}, \bar{\tau}_{ouj}$ — радиус векторы, определяемые наладкой соответственно заготовки и инструментов;

$\bar{\tau}_{uj}$ — радиус-вектор, определяющий точку M_{uj} в системе;

$\bar{S}_j, \bar{S}_{uj}$ — векторы перемещений соответственно заготовки и инструментов;

M_z, M_{uj} — матрицы поворотов соответственно заготовки и

инструментов.

Построив математическую модель образования погрешностей $\Delta \tilde{z}_i$ при многоинструментной (многошпиндельной) обработке можно предложить методику расчета погрешностей, пользуясь которой предлагается алгоритм расчета погрешностей обработки, приведенный на рис. 3.1. В соответствии с приведенной выше методикой построена математическая модель механизма образования погрешностей на основе зависимостей между обобщенными характеристиками СП R_3^r, M_{03}^r и погрешностями при многорезцовой обработке на токарных полуавтоматах, составлены алгоритмы и программы расчета погрешностей обработки применительно к ЭВМ на языке "Фортран". Оценка адекватности разработанных математических моделей проведена на многорезцовом токарном полуавтомате модели МК 112 путем сравнения результатов расчетов погрешностей обработки на ЭВМ с результатами экспериментального определения погрешностей. Расхождение расчетных и экспериментальных значений погрешностей обработки заготовки не превышает 14% в интервале погрешностей 0,032 мм и выше, что допустимо для подобных расчетов.

Для изыскания больших возможностей повышения точности обработки, конечно, лучше иметь аналитический аппарат, позволяющий определить влияние тех или иных факторов на ожидаемую точность обработки (силы резания, силы закрепления, силы инерции и т.п.). Однако, чтобы увидеть и оценить в общем виде влияние отдельных факторов, в работе сделана попытка создания упрощенных оценочных формул влияния силовых факторов на точность обработки, используя свойства бесконечно малых величин.

Понятно, что погрешность обработки δ определяется не только погрешностью $\Delta \tilde{z}$ положения вершин режущих инструментов относительно детали, но и векторами относительной $\vec{V}_0$ и переносной $\vec{V}_z$ скоростей резания. Так, при продольном точении $\vec{V}_0$ и $\vec{V}_z$ образуют плоскость параллельную плоскости YOZ , а для случая поперечного точения — плоскость параллельную плоскости XOZ (рис.3.2).

В этом случае величину погрешности обработки δ нужно искать как ее проекцию на перпендикуляр к $\vec{V}_0$ и $\vec{V}_z$, т.е. нормаль к относительной траектории вершины реза.

Единичный вектор ($\vec{n}^\circ$) в этом случае может быть определен как векторное произведение $\vec{V}_0$ и $\vec{V}_z$.

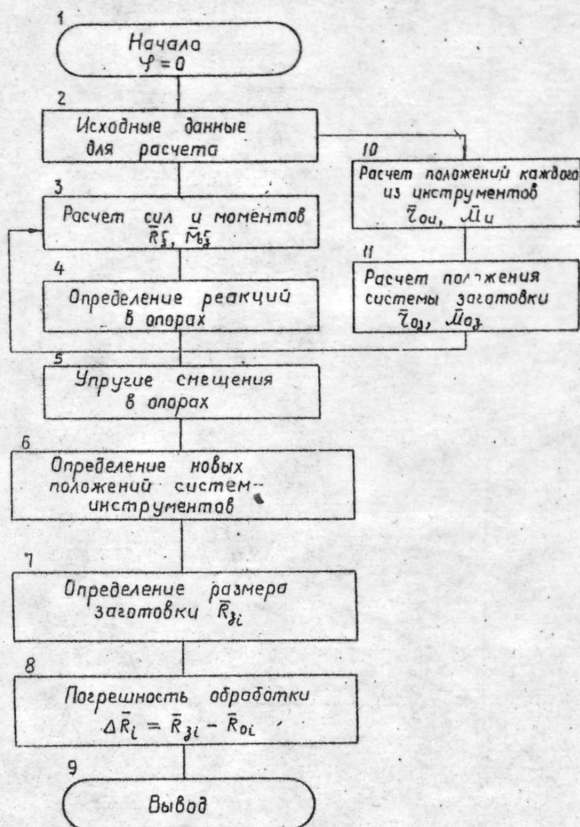


Рис.3.1. Алгоритм расчета погрешности обработки

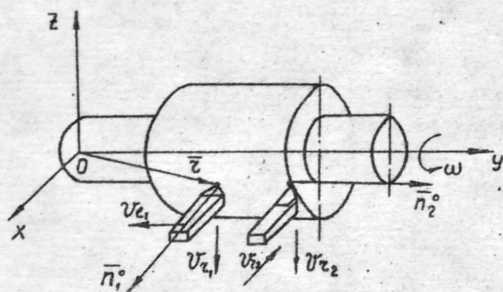


Рис.3.2. К определению погрешности обработки

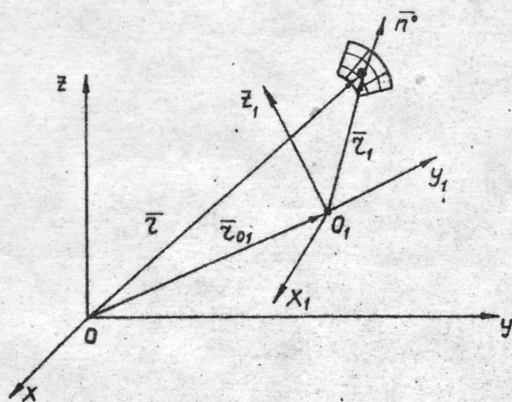


Рис.3.3. К определению малых смещений и углов

$$\vec{n}^0 = \frac{\vec{v}_\theta \times \vec{l}_\tau}{|\vec{v}_\theta \times \vec{v}_\tau|}$$

вектор $\vec{v}_\theta$ определяется подачей S_n , а вектор $\vec{v}_\tau$ вектором угловой скорости ω и радиус-вектором $\vec{r}$.

Проектируя погрешность положения вершин режущей части инструментов $\Delta \vec{r}$ на нормаль $\vec{n}^0$, т.е. вычисляя скалярное произведение, имеем

$$\delta = \Delta \vec{r} \cdot \vec{n}^0 = \Delta x n_x^0 + \Delta y n_y^0 + \Delta z n_z^0$$

Формула перехода в векторной форме можно представить в виде

$$\Delta \vec{r} = \vec{r} - \vec{r}_1 = \vec{r}_{01} + M \vec{r}_1$$

В случае малых смещений и углов (рис.3.3), учитывая $\Delta x \cdot \Delta x = 0$, $\cos \varphi = 1$, $\sin \varphi = \varphi$, и т.д. получим

$$\vec{r} = \begin{pmatrix} x_{01} \\ y_{01} \\ z_{01} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_1 + y_1 \theta + z_1 \varphi \\ x_1 \theta + y_1 \varphi + z_1 \theta \\ -x_1 \varphi - y_1 \varphi + z_1 \end{pmatrix}$$

Для погрешности $\Delta \vec{r}$ имеем

$$\Delta \vec{r} = \begin{pmatrix} x_{01} + y_1 \theta + z_1 \varphi \\ y_{01} - x_1 \theta + z_1 \theta \\ z_{01} - x_1 \varphi - y_1 \varphi \end{pmatrix}$$

Для аналитических исследований имеем

$$\vec{n}^0 \cdot \Delta \vec{r} = \delta$$

Подставляя в эти выражения найденные значения $\Delta x_0, \Delta y_0, \Delta z_0, \varphi, \theta$ можно исследовать влияние различных факторов и с точностью до бесконечно малых величин оценивать их.

Так для схем расположения инструментов в плоскости XOY аналитическая формула определения погрешности

$$\delta = -\frac{R_x^r}{j_{ox}} - y_1 \frac{R_x^r}{OA \cdot j_{ox}} - y_1 \frac{M_{ox}^r}{OA \cdot j_{ox}},$$

где OA - расстояние между опорами; j_{ax}, j_{ox}, j_{oz} - жесткости опорных точек. Эта формула позволяет исследовать все возможные случаи влияния силовых факторов, исследовать возможности управления и т.д.

4. Исследование влияния силового поля на погрешности обработки детали.

Исследования влияния СП на погрешность обработки методом



математического моделирования на ЭВМ проведены на основе разработанной в обобщенном виде методики. В качестве объекта моделирования выбрана технологическая система, позволяющая исследовать влияние характеристик СП на погрешность обработки ступенчатого вала на токарном многолезцовом станке с помощью трех проходных резцов, установленных на отдельных суппортах (рис.4.1). Выбор объекта предусматривает возможность исследования процесса многоинструментной обработки с варьированием: числа переходов обработки, схемы расстановки инструментов, величины геометрических параметров режущих инструментов, режимов резания и циклограммы обработки. Разработаны алгоритмы и программа расчетов на ЭВМ на языке "Фортран".

При моделировании на ЭВМ значения исходных данных принимались следующими: для заготовок использован материал марки Ст.45; диаметры ступеней заготовки 160 мм, 120 мм, 100 мм. Длины ступеней соответственно были равны: 80 мм, 60 мм, 40 мм. Число расчетных точек в продольном и поперечном сечениях соответственно 5 и 3. Использованы резцы проходные из твердосплавного инструментального материала Т15К6. Геометрические параметры резцов: главный угол в плане $\varphi = 45^\circ$; передний угол $\gamma = 0^\circ$; задний угол $\alpha = 5^\circ$, угол наклона режущей кромки $\lambda = 0^\circ$. Значения глубин резания для резцов наладки $t = 3$ мм; значения подач для резцов $S = 1$ мм/об. Скорости резания для резцов: $V_1 = 5$ м/с; $V_2 = 3,766$ м/с; $V_3 = 3,133$ м/с.

По результатам расчетов на ЭВМ построены графики изменений величин обобщенных характеристик R_g^r , M_{03}^r и погрешностей обработки ΔT приведенные соответственно на рис.4.2....4.4. Из рис. 4.4. видно, что погрешность обработки резцом 1 на первом участке равна - 27 мкм. С вступлением в работу резца 2, в результате частичного уравнивания силы резания, погрешность обработки резцом 1 уменьшается до -13 мкм, т.е. более чем в два раза. Вступление в работу резца 3 вносит некоторую поправку в относительные положения заготовки и резцов, вследствие чего возникают ступенчатости на соответствующих поверхностях (рис.4.1). Дальнейшее перемещение резцов обуславливает переменное СП, что также приводит к ступенчатости и конусности обрабатываемых поверхностей детали.

Как видно, путем управления СП технологической системы на этапе проектирования обеспечивается существенное сокращение погрешностей обработки.

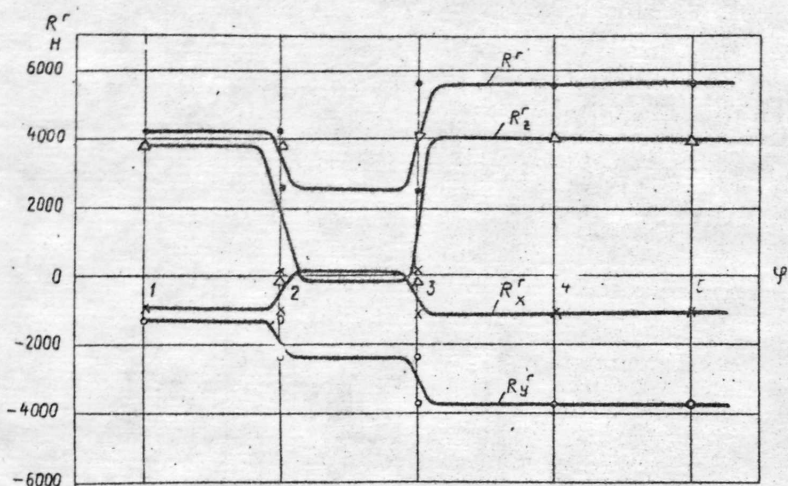


Рис.4.2.Изменение величины главного вектора R^r и его проекций R_x^r , R_y^r , R_z^r при обработке ступенчатого вала (рис.4.1)

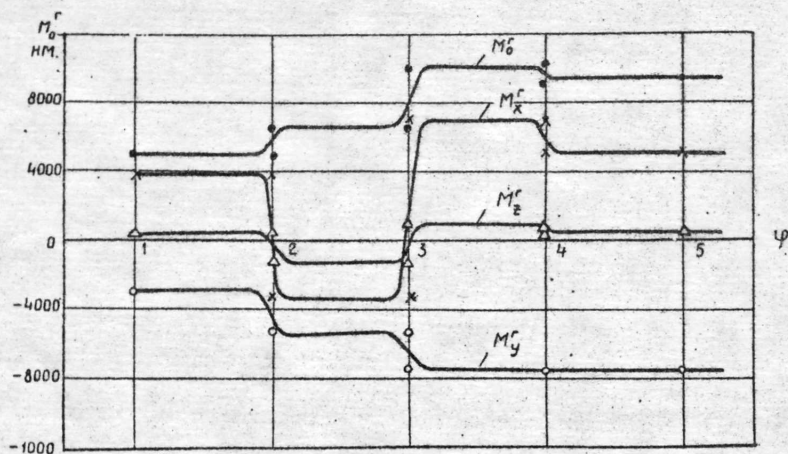


Рис.4.3.Изменение величины главного момента M_0^r и его проекций M_x^r , M_y^r , M_z^r при обработке ступенчатого вала (рис.4.1)

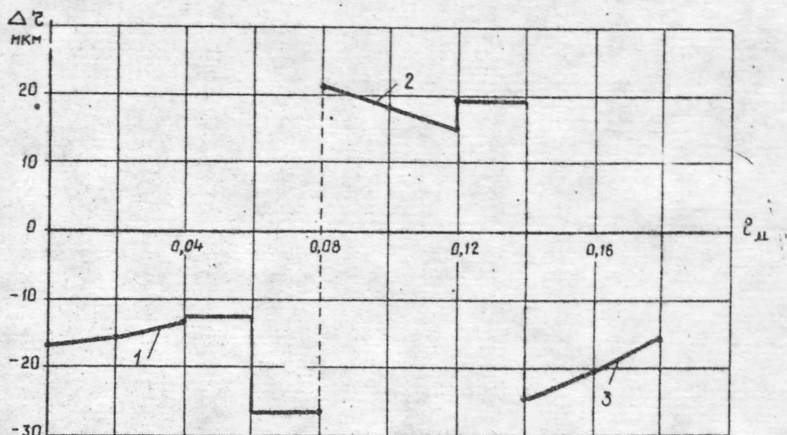


Рис.4.4. Погрешности обработки поверхностей ступенчатого вала в соответствии с рис.4.1.: 1,2,3 — профили поверхностей, обработанных соответственно резцами 1,2,3.

5. Теоретические основы управления силом в поле.

В данной главе рассматриваются теоретические основы управления СП технологической системы, заключающиеся в поддержании значений обобщенных характеристик $\bar{R}_3^r, \bar{M}_{o3}^r$, определяющих качество, производительность и себестоимость обработки деталей на заданном уровне независимо от изменения условий его протекания, например, колебаний припуска, твердости материала заготовки, затупления режущего инструмента и других факторов.

Обеспечение требуемых значений характеристик СП технологической системы $\bar{R}_T^r, \bar{M}_T^r = f(\varphi)$ путем приложения к этой системе активных сил ($\bar{R}_y^r, \bar{M}_y^r$) можно определить следующим образом:

$$(\bar{R}_3^r, \bar{M}_{o3}^r) - (\bar{R}_T^r, \bar{M}_T^r) = (\bar{R}_y^r, \bar{M}_y^r);$$

$$\bar{R}_y^r, \bar{M}_y^r = -(\bar{R}_T^r, \bar{M}_T^r)$$

Таким образом, справедливо ставить задачу о таком сочетании и расположении сил, составляющих СП технологической системы при котором

$$\bar{R}_3^r = \bar{R}_T^r; \quad \bar{M}_{o3}^r = \bar{M}_T^r,$$

где $\bar{R}_T^r, \bar{M}_T^r$ — допустимые требуемые значения обобщенных характеристик СП технологической системы, обусловленные заданными величинами показателей точности.

Если в известной формуле упругого перемещения технологической системы ($y = p/j$) вместо силы резания $p(x, s, t, HRC, C)$ подставить обобщенные характеристики СП $\bar{R}_z^r, \bar{M}_{\partial z}^r$, то, принимая во внимание, что

$$\begin{cases} \bar{R}_z^r = \bar{f}(n_p, x_p, p_p); \\ \bar{M}_{\partial z}^r = f(n_M, x_M, M_M), \end{cases} \quad (5.1)$$

где n_p — число сил, действующих в технологической системе; x_p — координата точки приложения этих сил; p_p — величины действующих сил; n_M — число моментов действующих сил; x_M — моменты сил относительно осей; M_M — величины моментов действующих сил, то получим зависимости

$$\begin{cases} y = \frac{f(n_p, x_p, p_p)}{j_{\text{из (пер)}}}; \\ \psi = \frac{f(n_M, x_M, M_M)}{j_{\text{кр (пов)}}} \end{cases} \quad (5.2)$$

Следовательно, управление СП технологической системы можно осуществить теоретически изменением любого аргумента, входящего в правую часть уравнений (5.1).

С целью управления СП в ходе обработки технологическая система оснащается чувствительными элементами и преобразующими устройствами, с помощью которых контролируются параметры, характеризующие ход технологического процесса. Например, измеряются величины упругих перемещений заготовки, обусловленные $\bar{R}_z^r, \bar{M}_{\partial z}^r$. Путем сравнения измеренных и заданных величин определяется знак и величина поправки, которую требуется внести в ход технологического процесса для того, чтобы указанное рассогласование снизить до допустимой величины.

Пользуясь известным положением теоретической механики в общем случае обобщенные характеристики СП $\bar{R}_z^r, \bar{M}_{\partial z}^r$ можно привести к динамическому винту, т.е. одной силе равной по величине $\bar{R}_z^r$, и одному моменту $\bar{M}_{\partial z}^r$ совпадающему с $\bar{R}_z^r$.

Следовательно, для решения задачи управления необходимо прикладывать управляющие векторы $\bar{R}_{упр}^r$ и $\bar{M}_{упр}^r$ в сторону противоположную действующим векторам и по величине близкие к ним. Если же проще управлять в самой точке O_z , то необходимо либо компенсировать все составляющие R_x^r, R_y^r, R_z^r и M_x^r, M_y^r, M_z^r , либо — определяющие проекции обобщенных характеристик СП.

Особенно существенно то, что даже общий случай управления может быть осуществлен всего двумя управляющими силами $\bar{F}_{1упр}$ и $\bar{F}_{2упр}$

приложенными к заготовке (или инструменту) в процессе обработки. Здесь имеется возможность варьировать 12-ю параметрами, а именно: составляющими $F_{1x \text{ упр}}, F_{1y \text{ упр}}, F_{1z \text{ упр}}, F_{2x \text{ упр}}, F_{2y \text{ упр}}, F_{2z \text{ упр}}$ и координатами точек приложения управляющих сил $x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2$, которые связывают характеристики и состав действующих в технологической системе сил и моментов, жесткости и упругие перемещения этой системы.

Поскольку в процессе формирования СП участвуют технологическая система и факторы, обусловленные процессом обработки, управление СП технологической системы необходимо осуществить как на этапе проектирования технологической системы и разработки технологического процесса, так и в ходе обработки заготовки.

Для уравнивания СП с обобщенными характеристиками $\bar{R}_j^r, \bar{M}_{aj}^r$ двумя управляющими силами $\bar{F}_{1 \text{ упр}}, \bar{F}_{2 \text{ упр}}$ можно использовать систему неравенств:

$$\left\{ \begin{array}{l} R_x^r + F_{1x} + F_{2x} \leq R_x^r \\ R_y^r + F_{1y} + F_{2y} \leq R_y^r \\ R_z^r + F_{1z} + F_{2z} \leq R_z^r \\ \sum (y_1 p_z - z_1 p_y) + (y_1 F_{1z} - z_1 F_{1y}) + (y_2 F_{2z} - z_2 F_{2y}) \leq M_x^r; \\ \sum (z_1 p_x - x_1 p_z) + (z_1 F_{1x} - x_1 F_{1z}) + (z_2 F_{2x} - x_2 F_{2z}) \leq M_y^r; \\ \sum (x_1 p_y - y_1 p_x) + (x_1 F_{1y} - y_1 F_{1x}) + (x_2 F_{2y} - y_2 F_{2x}) \leq M_z^r. \end{array} \right. \quad (5.3)$$

Решение этой системы уравнений кроме использования известных приемов теоретической механики требует предварительного задания ряда параметров исходя из конструктивных, технологических или каких-либо других соображений.

В большинстве случаев достаточно частичное управление для компенсации определяющих составляющих $\bar{R}^r$ и $\bar{M}_0^r$. Например, для случая обработки, когда вершины резцов лежат в плоскости XOY (рис. 4.1) вполне достаточно компенсировать действие составляющих R_x^r и M_z^r . Это означает, что можно управлять лишь одной силой $\bar{F}_{y \text{ упр}}$, параметры которой определяются из первого и последнего уравнений системы (5.3).

$$\begin{cases} \sum p_x + F_x \leq R_x^r \\ \sum (x p_y - y p_x) + (x_1 F_y - y_1 F_x) \leq M_z^r \end{cases}$$

Можно рассматривать и другие частные случаи, когда достаточно управлять одним моментом, одной силой в центре приведения "0" и т.д. Например, в случае перпендикулярности $\bar{R}^r$ и $\bar{M}_0^r$ можно управлять одной силой, а случай $\bar{R}^r = 0$, $\bar{M}_0^r \neq 0$ — одним моментом.

Приведенные теоретические положения имеют подтверждение в уже применяющихся на практике примерах. Например, вместо поводка применяется самоцентрирующий патрон, вместо одного резца — два с противоположных сторон, используется преднамеренное прижатие инструмента, применение протяжек и т.д.

Вместе с тем из этого общего теоретического исследования СП можно предложить целый ряд новых обоснованных этим исследованием способов и схем управления СП с целью повышения точности и производительности обработки.

Можно сформулировать следующие принципы управления СП технологической системы:

принцип — 1 — определение значений обобщенных характеристик, обеспечивающих: а) минимальную погрешность обработки; б) допустимую погрешность обработки.

принцип 2 — выбор в качестве управляющих воздействий переменных, входящих в правую часть уравнений $\bar{R}^r$ и $\bar{M}_0^r$ (5.1).

принцип 3 — управление характеристиками СП заготовки;

принцип 4 — управление характеристиками СП инструмента.

Выбор принципа управления СП должен базироваться на эффективности управления, простоте реализации и надежности системы управления.

6. Управление силовым полем на этапе разработки технологического процесса

Важнейшими этапами разработки технологического процесса являются построения операций механической обработки с заданными характеристиками СП. В большинстве случаев технологическая операция разрабатывается под имеющийся тип станка. При этом в первую очередь необходимо установить возможность использования многоинструментной обработки, как наиболее эффективного пути достижения технико-экономических показателей процесса изготовления деталей на станках.

В процессе разработки многоинструментной операции произво-

дится расчет величин обобщенных характеристик $\bar{R}^r, \bar{M}_0^r$ и определяется ожидаемая погрешность обработки $\Delta \bar{z}$. При необходимости вносится корректировка в: число переходов обработки, схему расстановки инструментов, величины геометрических параметров режущих инструментов, режимы резания и циклограмму обработки.

В процессе управления СП на этапе проектирования технологической системы и разработки технологического процесса различными приемами и решениями обеспечивается достижение заданных значений обобщенных характеристик $\bar{R}_\delta^r, \bar{M}_\delta^r$. Это требует например, разработки таких форм и размеров деталей, которые наряду с выполнением служебного назначения позволяют использование методов обработки и инструментов, с уравновешенным СП заготовки; широкого использования приспособлений и устройств с осесимметричной равномерной по окружности передачей сил и моментов к обрабатываемой заготовке в процессе компоновки станка.

Учитывая высокий уровень автоматизации, следует снять многие ограничения, выдвигая на первый план создание исполнительных поверхностей станка с уравновешенным СП, что не ставит больших требований в отношении жесткости узлов, несущих эти поверхности.

7. Управление силовым полем в ходе обработки деталей на станке.

В процессе механической обработки из-за изменения характеристик сил, приложенных к заготовке, жесткости звеньев технологической системы и других действующих факторов величины обобщенных характеристик СП непрерывно изменяются. С другой стороны после управления СП на этапе разработки технологического процесса остается резерв повышения точности обработки. Все это требует введения управления СП в процессе обработки.

Управление СП технологической системы осуществляется двумя способами: с помощью заранее рассчитанной программы управления СП, путем слежения и внесения корректив с помощью обратной связи. Первый способ реализуется посредством системы автоматического управления, основными узлами которой являются программирующие устройства и узлы приложения сил к технологической системе.

На рис.7.1 приведены графики влияния СП на погрешности обработки ступенчатого вала, построенные на основе экспериментального исследования управления СП по разработанной программе на модернизированном станке мод.1К62 и расчетов на ЭВМ.

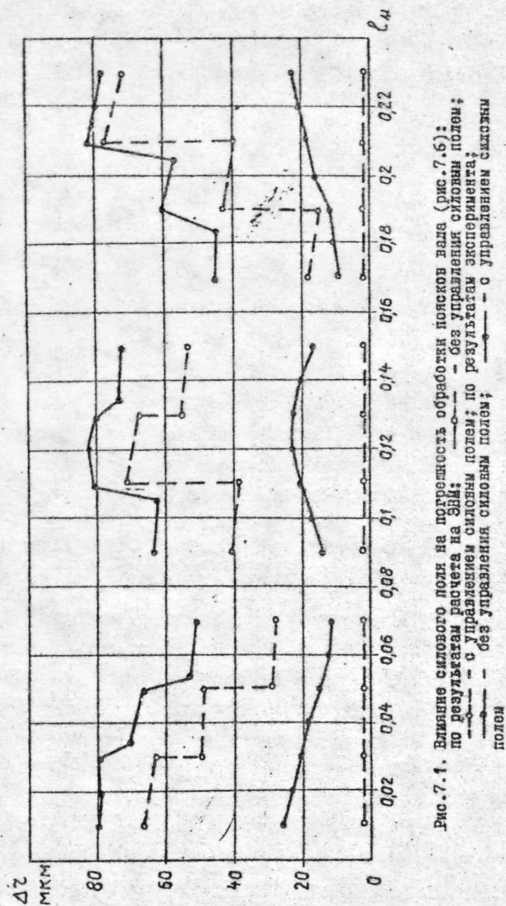


Рис. 7.1. Влияние силового поля на поверхность обработанной поверхности (рис. 7.6): по результатам расчета на 300. Без управления силовым полем; — с управлением силовым полем; по результатам опыта: — без управления силовым полем; — с управлением силовым полем

Результаты проведенных исследований указали на возможность повышения точности обработки в 1,5...2 раза, производительности более чем в 2 раза.

На рис.7.2. показана блок-схема системы автоматического управления СП с помощью обратной связи, которая работает следующим образом. В процессе обработки упругие перемещения переднего и заднего Уз центров измеряются датчиками D_1 и D_2 и передаются в вычислительные устройства ВУ, где эти сигналы преобразуются в соответствующие электрические сигналы U_1 и U_2 и подаются в левый и правый сравнивающие устройства СУ. Одновременно сюда с задающих устройств подаются сигналы U_n и U_3 пропорциональные заданным значениям управляющих сил. На выходе сравнивающего устройства появляются сигналы рассогласования U_{p1} и U_{p2} , которые поступают в исполнительные устройства ИУ, где реализуются путем изменения управляющих сил, приложенных к базирующим элементам заготовки. Подобное управление ходом технологического процесса называется адаптивным.

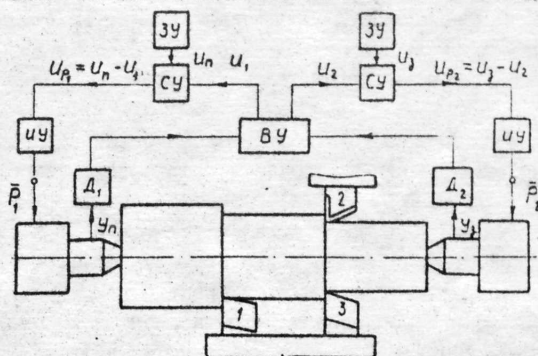


Рис.7.2. Блок-схема системы автоматического управления силовым полем приложении внешней силы:

D_1, D_2 - датчики, измеряющие упругие перемещения y_1, y_2 ;
 $ВУ$ - вычислительное устройство; $ЗУ$ - задающее устройство;
 $ИУ$ - исполнительные устройства; P_1, P_2 - управляющие силы;
 $СУ$ - сравнивающие устройства

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

В диссертации разработаны научные основы управления СП технологического процесса, включающие в себя создание расчетной основы комплексного учета всех действующих сил, формирующих СП, математическое моделирование на ЭВМ зависимостей между обобщенными характеристиками СП и погрешностями обработки, разработку путей,

способов и принципов управления СП, позволяющие достичь поставленную цель — повысить точность и производительность механической обработки деталей на станках.

1. Важность силового фактора, его доминирующий характер в образовании упругих перемещений технологической системы порождающих погрешность обработки, обусловило большое количество исследований, посвященных его изучению и разработке путей, способов, методов по снижению его влияния на точность и производительность обработки. Большое разнообразие способов решения задачи влияния силовых факторов на точность и производительность обработки (многочисленные частные решения, учитывающие ту или иную силу) вызывают серьезные затруднения в поиске оптимальных решений в каждом конкретном случае, не позволяют в полной мере эффективно использовать приобретенное знание в этой области.

2. Введено понятие технологического СП, охватывающее все возможные силовые воздействия на технологическую систему, для описания механизма образования погрешностей обработки с помощью которого становится возможным разработка наиболее эффективного технологического процесса изготовления деталей на станках.

3. На основе теории СП технологического процесса разработаны методы:

- прогнозирования точности механической обработки;
- оценки по критерию точности обработки, компоновки станка, инструментальной наладки, геометрии режущего инструмента, режимов резания как в отдельности так и в их совокупности;
- разработки операции технологической системы, обеспечивающей наилучшие обобщенные характеристики СП.

4. На основе исследований установлены закономерности формирования СП, раскрывающие совместные влияния действующих в технологической системе сил, их величин, направлений и точек приложения на возникновение погрешности обработки под каждым инструментом в каждый момент времени обработки.

5. Разработана математическая модель процесса образования погрешностей обработки на основе зависимостей между обобщенными характеристиками СП и погрешностями обработки, которая позволяет проводить исследования как при одноинструментной, так и при многоинструментной и многошпиндельной обработках. Для осуществления исследований методом математического моделирования на ЭВМ составлены алгоритмы и программы расчетов точности обработки.

6. На основе разнovidностей методов обработки деталей по СП

разработана научно-обоснованная классификация технологических систем по обобщенным характеристикам СП и функциональные связи между обобщенными характеристиками, упругими перемещениями технологической системы и погрешностью обработки.

7. На основе теоретических исследований, натурных и машинных экспериментов установлена возможность повышения точности и производительности обработки путем управления СП технологического процесса:

- на этапе проектирования технологической системы и разработки технологического процесса путем соответствующего проектирования или подбора элементов технологической системы, параметров наладки, режимов резания и других условий обработки, обеспечивающих минимальные значения обобщенных характеристик СП;

- в ходе обработки путем поддержания значений обобщенных характеристик СП, обеспечивающих минимальную погрешность или заданную точность обработки независимо от колебания припуска на обработку, твердости материала заготовки, затупления режущего инструмента, изменения жесткости технологической системы и других факторов.

8. На основе разработанных путей, способов и принципов комплексного управления СП установлена возможность достижения заданных значений обобщенных характеристик СП, обеспечивающих разработку наиболее эффективного технологического процесса механической обработки.

9. Результаты экспериментальных исследований, проведенных на основе разработанных способов и систем управления показали, что управление СП технологического процесса позволяет повысить точность механической обработки деталей в 1,5...2 раза, увеличить производительность обработки в 2...5 раз.

10. Приведенные в работе теоретические положения и экспериментальные исследования, а также проектные решения применительно к технологическим системам были внедрены или использованы при разработке новых и совершенствовании существующих технологических процессов изготовления деталей на: машиностроительном заводе им.С.М.Кирова (г.Баку), ПО "Куйбышевбурмаш" (г.Куйбышев), в Азербайджанском трубопрокатном заводе им.В.И.Ленина, МЗ (г.Москва), ВНИИТнефтемаш (г.Баку) с общим экономическим эффектом более 1,5 млн. руб.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Мамедов Д.М. Влияние отклонений смещения режущих кромок

гребенок на неравномерность их нагрузки//За технический прогресс.-1962.- № 9.- С.19-22.

2. Мамедов Д.М. Влияние отклонения смещения режущих кромок круглых гребенок на элементы геометрии режущего лезвия//За технический прогресс.- 1963.- № 8.- С.24-26.
3. Мамедов Д.М. Экспериментальное установление оптимальных значений геометрических параметров круглых гребенок к самооткрывающимся резбонарезным патронам//Тез.докл.конф.ВТУЗов Закавказ.- Ереван. 1964.- С.44.
4. А.с.236026 Способ бесконтактного измерения размеров при обработке алмазными шлифовальными кругами /В соавторстве. //Б.И. - 1969 - № 6.
5. А.с.314606 Патрон для нарезания внутренней конической резьбы /в соавторстве.//Б.И. - 1971 - № 28.
6. Мамедов Д.М., Керимов С.К. Нарезание конической резьбы в муфтах головкой, оснащенной твердосплавными резцами.//За технический прогресс. - 1971. - № 1- С.24-25.
7. Мамедов Д.М. О точности нарезания резьбы на трубо- и муфтонарезных станках//За технический прогресс. - 1971. № 8. - С.28-30.
8. Мамедов Д.М., Керимов С.К. Силы и схемы резания при однократном нарезании резьбы твердосплавными резцами//За технический прогресс. - 1972. - № 2.- С.28-29.
9. Мамедов Д.М. Расчетное определение условий самоцентрировки зажимных устройств муфтонарезных станков//Технология изготовления конических резьбовых соединений нефтепромышленного сортамента:Тезисы докладов.Всес.конф.- Баку, 1973.- С.104-III.
10. Мамедов Д.М. и др. Модернизация муфтонарезных станков и патронов с целью повышения качества нарезаемой резьбы /Д.М.Мамедов, А.П. Тренин, С.К.Керимов и др.//Технология изготовления конических резьбовых соединений нефтепромышленного сортамента: Тез.докл.Всес.конф.-Баку, 1973.- С.73-82.
11. Мамедов Д.М. и др. Опыт промышленного внедрения модернизированных станков типа 9В112 на машиностроительном заводе им.С.М. Кирова (Баку) /Д.М.Мамедов, С.Д.Браверман, А.П.Тренин и др. //Технология изготовления конических резьбовых соединений нефтепромышленного сортамента:Тез.докл.Всес.конф.-Баку, 1973.- С.221.
12. Корсаков В.С. и др. Исследование деформаций муфт обсадных

- труб под действием сил зажима и резания /В.С.Корсаков, Ф.М. Ярошевский, Д.М.Мамедов и др.//Технология изготовления конических резьбовых соединений нефтепромышленного сортамента:Тез. докл. Всес. конф. -Баку, 1973, - С.112-122.
13. Мамедов Д.М., Кенгерли А.М. К вопросу динамики движения исполнительного звена механизма конусообразования муфтонарезных патронов//Технология изготовления конических резьбовых соединений нефтепромышленного сортамента: Тез. докл. Всес. конф. -Баку, 1973.-С.123-133.
 14. Мамедов Д.М., Керимов С.К. Скоростное однопроходное нарезание трубной конической резьбы//Технология изготовления конических резьбовых соединений нефтепромышленного сортамента:Тез. докл. Всес. конф. -Баку, 1973.- С.143-151.
 15. Мамедов Д.М., Гусейнов Т.Н. Растачивание конических поверхностей многолезвийным твердосплавным инструментом, движущимся вдоль образующей//Технология изготовления конических резьбовых соединений нефтепромышленного сортамента:Тез. докл. Всес. конф. -Баку, 1973.- С.192-194.
 16. Мамедов Д.М. К вопросу стружкообразования при резбонарезании //Эффективные технологические процессы производства машин: Матер.Респ. конф. -Баку, 1977.- С.36-37.
 17. Мамедов Д.М., Фатуллаев Э.К. Определение остаточных напряжений в резьбах буровых замков//Ученые записки"АЗИНЕТЕХИМ им.Азизбекова.- 1978.- № 6.- С.42-45.
 18. Мамедов Д.М. Управление силовым полем системы СПИД с целью повышения точности и производительности обработки на станках //Расчет и проектирование механических систем:Тем. сб. научн. тр. АзПИ им. Ч.Ильдырма.-1981.- С.229-235.
 19. Мамедов Д.М. Построение обобщенной эквивалентной схемы многоинструментной обработки деталей на станках//Расчет и проектирование механических систем:Тем. сб. научн. тр. АзПИ им. Ч.Ильдырма.- 1981.- С.104-111.
 20. Мамедов Д.М., Амирджанов Ю.Х., Давтян В.Г. Испытание многопроходного гидросуппорта на жесткость и в работе//Известия вузов.- Машиностроение.- 1982.- № 6.- С.142-144.
 21. Мамедов Д.М., К вопросу формализации механизма образования погрешностей при многоинструментной обработке деталей//Эффективная технология производства машин: Тем. сб. научн. тр. АзПИ им. Ч.Ильдырма.- 1982.- С.63-72.

22. Мамедов Д.М. Управление силовым полем технологической системы механической обработки//Известия вузов.- Нефть и газ. - 1983.- № II. - С.68-72.
23. Мамедов Д.М. Управление проектированием технологической системы и ходом процесса механической обработки деталей//Динамика, прочность и надежность нефтепромышленного оборудования:Тез. докл.Всес.конф.- Баку, 1983.- С.119.
24. Мамедов Д.М. Силовое поле системы СПИД//Библ.указ.ВИНИТИ (депон.). - 1983.- № II. - С.92-103.
25. Мамедов Д.М. Повышение точности механической обработки путем управления силовым полем в ходе технологического процесса //Известия вузов. - Нефть и газ. - 1989.- № 9.- С.92-96.
26. Мамедов Д.М. Исследование влияния силового поля технологической системы на точность обработки//Автоматизация машиностроения на базе гибких технологических систем и роботизированных комплексов: Тез.докл.Респ.конф.- Баку: АзПИ им.Ч.Ильдырма.- 1989.- С.66-67.
27. А.с.1516317 Способ бесцентрового шлифования /в соавторстве. //Б.И. - 1989 - № 39.
28. Мамедов Д.М. Управление силовым полем технологической системы на этапе проектирования технологического процесса//Станки и инструмент. - 1991.- № I.
29. Mamedov D.M., Kerimov S.K. Rychlostne zesené čítrového kořalového zavítání jeden záber // VUNAR, informačný spravodaj (Praha), 1973. - №4. - S. 21-23.
30. Mamedov D.M., Kerimov S.K. Smerostné odnoprochodné narezanie trúbnoj konickej rezby. Zborník referátov // cvávodná konferencia a pových poznámkoch v obrábání materiálav. Bratislava, 1973.- S.263-272.
31. Mamedov D.M. О точности самоцентрирования плавающего зажимного устройства резьбонарезных станков. Zborník Referátov // Nove Poznanky v obrábání materiálav a konštrukcii obrábacích strojov:- Bratislava, 1976.- S. 142-148.