

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Полоцкий государственный университет»

А. И. Голембиевский

ОСНОВЫ СИСТЕМОЛОГИИ И СИНТЕЗА СПОСОБОВ ФОРМООБРАЗУЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ РЕЗАНИЯ

Учебно-методический комплекс
для студентов специальности 1-36 01 03 «Технологическое
оборудование машиностроительного производства»

Новополоцк
ПГУ
2010

УДК 621.9.04:530.1(075.8)
ББК 30.1я73
Г60

Рекомендовано к изданию методической комиссией
машиностроительного факультета в качестве учебно-методического
комплекса (протокол № 1 от 04.01.2010)

РЕЦЕНЗЕНТЫ:

директор ОАО «Технолит Полоцк» Л. В. ПЕТРОВ;
д-р техн. наук, проф., зав. каф. металлорежущих станков и инструментов
УО «ПГУ» В. А. ДАНИЛОВ

Голембиевский, А. И.

Г60 Основы системологии и синтеза способов формообразующей обработки
резания : учеб.-метод. комплекс для студентов спец. 1-36 01 03 «Технологи-
ческое оборудование машиностроительного производства» / А. И. Големби-
евский. – Новополоцк : ПГУ, 2010. – 204 с.
ISBN 978-985-531-038-0.

Включает основное программное, методическое обеспечение и лекционный
курс. Содержит начальные сведения теории технических систем и научно-
технической экспертизы изобретений. Рассмотрены теоретические основы фор-
мообразования реальных поверхностей в машиностроении. Проведен системно-
структурный анализ некоторого многообразия охраноспособных способов формооб-
разующей обработки и сформулированы основные принципы их создания.

Приведены список литературы, словарь специфических терминов и вопро-
сы к зачету.

Предназначен для студентов машиностроительного факультета. Может быть
полезен магистрантам и аспирантам соответствующих специальностей.

УДК 621.9.04:530.1(075.8)
ББК 30.1я73

ISBN 978-985-531-038-0

© Голембиевский А. И., 2010
© УО «Полоцкий государственный университет», 2010

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	5
Цели и задачи дисциплины	7
Рабочая программа.....	8
Методика изучения основных разделов дисциплины	10
Конспект лекций.....	21
1. Введение в системологию	21
2. Системный характер способов формообразующей обработки	25
2.1. Определение понятия способа формообразующей обработки	25
2.2. Способ формообразующей обработки как целенаправленная техни- ческая система	32
2.3. Цель как критерий целесообразности развития многообразия S-систем	37
2.4. Способ формообразующей обработки как объединение кинематиче- ской, базирующей, энергетической и стабилизирующей силовое воздейст- вие подсистем	40
2.5. Многообразие способов формообразующей обработки как большая развивающаяся система	42
3. Геометрическая интерпретация воспроизведения реальных поверхностей ...	46
3.1. Понятие о характеристическом образе инструмента	46
3.2. Геометрические классы воспроизведения поверхностей	50
3.3. Осуществимость геометрических классов при образовании реальных поверхностей.....	55
3.4. Комбинированные подклассы образования реальных поверхностей.....	59
3.5. Влияние характеристического образа инструмента на формирование поверхности	61
4. Методика системного описания способов формообразующей обработки ...	65
4.1. Постановка задачи.....	65
4.2. Методика описания кинематической подсистемы	70
4.3. Методика описания базирующей подсистемы.....	78
4.4. Методика описания энергетической подсистемы	83
4.5. Методика описания подсистемы стабилизации силового воздействия ..	90
4.6. Примеры системного описания способов формообразующей обра- ботки.....	92
5. Методика создания новых способов формообразующей обработки.....	105
5.1. Общие принципы создания новых способов	105
5.2. Принцип совмещения обработки нескольких заготовок	108
5.3. Принцип совмещения формообразующей с транспортированием ..	114

5.4. Принцип изменения правил выполнения приемов.....	117
5.5. Принцип совмещения исполнительных движений	127
5.6. Принцип согласования ритмов физического воздействия на заготовку.....	130
5.7. Различимость способов формообразующей обработки.....	135
6. Классификация способов формообразующей обработки	142
6.1. Методика классификации	142
6.2. Структурный анализ и классификация пионерных способов обработки резанием прямозубых цилиндрических колес.....	147
6.3. Критерии сравнительной оценки способов формообразующей обработки	151
6.4. Методика составления банка данных о способах формообразующей обработки	153
7. Реализация способов формообразующей обработки в структуре технологических машин.....	156
7.1. зубодолбежный станок для нарезания цилиндрических колес с наклонными по делительной окружности зубьями	157
7.2. зубофрезерные станки для нарезания цилиндрических колес с наклонными зубьями	160
7.3. зубодолбежный станок с адаптивным управлением для многопроходной обработки зубчатых колес	164
7.4. зубодолбежный станок со спиральным врезанием для многопроходной обработки зубчатых колес.....	170
7.5. Двухстоловый полуавтомат для последовательной обработки зубчатых колес	175
7.6. Роторный зубодолбежный станок	188
Заключение	197
Вопросы к зачету	199
Словарь специфических терминов	202
Литература	203

ВВЕДЕНИЕ

В спектре современной учебной литературы для высшей школы контрастно выделяются издания нового поколения – учебно-методические комплексы (УМК) по дисциплинам учебного плана. По существу УМК является необходимым компонентом системно-методического обеспечения учебного процесса в высшей школе, а также условием введения образовательных стандартов. Принципиальное значение имеет УМК и для обеспечения управляемой самостоятельной работы студентов, на которую предполагается отводить не менее 20 – 30 % от общего количества часов, выделяемых учебным планом на изучаемую дисциплину.

Для реализации современных тенденций в высшем образовании, базирующихся на принципе «учить учиться», необходим УМК нового поколения, отличающийся от использовавшихся ранее, представляющих, по существу, набор составляющих его частей. Курс «Основы системологии и синтеза способов формообразующей обработки резания» не является исключением из общего правила. Динамика современного образовательного процесса, ведущая к уменьшению времени, отводимого на изучение отдельных дисциплин, насыщение специальных дисциплин фундаментальными основами, рост объема информации, связанный с изменениями, происходящими в теории и практике машиностроительного комплекса требует иного, более гибкого подхода при подготовке инженера-машиностроителя.

Пионерная целевая функция УМК нового поколения:

– быть инструментом системно-методического обеспечения учебного процесса по конкретной дисциплине, его предварительного проектирования.

Производные целевые функции:

– объединять в единое целое различные дидактические средства обучения, подчиняя их целям обучения и воспитания;

– раскрывать требования к содержанию изучаемой дисциплины, к знаниям, умениям и навыкам выпускников, содержащимся в образовательном стандарте, и тем самым способствовать его реализации;

– служить накоплению новых знаний, новаторских технических идей и разработок, стимулировать развитие творческого потенциала;

– раскрыть связь базовых дисциплин инженерной специальности и специфических дисциплин: теории технических систем и научно-технической экспертизы изобретений;

– показать особенности патентной защиты способов формообразующей обработки в машиностроении и соответствующего технологического оборудования;

– рассмотреть наиболее общие принципы создания новых способов формообразующей обработки на основе представления способа как технической системы и его логической формулы изобретения.

Преимущества УМК современного поколения – возможность изменения количества и состава разделов, направленности и содержательной части учебного процесса – позволяют гибко адекватно реагировать на изменяющиеся требования реальной промышленности и образования в целом.

В предлагаемом УМК приведена рабочая программа дисциплины по выбору (авторский спецкурс), разработанная на основе видения проблемы системологии способов формообразующей обработки в машиностроении, изложенного в монографии: Голембиевский, А. И. Основы системологии способов формообразующей обработки в машиностроении / А. И. Голембиевский. – Минск: Наука и техника, 1986. – 168 с. Кратко изложена методика изучения основных разделов дисциплины; приведены вопросы для самопроверки, вопросы к итоговому зачету, минимальный список дополнительной литературы.

В историческом аспекте в УМК кратко рассмотрена связь науки о системах, занимающейся свойствами отношений исследуемых объектов, в диалектике развития способов формообразующей обработки – технических идей, защищаемых патентами на изобретения. Приведены наиболее значимые на различных этапах развития станкостроительной отрасли производства пионерные и первообразные способы обработки. Показано на конкретных примерах из патентных источников, что способы формообразующей обработки являются техническими системами, выделенными в класс S-систем. На этой основе выполнено структурное (морфологическое) описание ряда способов формообразующей обработки. В частности с системных позиций рассмотрена диалектика развития многообразия способов обкатного зубодолбления от пионерного способа до настоящего времени. На основе представления способа обработки как технической системы и его логической формулы изобретения сформулированы общие принципы создания (синтеза) новых способов обработки. В качестве приложения рассмотрена реализация ряда наиболее перспективных современных способов зубообработки цилиндрических колес в кинематической структуре металлорежущих станков с электронными связями, оснащенных цикловыми автоматами.

Абсолютное большинство примеров, рассматриваемых в УМК, заимствовано из описаний изобретений, защищенных в разное время охранными документами (авторскими свидетельствами СССР, патентами Российской Федерации и патентами Республики Беларусь).

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ

Цель преподавания дисциплины

С точки зрения свойств науки принципиальной особенностью ее развития во второй половине двадцатого столетия является возникновение науки о системах, занимающейся свойствами отношений, а не экспериментальными свойствами исследуемых объектов – систем, и ее интеграция с основанными на эксперименте традиционными научными дисциплинами. В науке о системах в 60-е годы выделяется теория технических систем как база для систематизации и обобщения знаний в инженерных дисциплинах, объединяющая в единый комплекс понятия, определения и положения, основанные на сущности и закономерностях структуры, функции, создания и использования объектов техники, образующих вполне определенную отрасль производства. Однако учебные планы машиностроительных специальностей не имеют таких дисциплин, которые в процессе обучения давали бы студентам полное обобщенное представление об отрасли техники соответствующей специальности. Как правило, по сложившейся традиции изучение различных технологических операций, процессов и соответствующих им технологических машин осуществляется на основе исходных классических способов обработки, что не соответствует современному состоянию уровня технологии и техники. По существу почти полностью исключается из учебного процесса интенсивно развивающееся многообразие способов обработки, определяющее динамику и ближайшие перспективы состояния соответствующей отрасли техники.

Цель преподавания дисциплины – устранение указанного пробела. Дисциплина, объединяя общую теорию технических систем, научно-техническую экспертизу изобретений, отраслевую технологию и соответствующие технологические машины позволит дать обобщенное представление на наиболее общем системном уровне о соответствующей инженерной специальности. Такой подход соответствует университетскому уровню образования.

Задачи изучения дисциплины

Изучение дисциплины строится в преемственности с рядом отдельных разделов предшествующих дисциплин – начертательной геометрии, теории множеств, теории резания, технологического (станочного) оборудования и систем управления этого оборудования. А также специфических научных дисциплин – теория технических систем и научно-техническая экспертиза изобретений, не изучаемых на машиностроительных специальностях университетов.

При изучении дисциплины решаются следующие задачи:

- изучение основных понятий и определений теории технических систем на базе способов (виртуальных технических идей) формообразующей обработки в машиностроении, являющихся объектами интеллектуальной собственности и защищаемыми соответствующими охранными документами (патентами);
- представление многообразия способов формообразующей обработки, как совокупностей целенаправленных действий, выделенных в класс технических систем (S-систем), объединенных общей первообразной (пионерной) целью;
- освоение методики структурного, функционального и морфологического анализа способов формообразующей обработки и их систематизации;
- освоение принципов сравнительного анализа способов обработки по различным критериям;
- изучение принципов создания (синтеза) новых способов формообразующей обработки на основе системного понятия способа обработки и его логической формулы изобретения;
- освоение диалектики развития многообразия (большой развивающейся надсистемы) способов формообразующей обработки;
- реализация способов формообразующей обработки в кинематической структуре соответствующих технологических машин и системах их управления.

В итоге изучения дисциплины студенты должны уметь, пользуясь принципами теории технических систем и научно-технической экспертизы изобретений, анализировать различные принципы, методы и способы обработки на структурном, функциональном, морфологическом, экспериментальном и сравнительном уровнях.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

Рабочая программа дисциплины (авторский спецкурс) составлена на основе видения проблемы системологии способов формообразующей обработки в машиностроении, изложенного в академической монографии [5] и ряде последующих статей в научно-технических журналах.

Лекционный курс

Введение в системологию (4 часа). Общие сведения о системах. Наука о системах как двумерная наука. Свойства отношений в системе и экспериментальные свойства системы. Понятие «система». Виды систем. Теория технических систем. Системология и ее место в технических дисциплинах.

Понятие «способ». Многообразие способов. Способы формообразующей обработки. Формообразование реальных поверхностей посредством удаления части материала заготовки, прибавления части материала к заготовке, перераспределение материала заготовки.

Способ формообразующей обработки как целенаправленная техническая система (или S-система). Цель S-системы.

Виды S-систем (6 часов). Пионерные и производные S-системы и их цели. Многообразие S-систем как большая развивающаяся система, или надсистема.

Структура и функция S-систем, их морфологическое (структурное) и функциональное описание. Иерархия описания.

S-система как объединение кинематической, энергетической, базирующей и стабилизирующей силовое воздействие подсистем.

Преобразование вещества твердого тела в S-системах. Свойства элементов S-системы. Многообразие связей между элементами S-систем. Организация S-систем и их качественная определенность.

Воспроизведение реальных поверхностей (6 часов). Геометрическая интерпретация воспроизведения реальных поверхностей. Понятие о характеристическом образе инструмента (объекта, воздействующего на твердое тело заготовки). Мощность геометрического образа.

Геометрические классы воспроизведения поверхностей. Осуществимость геометрических классов при образовании реальных поверхностей. Комбинированные подклассы. Законченное множество геометрических классов и подклассов образования реальных поверхностей.

Влияние характеристического образа инструмента на формирование реальной поверхности при резании.

Системное описание S-систем (6 часов). Методика системного описания кинематической, базирующей, энергетической и стабилизирующей силовое воздействие подсистем S-систем. Примеры.

Различимость S-систем. Наиболее общие критерии сравнимости S-систем: критерий сложности и критерии технологической и цикловой относительной производительности.

Синтез S-систем (8 часов). Основы синтеза способов формообразующей обработки. Принцип изменения последовательности приемов. Принцип изменения правил выполнения приемов. Принцип согласования ритмов физического воздействия. Принцип совмещения обработки нескольких заготовок одним инструментом. Принцип совмещения исполнительных движений. Примеры синтеза S-систем.

Системное описание произвольного многообразия S-систем, относящихся к различным видам обработки.

Системный анализ открытого множества S-систем, образующих конкретный вид обработки (на примере обкатного зубодолбления).

Реализация способов формообразующей обработки (6 часов). S-система (способ обработки) как качественная первообразная технологической операции и частной кинематико-компановочной структуры технологической машины (металлорежущего станка).

Реализация наиболее перспективных S-систем обкатного зубодолбления, полученных на основе системного анализа этого вида обработки, в кинематической структуре зубодолбежных станков.

Форма отчетности – зачет.

МЕТОДИКА ИЗУЧЕНИЯ ОСНОВНЫХ РАЗДЕЛОВ ДИСЦИПЛИНЫ

Введение в системологию

Принципиальной особенностью многовекового развития науки является возникновение во второй половине XX столетия общей теории систем. Автор этой теории Л. Берталанти так определил ее сущность: «Общая теория систем – это логико-математическая область, задачей которой является формулирование и вывод общих положений, возможных при рассмотрении систем вообще». Эта наука занимается свойствами отношений исследуемых систем (объектов), а не их экспериментальными свойствами, и ее интеграцией с основанными на эксперименте традиционными научными дисциплинами. Со временем в науке о системах выделяются частные теории, в том числе, теория технических систем как база для систематизации знаний в теоретической технологии, объединяющая в единый комплекс понятия, определения и положения, основанные на сущности и закономерностях структуры, функции, создания и использования объектов техники – технических систем. В соответствии с названной областью применения различают общую теорию технических систем, справедливую для всех видов технических систем, и частные теории, конкретизирующие общую теорию для отдельных конкретных многообразий технических систем, объединенных общей целью. Систематизацию знаний о конкретном многообразии технических систем называют системологией. В данном по-

собии рассматривается системология многообразия способов формообразующей обработки поверхностей в машиностроении с общетеоретических системных позиций независимо от характера воздействия на заготовку (твердое тело) и вида используемой для этого энергии.

При изучении данного небольшого раздела необходимо:

- понять объективную необходимость появления общей теории систем и ее частных направлений;
- уяснить сущность общей теории систем и ее связь с исследованиями, основанными на эксперименте;
- понять необходимость системного подхода при системологии многообразия способов формообразующей обработки в машиностроении.

Вопросы для самопроверки:

1. Приведите сущность понятия общей теории систем (по Л. Берта-ланфи) и ее связь с экспериментальными исследованиями.

2. Охарактеризуйте сущность понятия системологии способов формообразующей обработки, т. е. технических идей, реализуемых в технологических операциях и соответствующих технологических машинах.

Системный характер способов формообразующей обработки

Данный раздел является основополагающим, так как в нем рассматриваются фундаментальные основы системологии способов формообразующей обработки. К этим основам в логической последовательности относятся:

- понятие способа формообразующей обработки (технической идеи) в машиностроении;
- понятие технической системы и доказательство возможности рассмотрения многообразия способов формообразующей обработки как технических систем, или S-систем;
- понятие функции способов формообразующей обработки (S-систем);
- понятие пионерной (первообразной) и производной цели как критерия целесообразности развития многообразия S-систем.

При изучении данного раздела, прежде всего, необходимо уяснить сущность различия между общеметодологическими понятиями, образующими иерархическую триаду принцип – метод – способ. В технической литературе понятие «принцип» по существу не рассматривается, а метод формообразующей обработки ассоциируется с разрушением, изменением или возникновением связей в твердом теле в процессе обработки. Различают:

– методы обработки, основанные на удалении части материала с заготовки (механическое резание, физическое, химическое, комбинированное удаление материала);

– методы обработки, основанные на формоизменении материала заготовки (литье, порошковая металлургия, пластическая деформация, послойный синтез и т. д.);

– методы обработки, основанные на прибавлении материала к заготовке (наплавка, сварная сборка, склеивание и т. д.).

По существу в данной ассоциации все многообразие технических решений и виртуальных идей в области формообразующей обработки на первом наиболее общем иерархическом уровне отождествляет три известных принципа обработки, отличающихся характером воспроизведения поверхностей. Каждый из этих принципов объединяет методы и способы обработки, различающиеся между собой видом инструмента, или физического объекта (резец, луч лазера и др.), воздействующего на материал заготовки. На последнем иерархическом уровне триады каждый из методов объединяет соответствующее развивающееся многообразие способов формообразующей обработки, различающихся характером воздействия на заготовку, проявляющимся через взаимодействие заготовки и инструмента.

Затем, рассматривая представленные в разделе примеры прийти к пониманию того, что способ формообразующей обработки – это целенаправленная совокупность приемов воздействия инструмента, или физического объекта на заготовку, выполняемых в определенной последовательности с соблюдением определенных правил. Сравнить данное частное определение способа формообразующей обработки с принятым в нормативной патентной литературе общим определением способа.

Проанализировать общее понятие системы, обратив особое внимание на то, что она выступает по отношению к другим системам и окружающей среде как нечто единое, а ее качественная определенность обусловлена структурой и функцией. Анализируя приведенные примеры с позиций понятия системы, несложно убедиться в том, что любой рассматриваемый способ формообразующей обработки является системным объектом, или S-системой.

При изучении цели как критерия целесообразности развития многообразия S-систем необходимо обратить внимание на понятие «функция системы». В широком смысле функция системы – это ее способность к целесообразной деятельности в рамках более сложной системы, в состав которой она входит. Целесообразная деятельность S-систем заключается в воздействии на твердое тело в пространстве и времени, т. е. внешней сре-

де, характеризуемой системой координат и временем как независимой переменной с целью получения из исходного объекта – заготовки готового изделия с заданными геометрическими формами, размерами и физико-механическими свойствами. Таким образом, названная цель определяет основную сущность функционирования всех S-систем. Это обстоятельство позволяет рассматривать эту цель как первообразную непрерывно развивающегося многообразия S-систем (способов формообразующей обработки). Вместе с тем в соответствии с потребностями практики машиностроения ставится ряд конкретных дополнительных (производных) целей. Это в свою очередь приводит к созданию (в том числе на уровне изобретения) производных S-систем. Поэтому при анализе известных способов формообразующей обработки необходимо обратить внимание на цель, достигаемую в каждом конкретном случае.

При структурном анализе способов формообразующей обработки необходимо обратить внимание на то, что любая S-система является прообразом конкретной технологической операции. Наиболее общей характеристикой любой операции является ее повторяемость при условии повторения в определенных задаваемых пределах количественных и качественных характеристик получаемых результатов. Следовательно, можно утверждать, что эта характеристика присуща и S-системам.

Рассмотренные примеры S-систем подтверждают известный тезис о том, что процесс воздействия на твердое тело при формообразующей обработке осуществляется при определенных относительных движениях заготовки и инструмента. Определенность траекторий формообразующих движений обеспечивается схемой формообразования поверхности, которая определяет закономерности относительного движения заготовки и инструмента без учета физических явлений, протекающих в зоне обработки, действующих сил, температур и активных сред. По существу схема формообразования является графическим представлением соответствующего способа. Можно утверждать, что схема формообразования характеризует общую составляющую S-систем, называемую кинематической подсистемой. Эта подсистема относительно выделена, наделена определенной структурой и функцией.

Второй общей составляющей S-систем является базирующая подсистема, обеспечивающая определенность исходной установки заготовки относительно инструмента или в общем случае относительно объекта, воздействующего на заготовку. Эта составляющая S-систем обеспечивается схемой базирования заготовки, реализуемой в конкретных технологических маши-

нах различными по конструкции устройствами. Базирующая подсистема, являясь составной частью S-системы, также характеризуется относительной выделенностью, наделена определенной структурой и функцией.

Процесс воздействия на твердое тело осуществляется посредством подвода в зону обработки энергии различного вида. Вид используемой энергии определяет вид физического или физико-химического воздействия, играющего роль в изменении исходного состояния твердого тела: в снятии материала удаляемого слоя, в прибавлении материала к заготовке или в перераспределении материала твердого тела. Определенность энергетического воздействия на твердое тело обеспечивается схемой подвода энергии, характеризующей закономерности подвода энергии непосредственно для технологических целей. Схема энергетического воздействия, или энергетическая подсистема – третья общая составляющая, присущая всем S-системам. Так же как и две предыдущие, она характеризуется относительной выделенностью и имеет определенную структуру и функцию.

В наиболее общем виде абсолютное большинство способов формообразующей обработки, определяемых как S-система, представляют собой объединение относительно обособленных подсистем (кинематической, базирующей и энергетической), каждая из которых наделена структурой и функцией. Причем, как следует из выше изложенного, структура и функция S-систем не сводятся непосредственно к структуре и функции составляющих ее подсистем.

Способы обработки, представляемые как S-системы, состоящие из трех названных подсистем, решают геометрическую задачу при воспроизведении реальных поверхностей. При этом точность получаемых поверхностей конкретных деталей ограничивается статическим заданием правил выполнения приемов воздействия на заготовку, т. е. статической настройкой параметров обработки.

Дальнейшее повышение точности обработки привело к созданию систем с динамической настройкой, обеспечивающей стабилизацию силового воздействия на заготовку посредством устранения влияния изменяющихся случайно факторов – неравномерности припуска и микротвердости обрабатываемых заготовок от сечения к сечению – на силовое воздействие, например, силу резания в зоне обработки. Такую стабилизацию силового воздействия в терминах теории автоматического регулирования принято называть предельным регулированием. Следовательно, можно утверждать, что схема стабилизации силового воздействия является четвертой составляющей (подсистемой), присущей S-системам с адаптацией к случайно из-

меняющимся факторам в зоне резания. Так же как и три предыдущие, она относительно выделена и имеет определенную структуру и функцию. По существу эта подсистема осуществляет автоматическое управление процессом резания при механической обработке.

Таким образом, все многообразие S-систем (способов формообразующей обработки) состоит из двух классов. Первый класс составляют традиционные S-системы, функционирующие в режиме статической настройки; второй класс – относительно новые S-системы, функционирующие в режиме стабилизации силового воздействия, т. е. в режиме статической и динамической настроек.

Вопросы для самопроверки:

1. Приведите определение понятия «способ формообразующей обработки». Проиллюстрируйте это понятие конкретными примерами.

2. Приведите определение понятия «система». Покажите на конкретных примерах, что способы формообразующей обработки подпадают под понятие системы (S-системы).

3. Охарактеризуйте понятие «цель» как критерия целесообразности непрерывного развития многообразия S-систем. Приведите примеры S-систем, обеспечивающих достижение пионерной, первообразной и производной целей.

4. На конкретном примере покажите целесообразность представления S-системы на первом уровне разбиения в виде объединения относительно выделенных подсистем.

5. Приведите пример S-системы, функционирующей в условиях статической настройки. Приведите ее структуру на первом уровне разбиения.

6. Приведите пример S-системы, функционирующей в условиях динамической настройки. Приведите ее структуру на первом уровне разбиения.

7. Сравните S-системы, функционирующие в условиях статической и динамической настроек. Укажите целесообразность их использования в технологическом оборудовании.

Геометрическая интерпретация воспроизведения реальных поверхностей

Теоретически процесс формообразования реальных поверхностей на технологическом оборудовании аналогичен процессу формирования идеальных поверхностей в проективной геометрии, т. е. базируется на идеальных геометрических представлениях. Таким образом, формообразование

реальной поверхности в металлообработке любым способом представляет собой по существу процесс образования соответствующей геометрической поверхности, под которой (по Г. Монжу) обычно понимают след, оставляемый одной производящей линией, называемой образующей, при ее движении по другой производящей линии – направляющей. Следовательно, при изучении данного раздела, прежде всего, необходимо рассмотреть возможность получения воспроизводящих линий (образующей и направляющей). Для этого необходимо предварительно понять сущность понятий «вспомогательный элемент» (на вербальном языке) и «характеристический образ инструмента и его мощность» (на языке теории множеств), посредством которых при резании воспроизводятся образующая и направляющая реальной поверхности. Затем, возвращаясь к рассмотренным примерам, убедиться в том, что понятие о характеристическом образе при формообразующей обработке присуще также и для физических объектов, заменяющих традиционные инструменты (резцы, фрезы, штампы и пр.), т. е. является всеобщим, охватывающим все возможные способы обработки независимо от того, каким образом осуществляется воздействие на твердое тело. Принципиально наличие этого воздействия, необходимого для определения способа формообразующей обработки как S-системы.

На следующем этапе необходимо рассмотреть возможные методы получения воспроизводящих линий посредством использования операции пересечения характеристических образов различных инструментов с произвольной виртуальной линией-аналогом воспроизводимой линии. Затем, рассматривая сочетания возможных методов получения воспроизводящих линий по 2, определить возможные классы получения геометрических поверхностей. Исключить из полученных классов теоретически неосуществимые. На конкретных примерах из практики формообразующей обработки рассмотреть примеры с точки зрения классов воспроизведения поверхностей. Комбинирую классы получения поверхностей между собой, выявить соответствующие подклассы.

В заключение раздела следует рассмотреть влияние характеристического образа инструмента на формирование реальной поверхности.

Вопросы для самопроверки:

1. Приведите определение понятие поверхности. Поясните принципиальное различие между геометрической (теоретической) и реальной поверхностью, получаемой при формообразующей обработке.

2. Приведите определение понятия вспомогательного элемента. На конкретных примерах различных инструментов охарактеризуйте их вспомогательные элементы.

3. Приведите определение понятия характеристического образа инструмента. На конкретных примерах различных инструментов охарактеризуйте их характеристический образ.

4. Приведите определение понятия мощность характеристического образа инструмента. Приведите примеры инструментов и физических объектов, выполняющих функцию инструмента, и опишите мощность их характеристического образа.

5. Изложите на языке теории множеств методику образования воспроизводящей линии методом следа.

6. Изложите на языке теории множеств методику образования воспроизводящей линии методом касания.

7. Изложите на языке теории множеств методику образования воспроизводящей линии методом обката.

8. Изложите на языке теории множеств методику образования воспроизводящей линии методом копирования (зеркального отображения).

9. Опишите методику получения геометрической поверхности посредством сочетания воспроизводящих линий.

10. Перечислите классы образования реальных поверхностей. Приведите примеры. Обоснуйте практическую невозможность реализации некоторых теоретических классов образования поверхностей.

11. Изложите на языке теории множеств методику образования комбинированных подклассов воспроизведения реальных поверхностей. Приведите примеры реализации комбинирования.

12. Охарактеризуйте класс образования поверхности при зуботочении обкатным инструментом типа долбяка, при продольном точении круглым резцом, при затыловании модульной фрезы, при затыловании червячной фрезы.

Методика системного описания способов формообразующей обработки

В основе любой теоретической концепции лежит модель изучаемой действительности, наделенная структурой, некоторым числом свойств и функцией. Главная функция модели – быть представлением исследуемого объекта и средством получения о нем теоретической информации. Следовательно, описать способ формообразующей обработки, т. е. S-систему, значит построить ее модель, отображающую структуру, определенную группу свойств и функцию этой системы. Такое описание называется системным. Оно должно давать представление о строении S-систем.

Системное описание S-систем, должно быть иерархично. В соответствии с предшествующим разделом первый уровень описания S-систем характеризуется их разбиением на четыре взаимосвязанные общей первообразной целью подсистемы: кинематическую, базирующую, энергетическую и стабилизации силового параметра. Дальнейшая конкретизация структуры должна даваться на стольких уровнях, сколько их требуется для полного представления об основных свойствах системы. Естественно, последним уровнем описания будет тот, после которого в пределах единого подхода к различным способам формообразующей обработки дальнейшее разбиение невозможно.

Существенным признаком структуры является назначение (свойство) элементов. Преобразование вещества твердого тела в S-системах может быть механическим, физическим, химическим или смешанным, объединяющим первые три в различных сочетаниях. Этот процесс требует энергии определенного вида, а ее передача невозможна без информации. Отсюда энергетические, информационные или вещественные свойства элементов S-системы.

Структурные свойства зависят от характера связей. Выделим энергетические, информационные и вещественные связи, определив их в том же смысле, что и соответствующие им свойства. Энергетические связи предназначены для переноса энергии, а информационные – информации. Вещественные связи переносят вещество твердого тела, но одновременно энергию и информацию, так что характер связи определяется удельным весом соответствующего компонента. Связь между элементами S-системы зависит от природы воздействия на твердое тело.

Изложенные соображения необходимо использовать при изучении методики описания подсистем, образующих конкретную S-систему на примерах, приведенных в пособии способов формообразующей обработки, а также на примерах из ранее изученных специальных дисциплин.

Вопросы для самопроверки:

1. Изложите методику описания кинематической подсистемы способов формообразующей обработки. Приведите 2 – 3 примера.
2. Изложите методику описания базирующей подсистемы способов формообразующей обработки. Приведите системное описание стандартных баз.
3. Изложите методику описания энергетической подсистемы способов формообразующей обработки. Приведите 2 – 3 примера способов формообразующей обработки, в которых используется более одного энергетического воздействия на материал заготовки.

4. Изложите методику описания подсистемы стабилизации силового воздействия на заготовку в способах формообразующей обработки. Приведите конкретные примеры.

5. Приведите примеры способов формообразующей обработки, использующих различные виды энергетического воздействия. Для каждого из них постройте модель, отображающую структуру, определенную группу свойств и функцию.

Методика создания новых способов формообразующей обработки

Из определения S-системы выводится следующее следствие. Целенаправленное изменение совокупности приемов или последовательности их выполнения, изменение правил выполнения приемов приводит к качественно иному способу с новой структурой и функцией. Отсюда вполне естественно следующие достаточно распространенные принципы создания новых способов формообразующей обработки:

- принцип изменения совокупности приемов, или структурных элементов;
- принцип изменения последовательности приемов взаимодействия заготовки и инструмента или заменяющего его физического объекта (физического явления);
- принцип изменения правил выполнения отдельных приемов;
- совместное использование названных принципов в любом сочетании.

Анализ описаний изобретений показывает, что создание новых способов возможно также на целенаправленном усложнении или упрощении структуры и функции исходного способа – прототипа. Принцип поиска новых технических решений на этой основе сводится к частичной или полной передаче функций базирующей подсистемы характеристическому образу инструмента или энергетической подсистеме, в совмещении кинематической подсистемой функций отдельных составляющих энергетической подсистемы или в полном совмещении в энергетической подсистеме функций трех подсистем способа.

Используются также иные принципы создания новых способов формообразующей обработки, например:

- принцип комбинирования видов механического, физического и химического воздействия на твердое тело;
- принцип, основанный на согласовании ритмов физического воздействия на материал заготовки;

- принцип, основанный на совмещении обработки нескольких заготовок одним инструментом или набором различных инструментов;
- принцип, основанный на совмещении формообразующих и вспомогательных движений;
- принцип, основанный на совмещении обработки с транспортированием.

Названные принципы создания новых способов формообразующей обработки носят всеобщий характер. Например, принцип целенаправленного изменения совокупности приемов способа обработки широко используется на интуитивном уровне. Такой принцип, как комбинирование на основе дополнительных физических полей и потоков энергии при механической обработке резанием, получил распространение преимущественно в последние годы. В основу его развития положен перебор возможных вариантов и отбор тех, которые отвечают требованиям поставленной задачи. Принципы изменения последовательности приемов и правил выполнения приемов широко применяются в химико-термической обработке, а в формообразующей, особенно в резании, крайне ограничено. Некоторые принципы, например, принцип согласования ритмов формообразующих движений и ритмов физических воздействий на твердое тело вообще не нашли широкого применения, а принцип совмещения обработки нескольких заготовок одним инструментом при достижении нового эффекта используется редко. Возможно также одновременное последовательное применение нескольких общих принципов.

Изучать и использовать методику создания (синтеза) новых способов формообразующей обработки на основе названных принципов наиболее рационально на конкретных примерах как приведенных в пособии, так и при выполнении патентного поиска, например при курсовом и дипломном проектировании.

Вопросы для самопроверки:

1. Изложите сущность принципа совмещения обработки одним инструментом нескольких заготовок на конкретном примере.
2. Изложите сущность принципа совмещения обработки с транспортированием на конкретном примере.
3. Изложите сущность принципа изменения правил выполнения приемов на конкретном примере.
4. Изложите сущность принципа совмещения исполнительных движений на конкретном примере.
5. Изложите сущность принципа согласования ритмов физического воздействия на заготовку на конкретном примере.

КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

1. ВВЕДЕНИЕ В СИСТЕМОЛОГИЮ

С точки зрения науки принципиальной особенностью ее развития во второй половине XX столетия является возникновение общей теории систем. Автор этой теории Л. Берталанфи так определил ее сущность [1]: «Общая теория систем – это логико-математическая область, задачей которой является формулирование и вывод общих положений, возможных при рассмотрении систем вообще». Наука о системах, занимается свойствами отношений исследуемых систем (объектов), а не их экспериментальными свойствами, и ее интеграцией с основанными на эксперименте традиционными научными дисциплинами. Закономерность возникновения науки о системах можно объяснить тем, что к моменту ее появления в различных областях теории и практики, основанных на экспериментальных исследованиях, сложился значительный массив совокупностей операций теоретического и практического освоения действительности, подчиненных решению конкретной задачи. Эта наука содержит минимальное количество допущений, а ее основы базируются на логике. Это позволяет отнести данную научную дисциплину к точным наукам.

В 60-е годы в науке о системах выделяется теория технических систем как база для систематизации знаний в теоретической технологии, объединяющая в единый комплекс понятия, определения и положения, основанные на сущности и закономерностях структуры, функции, создания и использования объектов техники – технических систем. В соответствии с названной областью применения различают общую теорию технических систем, справедливую для всех видов технических систем, и частные теории, конкретизирующие общую теорию для отдельных конкретных многообразий технических систем, объединенных общей целью. Систематизацию знаний о конкретном многообразии технических систем называют системологией. Ниже излагается частная теория технических систем – системология многообразия как известных, так и возможных новых способов обработки поверхностей в машиностроении с единых позиций независимо от характера воздействия на заготовку (твердое тело) и вида используемой для этого энергии. При этом наиболее общие системные принципы, приближающиеся по уровню обобщения к категориям диалектики, сформулированные в общей теории технических систем, включены в предлагаемую частную теорию без изменений и дополняются специфическими понятиями и принципами, характерными только для способов обработки.

В основу любой технологической машины, используемой для формообразования реальных поверхностей деталей машин, положен один или несколько вполне определенных способов обработки. Их разнообразие является следствием множества технологических задач, решаемых в машиностроении, размеров и форм обрабатываемых деталей. Ранее других появились способы формообразующей обработки, основанные на использовании механической энергии. Это объясняется многообразием возможных вариантов движений заготовки и инструмента, составляющих движения формообразования. В последние десятилетия в технологии металлообработки классические способы, основанные на механическом воздействии на твердое тело, дополняются способами, основанными на других физических явлениях. К настоящему времени в технологии машиностроения сформировался значительный массив способов обработки, отдельные группы которых можно использовать для решения одной и той же технологической задачи.

Можно считать, что выбор способа решения конкретной технологической задачи из известных способов обработки выявил тенденцию к общему анализу внутренних связей и закономерностей различных процессов, видов и способов обработки и на этой основе к их систематизации. В ряде научных школ предлагались различные принципы систематизации, базирующиеся на анализе частных факторов, присущих отдельным видам обработки. Эти принципы включены в учебники и учебные пособия соответствующих инженерных дисциплин. Однако, по мнению автора, обобщающая теоретическая концепция системологии способов обработки независимо от формы инструмента, вида используемой энергии и характера воздействия на заготовку возможна только на основе фундаментального системного анализа всего комплекса понятий в данном научном направлении. Частный пересмотр отдельных положений, замена одних неудобных понятий другими, механическое введение новых понятий без переосмысления всей системы существующих воззрений не может дать объективно правильных результатов. Руководствуясь именно этими соображениями, в настоящей работе приведено одно из возможных решений указанной задачи. В предлагаемой работе дано однозначное определение способа обработки, показан системный характер способов обработки, предложен язык системно-структурного описания способов обработки, сформулированы принципы представления способов обработки в виде математических моделей (системное описание) с выделением критериев сложности и с этих позиций проведен системный анализ некоторых множеств способов обработки и выполнена их системологическая классификация.

Всеобщий критерий сложности сформулирован на основе структурных (морфологических) свойств способов обработки. Этот критерий позволяет оценивать структурную (конструктивную) сложность различных классов, видов и способов обработки и сравнивать их между собой по этому показателю.

В данной работе рассмотрены также критерии, основанные на экспериментальных свойствах способов обработки – технических систем. Эти критерии – энергоемкость, технологическая наследственность, относительная производительность по основному и по штучному времени – носят также всеобщий характер. При этом последние два критерия проработаны достаточно подробно и могут быть использованы при практической оценке способов обработки.

Большинство примеров, использованных в пособии, заимствовано из патентных источников, так как способы обработки, являясь объектами интеллектуальной собственности, защищаются охранными документами (патентами). Это позволяет дополнительно познакомиться с основными направлениями дальнейшего развития конкретной области технологии обработки и возможностями патентной защиты способов обработки.

Следует отметить, что не каждый вновь предлагаемый способ, в том числе формообразующей обработки, может быть защищен патентом. Такая защита предоставляется только способам, подпадающим под понятие «изобретение». В соответствии с действующим законодательством в Республике Беларусь [2] следующим образом раскрывается данное понятие: «Изобретением, которому предоставляется правовая охрана, признается техническое решение, являющееся новым, имеющее изобретательский уровень и промышленное применение».

Таким образом, технический объект, в том числе виртуальная техническая идея в виде способа решения какой-то задачи, для признания его изобретением должен обладать тремя названными свойствами. В указанном источнике раскрывается сущность свойств, характеризующих изобретение.

«Изобретение признается новым, если оно не является частью уровня техники, который определяется по общедоступным в Республике Беларусь и зарубежных странах сведениями до даты приоритета изобретения.

Изобретение имеет изобретательский уровень, если оно для специалиста явным образом не следует из уровня техники.

Изобретение является промышленно применимым, если оно может быть изготовлено или использовано в промышленности, сельском хозяйстве, здравоохранении и других отраслях деятельности».

В СССР основным охранным документом было Авторское свидетельство, введенное в 1919 г. По этому охранному документу изобретение принадлежало государству. В настоящее время в Республике Беларусь как и в государствах ближнего и дальнего зарубежья изобретения защищаются патентами. По патенту изобретение принадлежит заявителю, т. е. юридическому лицу (организации, например ПГУ) или физическому лицу (автору, авторам или его (их) правопреемникам). В большинстве стран срок действия патента – 20 лет с правом продления этого срока еще на пять лет. Выдача патента и его поддержание обеспечивается государственной пошлиной, выплачиваемой патентообладателем.

Цель предлагаемой работы – дать системное представление о многообразии технических решений на уровне способов формообразующей обработки, т. е. искусственно создаваемых технических решений (идей), обеспечивающих достижение конкретных технических эффектов при их реализации в технологических операциях и технологических машинах. В работе рассматриваются, преимущественно, способы обработки, основанные на механическом резании, относящиеся к отрасли техники, соответствующей учебным планам инженерных специальностей 1-36 01 01 и 1-36 01 03. Однако изложенные в нем методологические основы системологии способов обработки носят всеобщий характер. Поэтому фундаментальные положения, приведенные в данной работе, могут быть распространены и на способы, основанные на иных физических явлениях, характерных для учебных планов других инженерных специальностей.

2. СИСТЕМНЫЙ ХАРАКТЕР СПОСОБОВ ФОРМООБРАЗУЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ

2.1. Определение понятия способа формообразующей обработки

Сущность любого технологического процесса изготовления деталей машин заключается в получении на твердом теле (заготовке) поверхностей заданных геометрических форм и размеров с определенными физико-механическими свойствами. Для проведения таких технологических процессов в машиностроении используются различные технологические машины: металлорежущие станки, кузнечно-прессовое оборудование, машины для наплавки, станки для электрофизической обработки и другие объекты техники, в основу конструкций которых положены разные способы формообразующей обработки. В технологии металлообработки понятие способа обработки часто смешивается с понятием метода обработки. Причем содержание этих понятий в технической литературе часто не раскрывается, а предполагается как аксиома.

В общеметодологической литературе [3] дано следующее определение метода: «Метод (от греческого *methodos*) – путь исследования или познания, теория, учение, совокупность приемов или операций практического или теоретического освоения действительности, подчиненных решению конкретной задачи. В качестве метода может выступать система операций при работе на определенном оборудовании...». В приведенном определении по существу объединены два принципиально различных понятия. Метод как «путь исследования или познания» – это общенаучная или философская категория, а «система операций при работе на определенном оборудовании» определяет производственный процесс, управляемый по вполне определенному алгоритму, заданному, как правило, технологией обработки, являющейся вторичным источником информации. В настоящее время при обработке резанием наметилась также тенденция использования первичного источника информации – чертежа детали. Это характерно для технологических машин (металлорежущих станков) с непосредственным компьютерным управлением, т. е. оснащенных системами ЧПУ класса PCNC. Вполне естественно, что первое понятие не может рассматривать способ обработки (технический объект), являющийся одновременно объектом патентного права. Второе понятие, т. е. «система операций», выполняемых на технологическом оборудовании или отдельной технологической машине, может включать не только приемы, связанные с обработкой, например формообразование поверхностей обрабатываемых деталей, но и другие приемы, в частности, управления, обслуживания, уборки стружки, операционного контроля, диагностики технологической машины и т. п.

В нормативной, патентной литературе [4] периода возрождения в Советском Союзе Комитета по делам изобретений способ определяется как процесс выполнения взаимосвязанных действий, необходимых для достижения поставленной цели. Согласно этого определения, в практике патентования способ не содержит несколько несвязанных между собой совокупностей взаимосвязанных действий, имеющих различное отношение к решаемой задаче. Это позволяет различать способы формообразования, термообработки, управления технологическими машинами, способы уборки стружки, охлаждения зоны обработки и т. п. Таким образом, можно утверждать, что понятие «система операций» есть более широкое понятие, чем способ. Следовательно, способ – одна из частных конкретных совокупностей приемов взаимосвязанных действий, наделенных собственной целью.

В монографии [5] показано, что приведенное нормативное определение способа не в полной мере соответствует научно-технической экспертизе изобретений, так как учитывает только совокупность взаимосвязанных действий, т. е. структуру способа. Вместе с тем в практике патентной экспертизы способами признаются также технические идеи, характеризующиеся и другими признаками, например, последовательностью выполнения действий, состоянием среды, в которой осуществляется то или иное действие, временем осуществления какого-то действия и т. п. Следовательно, нормативное определение способа недостаточно корректно для точной научной дисциплины. Данный тезис подтверждается структурным анализом произвольно выбранных способов формообразующей обработки, признанных в разное время изобретениями и защищенных соответствующими охранными документами. И на этой основе предлагается определение понятия способа формообразующей обработки.

В основу большинства зубодолбежных станков для обработки цилиндрических зубчатых колес положен пионерный способ обкатного зубодолбления, предложенный в конце XIX ст. Феллоу Гир-Шепером. По этому способу (рис. 2.1) заготовка I относительно долбяка 2 устанавливается в плоскости $A - A$, совпадающей с плоскостью осей заготовки и долбяка. Процесс получения зубчатого колеса осуществляется в результате сообщения долбяку и заготовке нескольких формообразующих и вспомогательных движений. Образующая зубчатого колеса – прямая, параллельная оси заготовки, – воспроизводится элементарным формообразующим поступательно-возвратным движением II_1 долбяка, а направляющая, имеющая форму профиля поперечного сечения нарезаемого колеса, – сложным движением обката B_2B_3 , состоящим из двух функционально связанных элементарных движений:

вращения B_2 долбяка и вращения B_3 заготовки. На начальном этапе одновременно с указанными движениями заготовке (или долбяку) сообщается движение Π_4 радиального врезания на высоту зуба нарезаемого колеса. В течение всего цикла обработки долбяку (или заготовке) сообщается движение Π_5 «отскока», синхронизированное с движением Π_1 долбяка. Движение отскока предназначено для отвода долбяка от заготовки при его возвратном ходе с целью устранения скольжения зубьев долбяка о профилируемые зубья колеса. Уместно отметить, что скольжение зубьев долбяка о профилируемые зубья колеса, характерное для обкатного зубодолбления, называют явлением затирания.

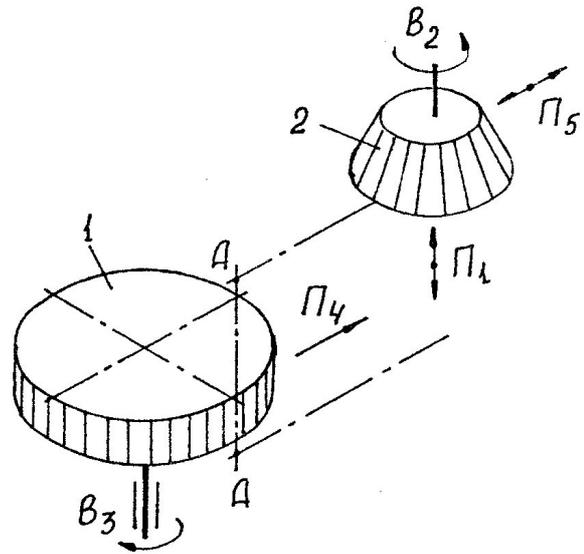


Рис. 2.1. Способ долбления прямозубых цилиндрических колес при радиальном врезании

В приведенном примере способ формообразующей обработки характеризуется некоторой совокупностью приемов, т. е. целенаправленных действий, совершаемых над материальными объектами – заготовкой и долбяком для достижения конкретной цели – получения прямозубого колеса внешнего зацепления. Наряду с приемами целенаправленных действий в качестве признаков способа выступают последовательность приемов и правила выполнения отдельных приемов – определенность установки заготовки относительно направления движения врезания и существенно меньшей скорости движения врезания и скорости обката по сравнению со скоростью резания. Следует отметить, что выполнение отдельных приемов не имеет причинной связи с технологическими режимами выполнения операции зубодолбления. Таким образом, целенаправленная совокупность приемов, осуществляющихся в заданной последовательности с определенными правилами выполнения отдельных приемов, характеризует данный способ зубодолбления как законченный целостный объект реальной действительности.

До изобретения описанного способа обработка зубчатых колес осуществлялась на различных этапах развития техники и технологии иными способами, например, сверлением на диске отверстий с требуемым шагом и запрессовки в эти отверстия цилиндрических пальцев, свободной ковкой с контролем посредством шаблона, строганием по копиру или разметке и т. п. Общими недостатками данных способов являются невысокая произ-

водительность и низкое качество получаемых зубчатых колес. Это обстоятельство по существу и привело к изобретению способа обкатного зубодолбления. Данное обстоятельство позволяет утверждать, что цель создания этого способа – повышение производительности и качества получаемых зубчатых колес. Следует также отметить, что в конце XIX ст. был изобретен еще один пионерный способ обкатной обработки зубчатых колес, в котором в качестве инструмента используется червячная фреза.

Изобретение способов (технических идей) обкатного зубодолбления и обкатного зубофрезерования сопровождалось разработкой зуборезного долбяка и червячной фрезы и соответствующих станков для нарезания зубчатых колес. Эти технические объекты, т. е. режущие инструменты и металлорежущие станки также являются изобретениями. Можно утверждать, что изобретение обкатного зубодолбления и обкатного зубофрезерования совершило в XX ст. революционные преобразования в сфере производства зубчатых колес, реек и подобных им деталей.

Приведенный способ зубодолбления имеет ряд классических модификаций, признанных в разное время изобретениями. В частности для обработки косозубых колес. В этой модификации для получения образующей зубчатого колеса – прямой, наклоненной к оси заготовки, – движение B_2 долбяка преобразуют из вращательного во вращательно-возвратное, которое функционально связывают с поступательно-возвратным движением Π_1 долбяка. Таким образом, при обработке косозубых колес линия зуба (образующая) воспроизводится сложным винтовым движением долбяка $\Pi_1 B_2$. Правила выполнения остальных движений ($B_2 B_3$, Π_4 , Π_5) остаются неизменными. По существу в данной модификации движение B_2 долбяка входит в два сложных формообразующих движения, что равнозначно алгебраическому суммированию двух независимых движений: вращательно-возвратного B_2^1 и вращательного B_2^2 . При долблении колес внутреннего зацепления как прямозубых, так и косозубых модификация сводится к тому, что долбяку и заготовке в сложном движении обката $B_2 B_3$ элементарные вращательные движения сообщают в одну и ту же сторону.

При описании пионерного способа предполагалось, что процесс зубодолбления осуществляется за один проход заготовки после прекращения врезания (однопроходная обработка). В соответствии с общеизвестной нормативной классической рекомендацией эта схема используется также при зубодолблении за два или три прохода (многопроходная обработка). Каждому проходу предшествует врезание на часть припуска. При этом наибольший припуск срезается на первом проходе.

Заметим, что приведенные модификации пионерного способа зубодоблечения по существу являются производными способами, обеспечивающими достижение как пионерной цели (получение цилиндрического зубчатого колеса), так и дополнительных целей (соответственно получение винтового зуба, получение зубчатого венца внутреннего зацепления, снижение усилия резания при обработке зубчатых колес с большим модулем).

При изготовлении деталей с износостойким поверхностным слоем заготовку 1 (рис. 2.2) с запрессованной шихтой 2 вводят в индуктор 3 токов высокой частоты и нагревают в течение времени, необходимого для полного равномерного прогрева шихты и начала ее спекания. После этого, не прекращая нагревания, заготовке сообщают вращение B_1 вокруг оси, необходимое для окончательного формирования поверхностного слоя. В результате нагрева и действия центробежных сил P шихта, спекаясь, уплотняется и припекается к внутренней поверхности заготовки, образуя полую деталь с износостойким поверхностным слоем. Затем нагревание прекращают, а через определенное время, необходимое для полного затвердевания поверхностного слоя, выключают вращение заготовки.

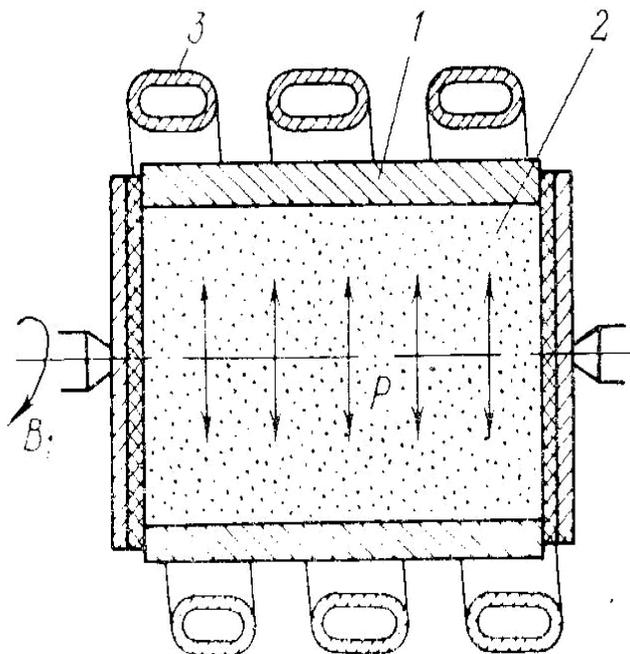


Рис. 2.2. Способ получения внутренних поверхностей

Данный способ формообразующей обработки, основанный на прибавлении вещества к твердому телу, также характеризуется целенаправленной совокупностью приемов, их последовательностью и некоторыми обязательными правилами выполнения. К ним относятся определенность размещения шихты (исходного материала наплавленного слоя), определенность установки заготовки с запрессованной шихтой, время прогрева шихты до начала ее спекания и время вращения детали после выключения нагревания для полного затвердевания прибавленного вещества. Как и в примере, приведенном для зубообработки, правила выполнения отдельных приемов способа тоже не имеют причинной связи с технологическим ре-

жимом проведения операции наплавки. Специфической особенностью рассматриваемого способа является отсутствие инструмента и передача его функции объекту, выполняющему функцию инструмента (полю центробежных сил), основанному на физическом явлении. Особенность способа заключается также в использовании двух энергетических источников (теплого и силового полей), воздействующих на шихту.

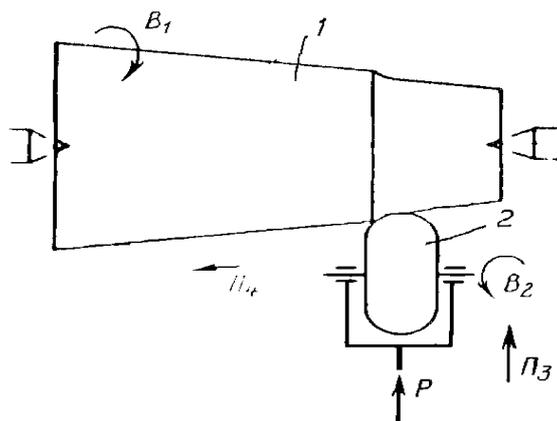


Рис. 2.3. Способ обкатки конической поверхности

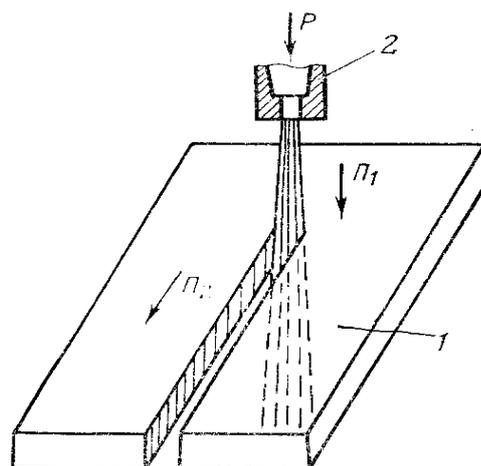


Рис. 2.4. Способ резания струей жидкости

При чистовой упрочняющей обработке конических поверхностей (рис. 2.3) деталь 1 закрепляют в патроне или в центрах токарного станка и сообщают ей вращательное движение B_1 . Затем движением P_3 подводят к детали накатной ролик 2, создавая определенный натяг, необходимый для формирования поверхности детали. Вследствие фрикционного контакта поверхностей накатной ролик получает вращательное движение B_2 . После чего ему сообщают движение подачи P_4 вдоль направляющей обкатываемой поверхности. В результате такого воздействия накатным роликом на деталь происходит обработка ее конической поверхности.

Данный способ основан на пластическом деформировании поверхностного слоя детали, т. е. на перераспределении материала поверхностного слоя заготовки. Целесообразно организованная совокупность приемов воздействия на обкатываемую поверхность характеризует его как целенаправленный технический объект.

На рис. 2.4 приведена схема способа резания струей жидкости. При его осуществлении заготовку 1 устанавливают под соплом 2. Затем через него в направлении резания P_1 подают струю жидкости диаметром 0,12 – 0,29 мм под давлением свыше 100 МПа со скоростью около 1500 м/с, а заготовке –

движение $П_2$ в направлении подачи. При таких характеристиках струи жидкости ее воздействие на твердое тело обеспечивает качественную и производительную обработку деталей со сложным контуром. Данный способ основан на механическом резании. Однако в отличие от традиционных способов резания в нем в качестве инструмента используется струя жидкости. Вместе с тем способ резания струей жидкости, как и рассмотренные выше, представляет собой вполне определенный целенаправленный объект.

При рассмотрении конкретных способов формообразующей обработки были установлены некоторые правила выполнения отдельных приемов. Дополнительными правилами, характеризующими те или иные приемы, составляющие различные способы, могут быть температура, усилие резания, стойкость инструмента, вектор направления воздействия энергетического поля, состояние среды, в которой осуществляется способ, и т. д. Главной особенностью правил выполнения отдельных приемов является отсутствие причинной связи между ними и технологическими режимами выполнения конкретных операций. Правила выполнения отдельных приемов объединены с совокупностью приемов лишь общей решаемой задачей. В этом заключается принципиальная сущность отличия способов формообразующей обработки от технологических операций.

Возвращаясь вновь к рассмотренным примерам, замечаем, что при формообразующей обработке воздействовать на твердое тело можно не только инструментом, но и обходиться без него, передавая его функцию объекту, основанному на каком-либо физическом явлении. Вместе с тем целевое назначение различных способов формообразующей обработки – получение на твердом теле поверхностей заданных геометрических форм и размеров с определенными физико-механическими свойствами. Это позволяет рассматривать и анализировать различные на первый взгляд способы формообразующей обработки совместно с единых позиций.

На основании изложенного следующим образом было сформулировано понятие способа формообразующей обработки.

Способ формообразующей обработки – это целенаправленная совокупность (множество) приемов воздействия посредством инструмента или объекта, выполняющего его функцию, на твердое тело, осуществляемых в заданной последовательности с соблюдением определенных правил, например, в течение некоторого времени, при определенном соотношении воздействий приемов, определенной температуре, определенном состоянии среды, в которой происходит процесс.

Данное определение способа формообразующей обработки, предложенное в 1986 г. адекватно следующему определению, используемому в настоящее время в патентном законодательстве Республики Беларусь [6].

«К способам как объектам изобретения относятся процессы выполнения действий (операций, приемов), приводящих к созданию новых или изменению известных материальных объектов, или процессы исследования материальных объектов. Для характеристики способа могут быть использованы следующие признаки: выполняемые действия (операции); последовательность выполняемых действий; условия осуществления действий (операций), использование веществ (сырья, реагентов, катализаторов), устройств, штаммов, микроорганизмов, культур клеток растений и животных».

2.2. Способ формообразующей обработки как целенаправленная техническая система

Известны многочисленные попытки дать четкое определение системы. Как правило, они не альтернативны, а взаимно дополняют друг друга. Вместе с тем все известные определения понятия системы можно разделить на две принципиально различные группы. Первую составляют определения, в которых предпринимается попытка унифицировать всю системную концепцию путем формулирования некоторого единого всеобщего определения системы на основе общих законов, граничащих с философскими. Во вторую входят определения, характеризующие систему как некоторый фрагмент объективной реальности существующей действительности, вычлененной для достижения заданной цели. При этом само вычленение зависит как от характера реальности, так и от познавательных или практических потребностей. Понятия второй группы включают субъективный фактор. Тем не менее, применительно к конкретному исследованию в области естественных наук более правильны определения понятия системы, составляющие именно эту группу, так как в данном случае теория систем имеет свою сферу применения, в то время как определения первой группы фактически приводят к утрате качественной специфики этого понятия.

Изложенное выше позволяет объяснить такие широко используемые в обработке резанием понятия, как схемы резания и возникновение поверхности в пространстве и времени. Первое характеризует основную сущность процесса резания – процесс образования стружки, а второе – геометрическую интерпретацию получения поверхностей при механической обработке. Следовательно, объекты, определяемые этими понятиями, вычленены из реальной действительности для конкретных исследований – систематизации механического резания с позиций стружкообразования и систематизации схем образования поверхностей с геометрической точки зрения.

Необходимо отметить, что понятия схем резания и возникновения поверхности являются более узкими, чем понятие способа формообразующей обработки, данное в предыдущем параграфе.

Таким образом, концептуальную и методологическую разработку системного подхода необязательно начинать с выработки некоторого исчерпывающего $n + 1$ -го определения системы. Поэтому воспользуемся одним из известных определений, наиболее приемлемым для настоящей работы. Под системой будем понимать совокупность целесообразно организованных функционально связанных элементов, участвующих в процессе достижения определенной цели, выступающую по отношению к другим системам и окружающей среде как нечто единое. Качественная определенность системы обусловлена ее структурой и функцией. Будем понимать под структурой схему связей и отношений между элементами системы, а под функцией – порядок осуществления процесса.

Из приведенного определения системы следует, что любой способ формообразующей обработки может быть отнесен к категории системных в том случае, если он обладает целостностью, а его свойства и функция не сводятся непосредственно к свойствам и функциям составляющих его элементов.

В обработке материалов резанием используется множество различных способов токарной обработки. Простейший и в тоже время пионерный в этом множестве был изобретен до нашей эры. Так Архимед, знаменитый ученый древнего мира (III век до нашей эры), в описании прибора для астрономических измерений упоминает «...небольшой цилиндр, обточенный на токарном станке». С тех пор техника обработки резанием, в том числе токарная обработка, прошла длинный и сложный путь развития – от примитивной ручной до сложнейшей автоматизированной механической обработки, уровень которой определяется общим уровнем техники и характеризуется точностью получаемых изделий и производительностью.

На современном языке формула изобретения данного пионерного способа формообразующей обработки имеет следующий вид.

Способ токарной обработки резанием, заключающийся в том, что заготовке сообщают вращательное движение относительно оси ее вращения, а резцу подачу в направлении, параллельном оси заготовки.

Схема, иллюстрирующая этот способ, приведена на рис. 2.5. По этому способу заготовке 1 , определенным образом ориентированной относительно резца 2 , сообщают вращение B_1 вокруг ее оси, а резцу – поступательное перемещение P_2 вдоль оси заготовки. В результате целенаправленного выполнения этих приемов резец 2 срезает с заготовки 1 определенный

слой материала, образуя на твердом теле поверхность заданной формы и размеров с физико-механическими свойствами, зависящими от технологических режимов выполнения приемов и свойств материала заготовки.

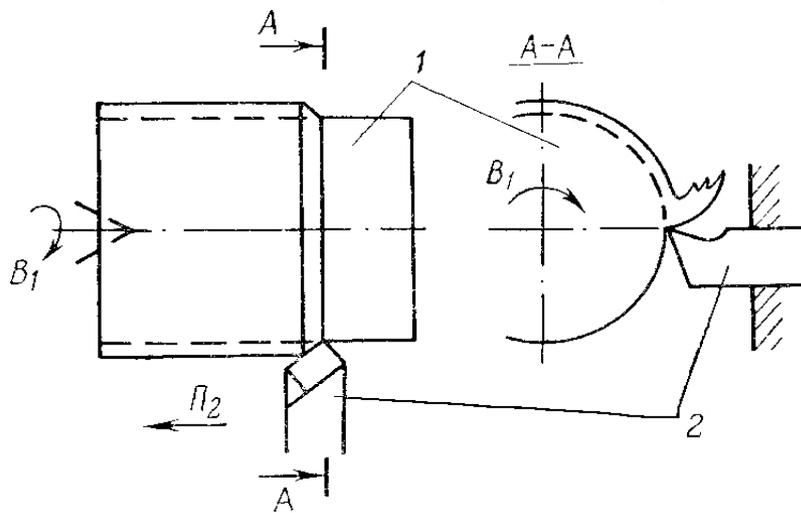


Рис. 2.5. Способ токарной обработки

элементов: приемов (установка заготовки 1, сообщение ей вращения B_1 , сообщение резцу поступательного перемещения P_2); последовательности приемов (вначале установка заготовки, а затем сообщение ей и резцу движений); правил выполнения отдельных приемов (определенность базирования заготовки относительно резца или окружающей среды, характеризуемой системой координат пространства и времени, существенно меньшей скорости перемещения резца по сравнению со скоростью вращения заготовки). Отметим, что два последних элемента (правила выполнения отдельных приемов) в практике металлообработки подразумеваются как сами собой разумеющиеся. Поэтому при описании способов формообразующей обработки как патентной, так и в технической литературе они обычно опускаются.

Анализ показывает, что рассмотренный способ токарной обработки может быть отнесен к категории системных. Вместе с тем он подпадает под понятие способа формообразующей обработки, определенное в предыдущем параграфе.

Пример, раскрывающий системный характер конкретного способа формообразующей обработки, выбран произвольно из множества реально существующих способов. Аналогично можно анализировать и другие способы, например рассмотренные ранее, независимо от вида энергии, используемой для воздействия на твердое тело. Следовательно, это позволяет утверждать, что любой способ формообразующей обработки одновремен-

Анализируя описанный способ токарной обработки, замечаем, что он обеспечивает качественное изменение объекта производства – твердого тела. В этом заключается целостность способа и его функция. Структура способа состоит из следующих целесообразно организованных

но является системой. Можно целенаправленно изменять структуру и функцию исходных способов, называемых в научно-технической экспертизе (НТЭ) изобретений аналогами и прототипами, и тем самым получать качественно новые способы с иной структурой и функцией, обеспечивающие достижение новой конкретной цели. Естественно, структурные изменения могут охватывать не только отдельные структурные элементы, но и значительно преобразовывать структуру и функцию, что влечет за собой появление новых способов, в том числе подлежащих правовой охране. Однако любой новый способ формообразующей обработки будет характеризоваться со стороны целостности как относительно обособленный объект из совокупности всех известных и возможных новых способов, объединенных общей пионерной или первообразной целью; со стороны функции – как процесс формообразования поверхностей заданной формы и размеров с определенными физико-механическими свойствами, т. е. как процесс качественного изменения твердого тела; со стороны структуры – как множество целесообразно связанных элементов (приемов, их последовательности и правил выполнения). Объекты – способы формообразующей обработки, обладающие совокупностью названных свойств, – являются результатом творческого поиска и создаются для решения конкретных задач. Следовательно, они могут быть отнесены к категории технических систем, обозначаемых в дальнейшем как S-системы.

При реализации рассмотренных в настоящем разделе способов формообразующей обработки в виде технологических операций на соответствующих технологических машинах режимы обработки устанавливаются до начала процесса формообразования, что по существу является статической настройкой и соответствует известному в области систем управления принципу «как сделать». По этому принципу при формообразующей обработке не учитывается информация о динамике процесса резания. В итоге возникают отклонения от заданной при статической настройке точности относительного положения и движения инструмента, и обрабатываемой заготовки. Эти отклонения носят переменный характер и изменяются случайно или по определенному закону в функции времени, в функции координат. Исходя из этого, достижение повышенной точности возможно посредством непрерывной во времени регистрации информации о процессе резания, например, о силе резания и синхронное внесение соответствующей поправки в правило выполнения одного из приемов, например, подачи. Такое регулирование процесса резания при формообразующей обработке принято называть адаптивным предельным регулированием. В этом случае принцип «как сделать» приобретает характер задания типа «что сделать» для обеспечения более высокой точности, чем при статической настройке.

Из множества факторов, искажающих точность обработки на технологических машинах, назовем два, имеющих непосредственное отношение к способам формообразующей обработки резанием. Это – неравномерность припуска и микротвердости материала обрабатываемых заготовок от сечения к сечению, изменяющиеся случайно.

Вернемся к способу токарной обработки по рис. 2.5. Воздействие инструмента на заготовку внешне проявляется в виде силы резания. Сила резания зависит от многих факторов: скорости резания, подачи, геометрии вспомогательного элемента инструмента, припуска на обработку, твердости материала заготовки и т. п. Следует отметить, что припуск и твердость являются усредненными параметрами. При обработке сила резания непрерывно изменяется в большую и меньшую стороны от номинального (усредненного) значения. При этом амплитуда ее изменения будет увеличиваться или уменьшаться пропорционально случайному изменению амплитуд припуска и микротвердости заготовки. Такое изменение вызывает пропорциональное изменение упругого отжатия в контакте заготовка – инструмент. Следствием этого является двухстороннее изменение размера от номинального значения.

Сила резания наиболее чувствительно реагирует на изменение подачи при прочих равных условиях. Можно непрерывно регистрировать силу резания и преобразовывать ее значение в сигнал, удобный для пропорционального непрерывного во времени изменения правила выполнения подачи. Управляя таким образом подачей, можно стабилизировать силу резания и, следовательно, свести к минимуму влияние указанных выше факторов, изменяющихся случайно, на процесс резания. В итоге будет уменьшаться поле рассеяния размера, получаемого в процессе обработки, что соответствует более высокой точности обработки, чем при статической настройке.

Вероятно, именно таким образом в середине XX столетия автор рассмотренного пионерного способа формообразующей обработки решал технологическую задачу повышения точности обработки посредством стабилизации силы резания. По существу в данном техническом решении впервые технологическая задача повышения точности обработки пересекается с геометрической задачей формообразования поверхности при резании.

Формулу изобретения данного способа формообразующей обработки можно сформулировать следующим образом.

Способ токарной обработки, включающий сообщение заготовке вращательного движения, а инструменту – движения подачи, параллельно оси заготовки, отличающийся тем, что в процессе обработки непрерывно регистрируют силу резания и при ее увеличении или уменьшении пропорционально уменьшают или увеличивают подачу.

Цель изобретения – повышение точности обработки посредством стабилизации силы резания за счет устранения влияния случайных факторов – неравномерности припуска на обработку и микротвердости материала заготовки от сечения к сечению.

В качестве стабилизируемого параметра может использоваться также крутящий момент и мощность резания при решении той же технологической задачи, т. е. повышения точности обработки.

Рассмотренный способ формообразующей обработки это начало создания и развития систем адаптивного управления технологическим оборудованием. Наиболее широко эти системы используются в металлорежущих станках с ЧПУ.

По сложившейся традиции к адаптивному управлению формообразующей обработкой наряду с описанным двухсторонним предельным регулированием статически заданного правила выполнения приема (подачи) относят также оптимальное регулирование. Этот вид регулирования обеспечивает беспрепятственное аналитическое или поисковое экспериментальное определение режима обработки по различным критериям, например, минимуму приведенных затрат, максимуму стойкости инструмента и др. При оптимальном регулировании стабилизация силового параметра (силы резания, крутящего момента или мощности резания) не осуществляется. Из этого можно сделать вывод, что оптимальное регулирование не имеет непосредственного отношения к способам формообразующей обработки.

2.3. Цель как критерий целесообразности развития многообразия S-систем

В широком смысле функцию системы можно определить как ее способность к целесообразной деятельности в рамках более сложной системы, в состав которой она входит. Целесообразная деятельность S-систем заключается в воздействии на твердое тело в пространстве и времени, т. е. внешней среде, характеризуемой системой координат и временем как независимой переменной с целью получения из исходного объекта – заготовки готового изделия с заданными геометрическими формами, размерами и физико-механическими свойствами. Наряду с названной целью, которую можно рассматривать как первообразную, определяющую основную сущность функционирования всех S-систем, в соответствии с потребностями практики машиностроения ставится ряд конкретных производных целей при создании таких систем. Как показывает анализ патентных источников, производной целью может быть повышение точности или производитель-

ности обработки, увеличение периода стойкости инструмента, снижение энергоемкости процесса обработки, достижение новых ранее неизвестных совокупностей свойств изделий, исключение из процесса некоторых промежуточных фаз и т. п. При создании новых S-систем на уровне изобретений цель при переходе от прототипа к новому техническому решению изменяется скачкообразно как при количественном, так и при качественном ее задании. При материализации новой системы в виде технологической операции цель, заданная количественно, может быть оптимизирована через управляемые независимые параметры процесса обработки. Все это приводит к периодической переоценке места и значимости, разных S-систем и их групп на основе широкого комбинирования различных вариантов структурных элементов, их последовательностей и правил выполнения. Проиллюстрируем изложенное на конкретном примере.

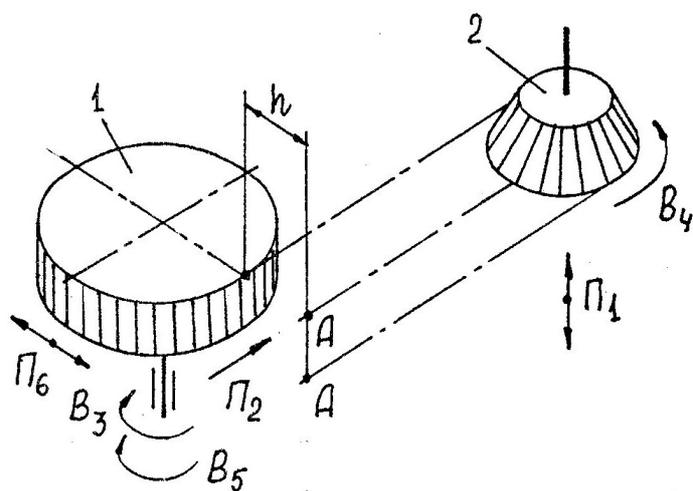


Рис. 2.6. Зубодолбление с касательным врезанием

Первообразным для способа зубодолбления с касательным врезанием по патенту 475761 (SU) является рассмотренный выше пионерный способ по рис. 2.1. При касательном врезании (рис. 2.6) заготовку 1 устанавливают на расстоянии h от плоскости движения врезания, равном полюсине диаметра делительной окружности долбяка 2. Затем долбяку 2 сообщают поступательно-возвратное движение P_1 скорости резания, и процесс долбления выполняют в два этапа. На первом этапе заготовке 1 сообщают движение врезания P_2 , согласованное с ее вращением V_3 , и одновременно долбяку и заготовке сообщают движение обката (профилирования зубьев), состоящее из согласованных вращений V_4 долбяка и V_5 заготовки. Этот этап продолжают до тех пор, пока ось долбяка не переместится на линию $A - A$, соответствующую окончанию врезания на высоту зуба нарезаемого колеса. Затем движение врезания P_2V_3 прекращают и на втором этапе в течение одного оборота заготовки профилируют нарезаемое колесо движением обката V_4V_5 . На обоих этапах обработке заготовке сообщают также движение P_6 «отскока».

татем долбяку 2 сообщают поступательно-возвратное движение P_1 скорости резания, и процесс долбления выполняют в два этапа. На первом этапе заготовке 1 сообщают движение врезания P_2 , согласованное с ее вращением V_3 , и одновременно долбяку и заготовке сообщают движение обката (профилирования зубьев), состоящее из согласованных вращений V_4 долбяка и V_5 заготовки. Этот этап продолжают до тех пор, пока ось долбяка не переместится на линию $A - A$, соответствующую окончанию врезания на высоту зуба нарезаемого колеса. Затем движение врезания P_2V_3 прекращают и на втором этапе в течение одного оборота заготовки профилируют нарезаемое колесо движением обката V_4V_5 . На обоих этапах обработке заготовке сообщают также движение P_6 «отскока».

Цель способа зубодолбления с касательным врезанием автором определена в виде улучшения условий резания и повышения стойкости долбяка. По-видимому, с точки зрения экспертизы изобретений в данном случае было бы более корректно задание цели в виде повышения стойкости долбяка за счет улучшения условий резания на этапе врезания.

В анализируемом примере цель имеет качественную меру. Поэтому ее параметрическая оптимизация, например, максимизация период стойкости долбяка вследствие улучшения условий резания в данном случае, видимо, невозможна. Вместе с тем отметим, что переход к касательному врезанию снижает производительность обработки при сохранении традиционных соотношений между подачей врезания и круговой подачей. Объясняется это тем, что при касательном врезании путь движения врезания возрастает пропорционально увеличению модуля и чисел зубьев долбяка и нарезаемого колеса, что ставит под сомнение возможность использования данного способа при проектировании зубодолбежных станков.

Сохраняя преимущество рассматриваемого способа по отношению к прототипу, заданное качественной целью, устраним выявленный недостаток, т. е. найдем путь увеличения производительности при зубодолблении с касательным врезанием. Достижение этой цели возможно на основе следующих рассуждений. При зубодолблении сумма скоростей врезания и круговой подачи на этапе врезания лимитирует прочностные возможности долбяка и механики станка. Следовательно, для повышения производительности круговая подача должна быть максимально возможной по сравнению с подачей врезания. Поэтому традиционно подачу врезания назначают равной 0,1 – 0,3 от круговой подачи. Учитывая это, изменим порядок выполнения приемов врезания и профилирования и одновременно правило выполнения врезания. На первом этапе обработки можно осуществлять только врезание, а на втором – только обкат (профилирование). Подачу врезания назначим из условия предельных прочностных возможностей, т. е. равной 1,1 – 1,3 круговой подачи. Как показывают расчеты, машинное время зубодолбления при таком изменении S-системы скачкообразно уменьшается в 1,2 – 1,7 раза в зависимости от числа зубьев нарезаемого колеса. В случае материализации полученной таким образом новой S-системы в соответствующем станке и выполняемой на нем технологической операции в пределах указанного скачкообразного уменьшения машинного времени возможна параметрическая оптимизация цели (повышение производительности), например, при задании максимально допустимой величины огранки зубьев нарезаемого колеса.

По существу рассмотренные изменения последовательности выполнения приемов (подачи врезания и круговой подачи) и правил их выполнения являются предпосылкой для признания такого изменения исходного способа изобретением.

2.4. Способ формообразующей обработки как объединение кинематической, базирующей, энергетической и стабилизирующей силовое воздействие подсистем

Рассматривая различные S-системы (способы формообразующей обработки), несмотря на их большое многообразие, уровень сложности (развитости), вид используемой энергии и характер функционирования, в их структуре можно выделить некоторые наиболее общие составляющие, присущие всем известным и возможным новым S-системам.

Любая S-система является прообразом конкретной технологической операции, характеризующейся набором свойств и отношений применительно к конкретному обрабатываемому материалу. Наиболее общей характеристикой любой операции является ее повторяемость при условии повторения в определенных задаваемых пределах количественных и качественных характеристик получаемых результатов. Следовательно, можно утверждать, что эта характеристика присуща и S-системам.

Рассмотренные в данном разделе примеры S-систем подтверждают известный тезис о том, что процесс воздействия на твердое тело при формообразующей обработке осуществляется при определенных относительных движениях заготовки и инструмента. Определенность траекторий формообразующих движений обеспечивается схемой формообразования поверхности, которая определяет закономерности относительного движения заготовки и инструмента без учета физических явлений, протекающих в зоне обработки, действующих сил, температур и активных сред. По существу схема формообразования является графическим представлением соответствующего способа. В НТЭ изобретений схема формообразования является составной частью описания изобретения и используется для детальной конкретизации описания и формулы изобретения, выражаемой на вербальном (словесном) языке в форме одного предложения. Можно утверждать, что схема формообразования характеризует общую составляющую S-систем – кинематическую. Она относительно выделена, наделена определенной структурой и функцией. Будем называть ее кинематической подсистемой S-системы.

Второй общей составляющей S-систем является совокупность элементов, обеспечивающих определенность исходной установки заготовки относительно инструмента или в общем случае относительно объекта, воздействующего на заготовку. Эта составляющая S-систем обеспечивается схемой базирования заготовки, реализуемой в конкретных технологических машинах различными по конструкции устройствами. Схема базирования, являясь составной частью S-системы, также характеризуется относительной выделенностью, наделена определенной структурой и функцией. Такую общую составляющую S-систем будем называть базирующей подсистемой.

Процесс воздействия на твердое тело осуществляется посредством подвода в зону обработки энергии различного вида. Вид используемой энергии определяет вид физического или физико-химического воздействия, играющего роль в изменении исходного состояния твердого тела: в снятии материала удаляемого слоя, в прибавлении материала к заготовке или в перераспределении материала твердого тела. Основными физико-химическими процессами, обуславливающим изменение исходного состояния твердого тела, являются пластическая деформация, вязкое или хрупкое разрушение, плавление, литье, испарение, анодное растворение, эрозионное разрушение, травление (химическое разрушение), диффузионное насыщение и т. п. Определенность энергетического воздействия на твердое тело обеспечивается схемой подвода энергии, характеризующей закономерности подвода энергии непосредственно для технологических целей без учета ее преобразований, происходящих в обрабатываемом материале. Схема энергетического воздействия – третья общая составляющая, присущая всем S-системам. Так же как и две предыдущие, она характеризуется относительной выделенностью и имеет определенную структуру и функцию. Будем называть ее энергетической подсистемой.

Таким образом, в наиболее общем виде абсолютное большинство способов формообразующей обработки, определяемых как S-система, можно представить в виде объединения относительно обособленных подсистем (кинематической, базирующей и энергетической), каждая из которых наделена структурой и функцией. Причем, как следует из изложенного выше, структура и функция S-систем не сводятся непосредственно к структуре и функции составляющих ее подсистем.

Способы обработки, представляемые как S-системы, состоящие из трех названных подсистем, решают геометрическую задачу при воспроизведении реальных поверхностей. При этом точность получаемых поверхностей конкретных деталей ограничивается статическим заданием правил выполнения приемов воздействия на заготовку, т.е. статической настройкой параметров обработки.

Дальнейшее повышение точности обработки привело к созданию систем с динамической настройкой, обеспечивающей стабилизацию силового воздействия на заготовку посредством устранения влияния изменяющихся случайно факторов – неравномерности припуска и микротвердости обрабатываемых заготовок от сечения к сечению – на силовое воздействие, например, силу резания в зоне обработки. Такую стабилизацию силового воздействия в терминах теории автоматического регулирования принято называть предельным регулированием. Следовательно, можно утверждать, что схема стабилизации силового воздействия является четвертой составляющей, присущей S-системам с адаптацией к случайно изменяющимся факторам. Так же как и три предыдущие, она относительно выделена и имеет определенную структуру и функцию. Будем называть эту составляющую подсистемой стабилизации силового воздействия.

S-системы, содержащие подсистему стабилизации силового воздействия, как правило, реализуются в высокоточных станках с ЧПУ.

Таким образом, можно утверждать, что все многообразие S-систем (способов формообразующей обработки) состоит из двух классов. Первый класс составляют традиционные S-системы, функционирующие в режиме статической настройки, а второй класс – относительно новые S-системы, функционирующие в режиме стабилизации силового воздействия, т. е. в режиме статической и динамической настроек.

2.5. Многообразие способов формообразующей обработки как большая развивающаяся система

Способы формообразующей обработки (S-системы) можно разделить на три больших непрерывно пополняющихся класса, различающихся между собой по виду воспроизведения реальных поверхностей деталей машин. Первый класс составляют S-системы, основанные на удалении части вещества твердого тела заготовки, второй – S-системы, основанные на прибавлении вещества к заготовке, и третий – S-системы, основанные на перераспределении вещества заготовки. Вместе с тем в основе любой S-системы, независимо от ее принадлежности к одному из названных классов, лежат первичные факторы физического воздействия на вещество твердого тела. Наиболее значительна группа S-систем, использующих только одно из возможных физических или химических воздействий, например, обработка поверхностным пластическим деформированием – механическое воздействие рабочих поверхностей деформирующих инструментов, лучевая обработка – тепловое воздействие сфокусированного луча с высокой плотностью энер-

гии и т. д. Известны S-системы, в которых используются два первичных воздействия на твердое тело, например, обработка резанием с опережающим пластическим деформированием – механическое воздействие деформирующего ролика и механическое воздействие рабочей поверхности резца, анодно-механическая обработка – электрохимическое воздействие электрического тока и механическое воздействие инструмента, центробежная наплавка поверхностного слоя в поле токов высокой частоты – тепловое воздействие токов высокой частоты и механическое воздействие центробежных сил. Используется и большее число первичных воздействий.

Первичные воздействия на вещество твердого тела разделяются на механические, электрические, магнитные, тепловые, лучевые и химические. Для каждого воздействия применяется соответственно механическая, электрическая, магнитная, тепловая, лучевая и химическая энергия непосредственно для технологических целей, т. е. для формоизменения твердого тела заготовки.

Способы обработки, основанные на использовании механического воздействия на твердое тело, называют в настоящее время механической обработкой. Учитывая это, различают способы обработки резанием, давлением, поверхностным пластическим деформированием и т. д.

Электрические способы обработки основаны на использовании электрической энергии путем подвода ее в зону обработки без промежуточного превращения в другие виды энергии. Преобразование электрической энергии в другой вид, например, в тепловую, механическую, химическую, происходит непосредственно в обрабатываемом материале. При электромеханических способах применяют преимущественно тепловое действие электрического тока, электроэрозионных – эрозионное, электрохимических – химическое.

Незначительную практически не исследованную группу составляют способы, основанные на использовании энергии магнитного поля для непосредственного формообразования изделий из расплавленного металла. Классическим аналогом этого направления в области формообразующей обработки является литье по выплавляемым моделям и литье под давлением.

Перспективную группу составляют способы получения изделий (заготовок) посредством потоков энергии (послойный синтез).

В технике формообразующей обработки широко распространена тепловая энергия. Однако, как правило, она используется или для предварительного перевода вещества твердого тела в жидкое состояние, например, при различных литейных процессах, или для предварительного разогрева заготовок перед формообразующей обработкой, например, при горячей штамповке, обработке резанием с предварительным подогревом и т. п.

Лучевые способы используют воздействие сфокусированного луча с высокой плотностью энергии и в настоящее время применяются преимущественно для обработки, связанной с удалением части вещества заготовки. Его удаление происходит в результате испарения. Известны также лучевые способы обработки, основанные на прибавлении вещества к заготовке, например, плазменное напыление, лучевая наплавка. В зависимости от физической природы луча различают следующие виды лучевой обработки: плазменную, лазерную, ионную, электрическую.

В практике металлообработки развиваются способы, использующие химическую энергию, которая обычно применяется для удаления части вещества твердого тела. Процесс основан на размерном глубоком травлении, например, химическое фрезерование.

В связи с возрастанием использования в машиностроении труднообрабатываемых материалов наметилась тенденция все большего отхода от традиционных способов, основанных только на одном виде воздействия на твердое тело, к способам с комбинированным воздействием двух видов энергии и более. Этот закономерный процесс одновременно решает также ряд дополнительных проблем, например, повышения качества получаемых поверхностей, производительности и размерной стойкости инструмента, снижения допусков для последующей обработки и т. п. Комбинированные S-системы могут различаться по двум признакам: перечню составляющих физических и химических воздействий, обеспечивающих формоизменение заготовки; взаимосвязи различных видов физического и химического воздействия, обеспечивающих только количественное или же качественное изменение процесса формообразования. По последнему признаку комбинированные способы могут разделяться на два вида. Первый вид составляют способы с преимущественным влиянием одного из воздействий. Например, резание с подогревом зоны обработки (дополнительное тепловое воздействие), снижая механические характеристики материала удаляемого слоя, повышает эффективность основного механического воздействия, качественно не изменяя обычного процесса механической обработки.

Второй вид составляют способы, у которых нельзя разделить воздействия на основные и дополнительные. Примером S-системы такого вида может служить способ ультразвукового алмазно-электрического сверления, при котором процесс стружкообразования характеризуется специфическими закономерностями, не совпадающими с составляющими их обычными процессами резания. В этом случае воздействие двух физических процессов нельзя рассматривать как простую арифметическую сумму, так

как иногда совмещение нескольких физических воздействий может дать новые технические эффекты, обеспечивающие существенное повышение производительности обработки, стойкости инструмента и качества получаемых поверхностей. С точки зрения синергетики данное обстоятельство является синергетическим эффектом и существенным признаком для правовой охраны технической идеи, т. е. признания ее изобретением.

Технологические аспекты различных способов формообразующей обработки как традиционных, так и относительно новых подробно рассмотрены в технической литературе.

Процесс формообразующей обработки – сложный комплекс физико-химических явлений, протекающих в зоне обработки. Условия протекания процесса, сохраняя основную функцию S-системы (целенаправленное формоизменение заготовки), можно регулировать, управляя технологическими параметрами в пределах рациональной области использования конкретного способа обработки. Вместе с тем, как было показано выше, изменение хотя бы одного из элементов S-системы приводит к новому способу с новой структурой и функцией. Причем с позиций системного представления объем структурных изменений способа (прототипа) не имеет существенного значения. Это вытекает из того, что любые целенаправленные структурные преобразования приводят к новой S-системе. Естественно, уровень новизны появляющихся в результате таких преобразований новых способов будет определяться качественными характеристиками. Например, открытие в 1943 г. электроэрозионного явления способствовало созданию очередного пионерного способа формообразующей обработки. Дальнейшее его совершенствование привело к появлению важного научного и практического направления в области размерной металлообработки, насчитывающего в настоящее время значительное количество различных способов электроэрозионной и электроискровой обработки, по уровню новизны значительно отличающихся от исходного. Аналогичные примеры относятся и к другим областям размерной обработки. В этом состоит суть диалектики появления новых способов формообразующей обработки и непрерывного развития их многообразия.

Таким образом, можно утверждать, что вся совокупность известных и возможных новых способов формообразующей обработки как целенаправленных S-систем, связанных общей первообразной целью независимо от вида воспроизведения реальных поверхностей и вида используемой энергии, представляет собой большую развивающуюся систему или надсистему по отношению к составляющим ее S-системам.

3. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ РЕАЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

3.1. Понятие о характеристическом образе инструмента

Форма любой детали есть замкнутое пространство, ограниченное реальными геометрическими поверхностями, которые образованы в результате обработки тем или иным технологическим способом резанием, штамповкой, литьем, наплавкой и т. д. При этом, какой бы способ обработки ни был применен, реальные поверхности детали всегда отличаются от идеальных геометрических поверхностей, которыми мысленно оперируют при конструировании изделий. Реальные поверхности, полученные на технологическом оборудовании, в том числе на металлорежущих станках, отличаются от идеальных формой, размерами и шероховатостью. Теоретически процесс формообразования реальных поверхностей на технологическом оборудовании аналогичен процессу формирования идеальных поверхностей в проективной геометрии, т. е. базируется на идеальных геометрических представлениях. Таким образом, формообразование реальной поверхности в металлообработке любым технологическим способом представляет собой по существу процесс образования соответствующей геометрической поверхности, под которой (по Г. Монжу) обычно понимают след, оставляемый одной производящей линией, называемой образующей, при ее движении по другой производящей линии – направляющей. Производящие линии реальных поверхностей создаются при помощи вспомогательных элементов [7], материализованных на рабочей части инструмента. Вспомогательным элементом могут быть материальная точка, линия или некоторая поверхность (рис. 3.1).

При строгании плоскости вспомогательным элементом (рис. 3.1, а) является точка 1 – вершина резца. Обе воспроизводящие линии (образующая 2 и направляющая 3) в этом случае воспроизводятся соответственно движением $П_1$ резца и движением $П_2$ заготовки.

Вспомогательный элемент – линия по форме и протяженности может соответствовать форме и протяженности образуемой линии. Например, при точении фасонной поверхности (рис. 3.1, б) режущая кромка 1 резца является копией образующей 2 получаемой поверхности. В этом случае воспроизведение образующей происходит без движения формообразования. Необходимо только установочное движение $П_2$ для перемещения вспомогательного элемента в исходное положение. Направляющая 3 воспроизводится движением $В_1$ заготовки.

Вспомогательный элемент – линия по форме и протяженности может не соответствовать форме и протяженности образуемой линии. Например, при долблении зубчатой рейки (рис. 3.1, в) режущая кромка 1 долбяка представляет собой последовательно чередующиеся дуги окружностей, левой и правой эвольвент, а воспроизводимая во время обработки направляющая 2 зубчатой поверхности рейки – ломаную линию. Направляющая 2 в этом случае получается качением B_1 долбяка, согласованным с поступательным движением Π_2 заготовки. Образующая 3 воспроизводится движением Π_3 долбяка.

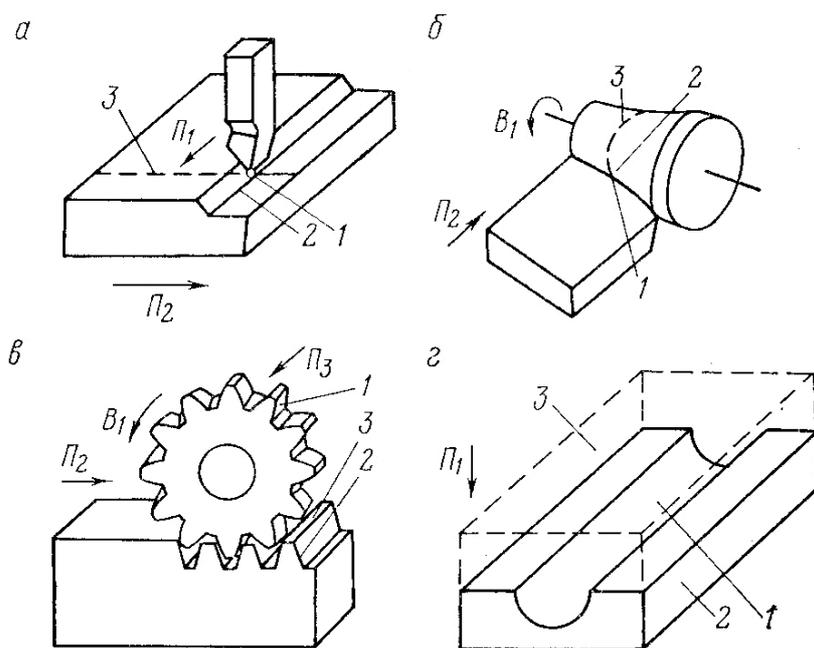


Рис. 3.1. Виды вспомогательных элементов, материализованные на рабочей части инструмента

Вспомогательный элемент – поверхность по форме и протяженности соответствует образуемой поверхности. Например, при штамповке рабочая поверхность 1 инструмента (матрицы 2 и пуансона 3) является копией воспроизводимой поверхности (рис. 3.1, г). В этом случае образование поверхности происходит без движений формообразования. Необходимо только установочное движение Π_1 для перемещения вспомогательного элемента в конечное положение.

Отметим, что в приведенной геометрической интерпретации образования реальной поверхности темп воспроизведения образующей выше темпа воспроизведения направляющей. Поэтому во всех последующих рассуждениях, когда речь будет идти о схемах образования поверхностей, первой будем указывать образующую, а затем направляющую получаемой поверхности.

Можно заметить, что различные инструменты, например токарный резец, имеют один вспомогательный элемент, другие, например фреза или многошариковая раскатка, – несколько расположенных последовательно вспомогательных элементов. Будем рассматривать вспомогательный элемент как множество материальных точек M_3 . Тогда в общем виде совокупность вспомогательных элементов любого инструмента – это вполне определенный класс P множеств M_3 :

$$P = \{M_3\}_i, \quad (i = 1, 2, 3, \dots, k). \quad (3.1)$$

Будем называть класс P характеристическим образом инструмента, так как именно этот класс определяет поведение производящих линий в процессе формообразования реальных поверхностей [8].

Характеристический образ резца содержит одно множество M_3 материальных точек, мощность которого у острозаточенного резца (рис. 3.1, *а*) равна единице (точка – вершина резца). При строгании широким резцом мощность множества M_3 больше единицы и равна мощности ширины получаемой строки. Мощность множества M_3 фасонного резца (рис. 3.1, *б*) равна мощности образующей обрабатываемой поверхности. Характеристический образ зуборезного долбяка (рис. 3.1, *в*) есть K -элементный класс равномогных множеств M_3 . Характеристический образ штампа для объемной штамповки (рис. 3.1, *г*) – декартово произведение:

$$P_{шт} = \{M_{3о} \times M_{3н}\},$$

где $M_{3о}$ и $M_{3н}$ – однопараметрические множества, мощность которых равна соответственно мощности образующей и направляющей получаемой поверхности.

Понятие о характеристическом образе определено применительно к инструменту, посредством которого осуществляют воздействие на твердое тело. Однако в формообразующей обработке значительную группу составляют способы, в которых воздействие на твердое тело осуществляют посредством объекта, мало напоминающем инструмент в традиционном его представлении. Например, при дробеструйной обработке поверхностным пластическим деформированием функцию инструмента выполняет струя дроби, а при лазерном сверлении отверстия – сфокусированный луч лазера с высокой плотностью энергии. Известны также способы формообразующей обработки, в которых вообще нет инструмента, а его функцию выполняет какой-либо физический эффект. Например, в способе получения поверхностей с износостойким слоем (рис. 2.2) функцию инструмента осуществляет поле центробежных сил. Можно показать, что понятие о характеристическом образе распространяется и на такие способы формообразующей обработки. Для этого рассмотрим некоторые примеры.

При дробеструйной обработке какой-то поверхности на твердое тело воздействует поток дроби, обходя эту поверхность строчка за строчкой. Строчка является образующей, а ее воспроизведение осуществляется прерывисто. Переход с одной строки на другую равносителен прерывистому воспроизведению направляющей. Следовательно, характеристический образ потока дроби можно представить в виде K -элементного класса множеств M_s , мощность каждого из которых равна единице.

При лазерном сверлении отверстия сверхмалого диаметра, например капиллярных, сфокусированный луч, прожигая твердое тело в течение какого-то времени, образует в нем заданное цилиндрическое отверстие. Окружность, ограничивающая сфокусированный луч, является характеристическим образом. Его отображение на обрабатываемой заготовке – одновременно воспроизведенная образующая. Перемещение образующей вдоль получаемой поверхности воспроизводит направляющую – прямую линию. Таким образом, характеристический образ лазерного луча есть множество M_s , мощность которого равна образующей получаемой поверхности.

При получении цилиндрических поверхностей с износостойким слоем поле центробежных сил, воздействуя на расплавленное вещество, напессовывает его по всей поверхности заготовки одновременно. Процесс в какой-то мере формально напоминает объемную штамповку. Причем цилиндрическое отверстие заготовки исполняет роль матрицы, а центробежные силы – пуансона. По получаемому эффекту поле центробежных сил зеркально отображается на образуемой поверхности. Следовательно, его можно рассматривать через понятие характеристического образа. Данное поле воспроизводит и образующую, и направляющую получаемой поверхности одновременно. Характеристический образ такого поля аналогичен характеристическому образу штампа для объемной штамповки.

В табл. 3.1 приведен ряд инструментов в традиционном понимании, а также ряд объектов, заменяющих инструмент, с указанием мощности их характеристических образов. В фигурных скобках дана мощность отдельного вспомогательного элемента, а индекс при скобках обозначает их количество. Для некоторых инструментов приведены не конкретные значения, а буквенные. Буква E обозначает, что мощность характеристического образа равна мощности воспроизводимой линии, M_s – мощность характеристического образа больше единицы, но меньше воспроизводимой линии, K – целое число, обозначающее количество вспомогательных элементов инструмента. Такая неопределенность объясняется тем, что есть инструменты, которые характеризуются большим разнообразием конструкций, например, зуборезные долбяки имеют различное число режущих зубьев, т. е. вспомогательных элементов. Однако это не имеет существенного значения при качественном анализе S-систем.

Приведенные примеры, взятые из разных областей формообразующей обработки позволяют утверждать, что понятие о характеристическом образе инструмента или объекта, заменяющего инструмент, является всеобщим, охватывающим все возможные способы обработки независимо от того, каким образом осуществляется воздействие на твердое тело. Принципиально наличие этого воздействия, необходимого для определения способа формообразующей обработки как S-системы.

Таблица 3.1

Мощность характеристического образа P некоторых инструментов

Название инструмента	Мощность характеристического образа P		Название инструмента	Мощность характеристического образа P
Острозаточенный резец	$\{1\}_1$		Червячная фреза	$\{M_3\}_K$
Широкий резец	$\{M_3\}_1$		Деформирующий шарик	$\{M_3\}_1$
Фасонный резец	$\{E\}_1$		Шариковая раскатка	$\{M_3\}_K$
Зубострогальный резец	$\{M_3\}_1$		Штамп для объемной штамповки	$\{E \times E\}_1$
Круглый вращающийся резец	$\{M_3\}_1$		Луч лазера – сверло	$\{E\}_1$
Сверло	$\{1\}_2$		Поле центробежных сил	$\{E \times E\}_1$
Развертка, зенкер	$\{1\}_1$		Поток дроби	$\{1\}_K$
Модульная фреза	$\{E\}_K$		Магнитное формирующее поле	$\{E \times E\}_1$
Зуборезный долбяк	$\{M_3\}_K$			

3.2. Геометрические классы воспроизведения поверхностей

Будем рассматривать образующую и направляющую как вполне определенные множества точек M_o и M_n . Тогда можно утверждать, что любая реальная поверхность в произвольный момент времени может быть представлена в виде произведения двух одномерных множеств, каждое из которых является однозначным отображением характеристического образа P инструмента в множества M_o и M_n при относительном перемещении характеристического образа по производящим линиям:

$$f: P \rightarrow M_o; \quad f: P \rightarrow M_n.$$

В качестве способа, посредством которого каждому $x \in P$ ставится в соответствие некоторый элемент из M_o и M_n , укажем операцию пересечения множеств M_o и M_n с характеристическим образом P .

Следовательно, чтобы рассмотреть конкретные виды образования реальных поверхностей во времени, достаточно проследить, как во времени образуются одномерные множества: образующая и направляющая линии.

Рассмотрим отображение характеристического образа P в множество M точек отрезка L плоской кривой, отсчитываемой от некоторой фиксированной точки O на этой кривой как однопараметрическое семейство точек, зависящих от времени t .

В выражении (3.1) $i = 1$. Тогда характеристический образ содержит единственное множество $M_j = \{x\}$.

Пусть характеристический образ P непрерывно скользит вдоль кривой L . Тогда единственному элементу $x \in M_j$ при его отображении в M будет непрерывно и однозначно соответствовать образ $f(x)$ во множестве M , фиксируясь на отрезке OL (рис. 3.2) как возрастающая во времени последовательность:

$$A_1 = \{f(x)_1, f(x)_2, \dots, f(x)_n\}. \quad (3.2)$$

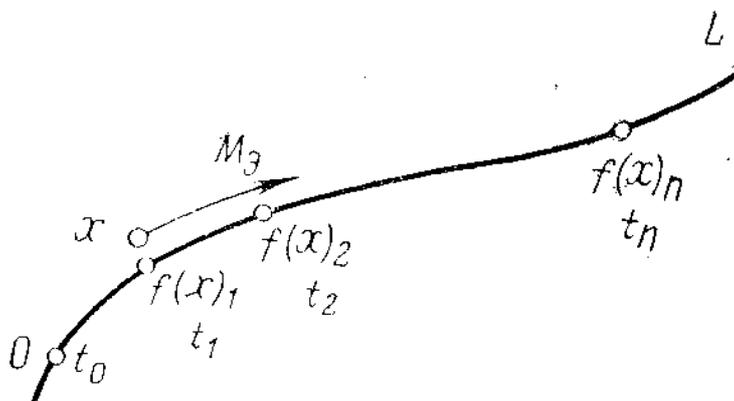


Рис. 3.2. Класс образования производящих линий вида H^c_{11}

Назовем такой вид образования производящей линии непрерывным при скольжении (H^c_{11}).

Пусть характеристический образ P совершает сложное движение, например, вращается вокруг некоторой точки O_1 , перемещающейся вдоль кривой L (рис. 3.3). Тогда элемент $x \in M_j$ будет отображаться в множество M через некоторые промежутки времени, определяемые круговой частотой вращения характеристического образа P относительно точки O_1 . На отрезке OL будет фиксироваться возрастающая во времени последовательность:

$$A_2 = \{f(x)_1, f(x)_2, \dots, f(x)_n\}. \quad (3.3)$$

Назовем такой вид образования производящей линии прерывистым (Π_{11}):

$$M_j = \{x\}_j, \quad (j = 2, 3, \dots, n).$$

Пусть характеристический образ P обкатывается по кривой L (рис. 3.4.). Тогда произвольному элементу $x \in M_3$, при отображении в M будет однозначно соответствовать образ $f(x)_j$ в множестве M . На отрезке OL образы будут фиксироваться в виде возрастающей во времени последовательности:

$$A_3 = \{f(x)_2, f(x)_3, \dots, f(x)_n\}. \quad (3.4)$$

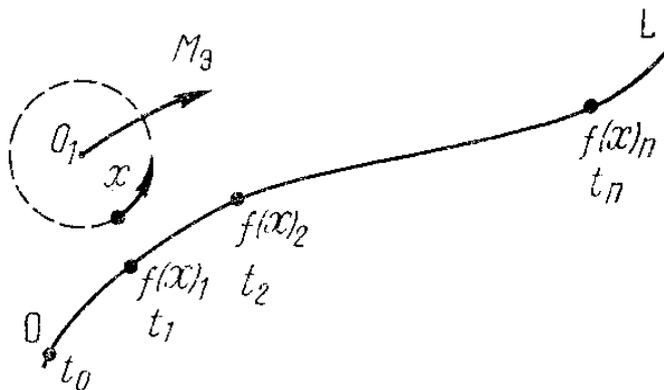


Рис. 3.3. Класс образования производящей линии вида Π_{11}

Назовем такой вид образования производящей линии непрерывным при качении (H^k_{1j}).

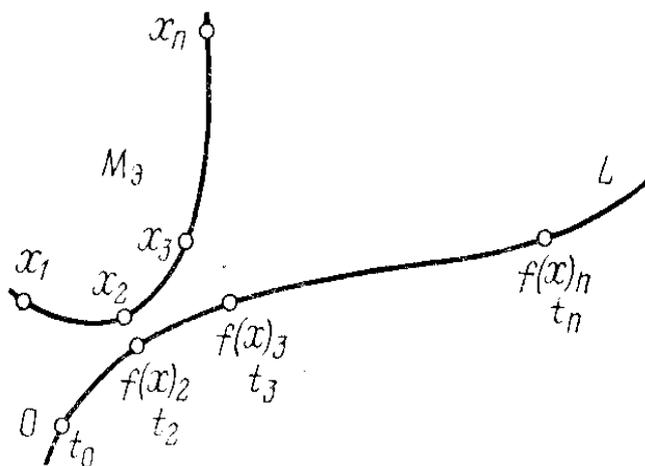


Рис. 3.4. Класс образования производящей линии вида H^k_{1j}

При отображении характеристического образа P одновременно каждому $x_j \in M_3$, ставится в соответствие $f(x)_j \in M_3$. Следовательно, на отрезке OL (рис. 3.5) одновременно фиксируется множество:

$$A_4 = \{f(x)\}_j, \quad (j = 2, 3, \dots, n). \quad (3.5)$$

Таким образом, получим схему единовременного (E) образования производящей линии. Характерная особенность данной схемы – это зеркальное отображение характеристического образа на множестве M . Рассматривая линию как поверхность, у которой ширина бесконечно мала, можно воспользоваться также термином «покрытие», используемом в теории множеств.

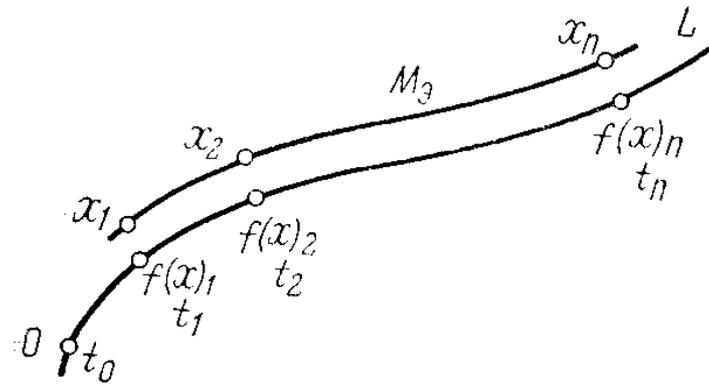


Рис. 3.5. Класс образования производящей линии вида E

В выражении (3.1) $i = 2, 3, \dots, k$. Тогда характеристический образ P представляет собой последовательность равномоощных множеств M_{3i} :

$$M_{3i} = \{X\}.$$

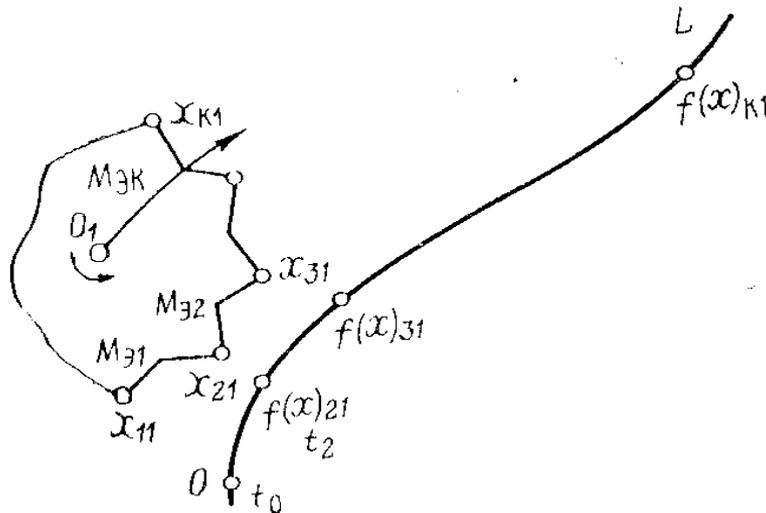


Рис. 3.6. Класс образования производящей линии вида Π_1

Пусть характеристический образ P совершает сложное движение – вращается вокруг мгновенного центра O_1 , перемещающегося вдоль кривой L так, что каждому элементу $x \in M_{3i}$ будет однозначно соответствовать образ

$f(x)_i \in M$. На отрезке OL (рис. 3.6) через промежутки времени, определяемые частотой вращения P относительно O_1 , будет фиксироваться возрастающая во времени последовательность семейства одноэлементных образов:

$$A_5 = \{f(x)\}_i, \quad (i = 2, 3, \dots, \kappa). \quad (3.6)$$

Назовем такой вид образования производящей линии прерывистым (Π_{i1}).

Пусть характеристический образ P обкатывается по кривой L так, что каждому $x_j \in M$, при отображении в M взаимно однозначно соответствует образ $f(x)_{ij}$. Тогда на отрезке OL (рис. 3.7) будет фиксироваться непрерывно возрастающая во времени последовательность:

$$A_6 = \{ \{f(x)_{22}, f(x)_{23}, \dots, f(x)_{2n}\} \{f(x)_{32}, f(x)_{33}, \dots, f(x)_{3n}\} \dots \{f(x)_{\kappa 2}, f(x)_{\kappa 3}, \dots, f(x)_{\kappa n}\} \}. \quad (3.7)$$

Назовем такой вид образования производящей линии непрерывным при качении (H^{κ}_{ij}).

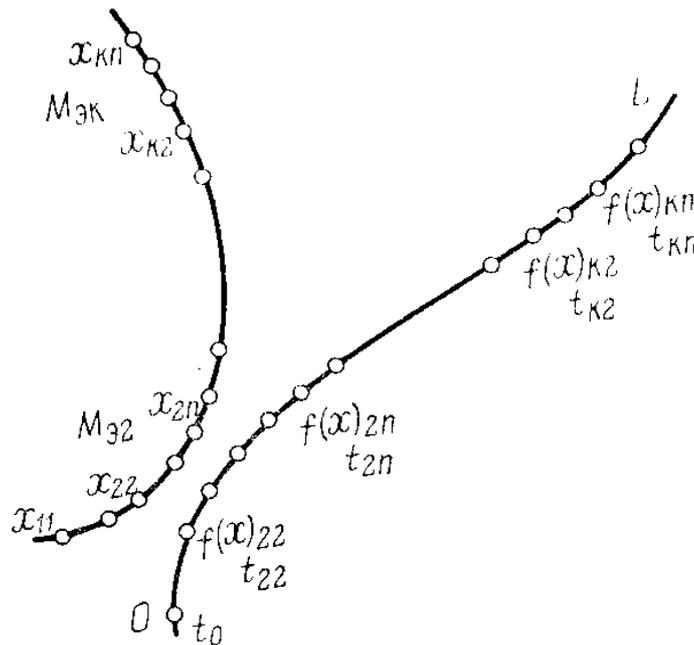


Рис. 3.7. Класс образования производящей линии вида H^{κ}_{ij}

Сравнивая схемы образования производящих линий H^{κ}_{1j} и H^{κ}_{ij} , отметим, что они имеют сходную физическую сущность, а индексы при H отражают структурную особенность характеристического образа P . Первый индекс обозначает количество вспомогательных элементов, а второй – мощность, т. е. протяженность вспомогательного элемента. Следовательно, схемы H^{κ}_{1j} и H^{κ}_{ij} можно считать частными случаями класса H^{κ} . То же можно отметить и для схем Π_{11} и Π_{i1} , объединяя их в класс Π .

При сравнении схем H_{11}^c и H_{ij}^k видно, что они имеют принципиально различную физическую природу, так как верхний индекс отражает функциональную особенность характеристического образа. Его особенность состоит в том, что в сравниваемых схемах движение характеристического образа принципиально различно. По первой схеме характеристический образ скользит вдоль воспроизводимой линии, а по второй – катится без скольжения.

Будем считать, исходя из условий образования реальных поверхностей, множества (3.2) – (3.7) равномошными, если они рассматриваются на отрезках OL одинаковой протяженности. Тогда в порядке возрастания теоретической производительности классы образования производящих линий располагаются следующим образом: Π, H^c, H^k, E .

Сочетая каждый из четырех классов возникновения образующей с каждым из тех же классов возникновения направляющей, получаем 16 теоретически возможных классов образования поверхностей в пространстве и времени. В порядке возрастания производительности они располагаются так: $\Pi - \Pi, \Pi - H^c, \Pi - H^k, \Pi - E, H^c - \Pi, H^c - H^c, H^c - H^k, H^c - E, H^k - \Pi, H^k - H^c, H^k - H^k, H^k - E, E - \Pi, E - H^c, E - H^k, E - E$.

3.3. Осуществимость геометрических классов при образовании реальных поверхностей

Из рассмотренных в предыдущем параграфе классов образования поверхностей три из них практически неосуществимы. Действительно, в классах $\Pi - E, H^c - E, H^k - E$ направляющая производящая линия должна создаваться одновременно, т. е. зеркальным отображением характеристического образа. Однако полученная таким образом производящая линия обычно исполняет роль образующей, так как имеет наиболее высокий темп воспроизведения. Направляющая производящая линия может быть создана зеркальным отображением характеристического образа в том случае, когда образующая производящая линия создается также зеркальным отображением, т. е. данный случай соответствует классу $E - E$ двойного зеркального отображения (покрытия) характеристического образа. Следовательно, в практике формообразующей обработки осуществимы лишь 13 из 16 теоретически возможных геометрических класса образования поверхностей.

На рис. 3.8 приведены примеры, иллюстрирующие осуществимые классы геометрического образования реальных поверхностей. На рис. 3.8, *a - в* показаны классы образования поверхностей, когда образующая геометрическая линия воспроизводится прерывисто (Π).

Так при планетарном фрезоточении цилиндрической поверхности образующая окружность этой поверхности (рис. 3.8, а) воспроизводится двумя движениями: вращением B_1 заготовки вокруг собственной оси ее вращением B_2 вокруг оси, параллельной оси заготовки. Направляющая – прямая линия, параллельная оси заготовки, так же воспроизводится прерывисто: вращением B_3 резца и его перемещением Π_4 . Класс образования поверхности ($\Pi - \Pi$).

		Классы воспроизведения образующей			
		Π	H^C	H^K	E
Классы воспроизведения направляющей	Π	а	д	и	н
	H^C	б	е	к	о
	H^K	в	ж	л	п
	E	з <i>Неосуществим</i>	з <i>Неосуществим</i>	м <i>Неосуществим</i>	р

Рис. 3.8. Классы геометрического образования поверхностей

При планетарном точении цилиндрической поверхности (рис. 3.8, б) образующая, как и в предыдущем примере, воспроизводится двумя вращениями B_1 и B_2 , а направляющая – скольжением $П_3$ резца вдоль оси заготовки. Класс образования поверхности ($П - H^c$).

При шлифовании дисковым однониточным кругом с прямолинейным профилем цилиндрического прямозубого колеса (рис. 3.8, в) образующая (прямая линия) воспроизводится вращением B_1 шлифовального круга и его поступательным перемещением $П_2$ вдоль образующей, а направляющая (эвольвента) – непрерывно при качении двумя согласованными движениями: вращением B_3 заготовки и ее поступательным перемещением $П_4$. Класс образования поверхности ($П - H^k$).

На рис. 3.8, д – ж показаны классы образования поверхностей, когда образующая геометрическая линия воспроизводится непрерывно при скольжении (H^c).

Так при строгании плоскости (рис. 3.8, д) образующая – прямая линия – воспроизводится поступательным перемещением $П_1$ резца, а направляющая – также прямая линия – периодическим перемещением $П_2$ заготовки. Класс образования поверхности ($H^c - П$).

При точении цилиндрической поверхности детали (рис. 3.8, е) образующая – окружность – воспроизводится вращением B_1 заготовки, а направляющая – прямая линия, параллельная оси заготовки, – непрерывно скольжением $П_2$ резца вдоль оси заготовки. Класс образования поверхности ($H^c - H^c$).

При точении цилиндрической поверхности детали чашечным вращающимся резцом (рис. 3.8, ж) образующая, как и в предыдущем примере, воспроизводится вращением B_1 заготовки, а направляющая – качением чашечного резца вдоль заготовки, осуществляемым его вращением B_2 и поступательным перемещением $П_3$. Класс образования поверхности ($H^c - H^k$).

На рис. 3.8, и – л приведены примеры классов образования поверхностей, когда образующая геометрическая линия воспроизводится непрерывно при качении (H^k).

Так при нарезании цилиндрического прямозубого колеса червячной фрезой (рис. 3.8, и) образующая – линия, состоящая из упорядоченно расположенных дуг эвольвенты и окружности, – воспроизводится качением (обкатом) из двух согласованных движений: вращения B_1 фрезы и вращения B_2 заготовки, а направляющая – прямая линия, параллельная оси заготовки, – вращением B_1 фрезы и ее поступательным перемещением $П_3$. Класс образования поверхности ($H^k - П$).

При зуботочении цилиндрического зубчатого колеса (рис. 3.8, *к*) инструментом типа зуборезного долбяка образующая – линия, состоящая из упорядоченно расположенных дуг эвольвенты и окружности, – воспроизводится, как в предыдущем примере, согласованными движениями: вращением B_1 инструмента и вращением B_2 заготовки, а направляющая – прямая линия – скольжением Π_3 инструмента вдоль оси заготовки. Класс образования поверхности ($H^k - H^c$).

При обкатывании фасонной детали шариком (рис. 3.8, *л*) образующая – окружность – воспроизводится качением шарика по этой окружности движением B_1 заготовки и B_2 шарика, а направляющая – кривая линия – качением шарика движениями B_3 вращения шарика и Π_4 его перемещения вдоль кривой, эквидистантной к направляющей. Класс образования поверхности ($H^k - H^k$).

Последняя группа примеров (рис. 3.8, *н – р*) иллюстрирует классы образования поверхностей, когда образующая геометрическая линия воспроизводится одновременно (E) как зеркальное отображение характеристического образа. Этой группе образования поверхностей воспроизведение образующей движений не требует.

При фрезеровании плоскости цилиндрической фрезой (рис. 3.8, *н*) направляющая – прямая линия – воспроизводится прерывисто вращением B_1 фрезы и поступательным перемещением Π_2 заготовки. Класс образования поверхности ($E - \Pi$).

При точении фасонным резцом (рис. 3.8, *о*) направляющая – окружность – воспроизводится непрерывно при скольжении вращением B_1 заготовки. Класс образования поверхности ($E - H^c$).

При обкатывании полноконтактным роликом фасонной поверхности (рис. 3.8, *н*) направляющая – окружность – воспроизводится непрерывно при качении вращением B_1 заготовки и вращением B_2 ролика. Класс образования поверхности ($E - H^k$).

При объемной штамповке (рис. 3.8, *р*) направляющая, так же как и образующая, воспроизводится одновременно (E) как зеркальное отображение характеристического образа. Следовательно, для образования поверхности движений не требуется. Класс образования поверхности ($E - E$). Отметим, что движение закрывания штампа не является формообразующим, оно только подготавливает формообразование. В станковедении такое движение называют движением врезания. В других отраслях знания это движение не имеет определенного названия.

3.4. Комбинированные подклассы образования реальных поверхностей

Полученные геометрические классы образования производящих линий различаются количеством движений, производительностью, протяженностью контакта характеристического образа и заготовки, существенно влияющими на качественные и энергетические параметры технологических процессов. Указанными параметрами можно управлять, комбинируя классы Π , H^c , H^k , E между собой.

Пусть при отображении характеристического образа P одновременно всем $M_j \subset P$ соответствует в множестве M взаимно однозначно и непрерывно семейство образов:

$$A = \{f(M)_1, f(M)_2, \dots, f(M)_k\}. \quad (3.8)$$

Рассмотрим возможные варианты.

Образ $f(M)_i$ семейства (3.8) возникает во времени непрерывно как возрастающая последовательность составляющих его $f(x)_{ij}$. В этом случае получим одновременно непрерывный $E^{\wedge}H$ подкласс образования производящей линии. Здесь и далее символ « \wedge » обозначает комбинированный подкласс воспроизведения производящей линии.

Образ $f(M)_i$ семейства (3.8) возникает прерывисто во времени как последовательность составляющих его $f(x)_{ij}$. В этом случае подкласс образования производящей линии будет одновременно прерывистым $E^{\wedge}\Pi$.

Подклассы $E^{\wedge}H$ и $E^{\wedge}\Pi$ получены из исходного класса E посредством разбиения характеристического образа P на непересекающиеся множества M_j , каждое из которых отображается в множество M непрерывно (H) или прерывисто (Π).

Приведенное комбинирование классов в реальных процессах формообразующей обработки позволяет управлять мгновенной протяженностью линии контакта инструмента и заготовки, что существенно улучшает течение технологического процесса. Назовем такое комбинирование управляющим (K_y).

При K_y необходимое количество движений для возникновения производящей линии увеличивается до суммы движений комбинируемых классов.

Возможно обратное комбинирование от классов H и Π к классу E . Пусть в классах H и Π мгновенное значение $M_j \cap M$ состоит из конечного значения точек, т. е. является линейчатым. Тогда производящая линия будет возникать во времени в виде последовательного фиксирования объединения: $A_j = \bigcup_{2 \leq x \leq n} f(x)$.

Таким образом, получим два других комбинированных подкласса: непрерывно единовременный H^E и прерывисто единовременный $П^E$. Эти подклассы характеризуются более высокой производительностью, чем исходные классы H и $П$. Назовем полученное комбинирование повышающим (K_n). При K_n количество движений при возникновении производящей линии сохраняется равным количеству движений исходного класса.

Сочетая комбинированные подклассы возникновения производящих линий между собой и с основными геометрическими классами, получим все многообразие теоретически возможных подкласса образования поверхностей при формообразующей обработке.

При точении широким резцом цилиндрической поверхности (рис. 3.9) характеристический образ 1 инструмента состоит из одного множества материальных точек M , мощность которого соответствует части направляющей 2 получаемой поверхности. Образующая 3 – окружность получаемой цилиндрической поверхности – воспроизводится непрерывно вращением B_1 заготовки, а направляющая 2 – непрерывно единовременно поступательным движением $П_2$ характеристического образа вдоль направляющей. Подкласс воспроизведения поверхности ($H^c - H^c \wedge E$). Приведенная схема получена из исходного класса ($H^c - H^c$) посредством изменения характеристического образа без изменения конструкции инструмента. Причем количество формообразующих движений осталось прежним. Однако темп воспроизведения направляющей может быть существенно выше.

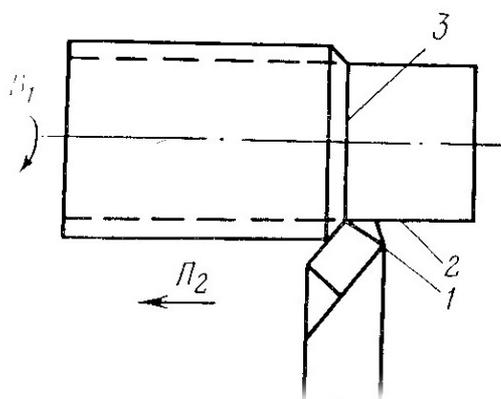


Рис. 3.9. Комбинированный подкласс $H^c - H^c \wedge E$ образования поверхности посредством K_n

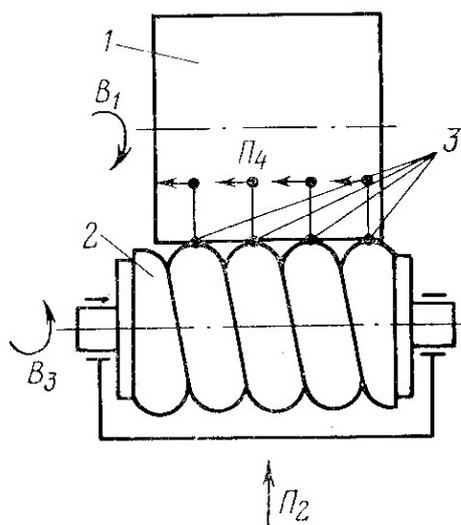


Рис. 3.10. Комбинированный подкласс $E \wedge H^c - H^c$ образования поверхности посредством K_y

На рис. 3.10 показана схема способа обработки поверхностным пластическим деформированием цилиндрической поверхности, согласно которому инструмент выполнен в форме пружины. Характеристический образ инструмента представляет собой множество, мощность которого значительно выше мощности направляющей образуемой поверхности – прямой линии, параллельной оси заготовки и равной длине этой поверхности. Причем инструмент сделан таким образом, что его характеристический образ пересекается с воспроизводящими линиями одновременно в нескольких точках, равно расположенных вдоль направляющей.

При обработке заготовки I сообщают движение B_1 , а инструмент 2 подводят установочным движением Π_2 к ней. Вследствие силового контакта между заготовкой и инструментом он получает вращательное движение B_3 обкатки, а характеристический образ отдельными последовательными участками непрерывно в перемещающихся точках контакта 3 пересекается с воспроизводящими линиями. Таким образом, при рассматриваемом способе обработки образующая воспроизводится одновременно по всей длине, но каждый ее отдельный участок между равнорасположенными точками 3 воспроизводится непрерывно при скольжении, т. е. подкласс образования образующей есть $E^{\wedge}H^k$. Направляющая – окружность – воспроизводится непрерывно при качении (H^k). Следовательно, класс образования поверхности ($E^{\wedge}H^c - H^k$).

Исходный единовременный класс воспроизведения образующей не требует движения формообразования для получения этой линии. Управляющее комбинирование данного класса и получение единовременно непрерывного подкласса снижают усилие механического воздействия при достижении того же эффекта, но одновременно требуют введения дополнительного формообразующего движения Π_4 . В рассматриваемом случае такое движение получено за счет взаимодействия заготовки и инструмента.

3.5. Влияние характеристического образа инструмента на формирование поверхности

Анализ технической литературы показывает, что наиболее изучено влияние инструмента, точнее его характеристического образа, на формирование поверхности при обработке резанием. Профиль получаемой поверхности при этом виде обработки имеет регулярно повторяющиеся выступы и впадины, с той или иной точностью копирующие форму режущей кромки инструмента. Высота и форма обработанной поверхности зависят от многих факторов.

Микрогеометрия поверхности может рассматриваться в двух сечениях. Одно принимается в направлении воспроизведения образующей, т. е. в направлении скорости резания. Другое – в направлении воспроизведения направляющей, т. е. в направлении подачи. В большинстве случаев микронеровности в направлении подачи больше. Поэтому по ним и характеризуется микрогеометрия получаемой поверхности. Зависимость высоты микронеровностей для различных схем их образования при вспомогательном элементе в виде точки (вершина резца или зуба торцевой фрезы), исходя только из геометрических соображений, может быть выражена уравнениями, приведенными в табл. 3.2 [9].

В ряде случаев фактическая высота микронеровностей существенно отличается от расчетной. Это связано с приращением высоты неровностей в результате пластического течения металла в направлении вершины остаточного гребешка, с приращением, вызванным упругим восстановлением поверхностного слоя, и с приращением, вызванным трением задней поверхности инструмента о поверхность среза. Поэтому приведенные в табл. 3.2 уравнения можно использовать для приближенных расчетов, например, при сравнительном анализе различных способов обработки.

При выполнении вспомогательного элемента в виде линии по форме и протяженности, совпадающей с формой и протяженностью воспроизводимой линии и мощности характеристического образа инструмента $\{E\}_1$ или $\{M_s\}_1$ теоретически высота микронеровностей обработанной поверхности копируется в виде зеркального отображения высоты микронеровностей вспомогательного элемента. Наблюдающееся на практике приращение высоты микронеровностей связано с теми же факторами, что и в предыдущем примере, а также с жесткостью системы обрабатываемой системы (станок – приспособление – инструмент – деталь). В случае мощности характеристического образа $\{E\}_k$ или $\{M_s\}_k$ расчетная высота остаточных микронеровностей может быть рассчитана по уравнению:

$$R_z = \frac{S_z^2 \pi^2 R}{2(ZS_z \pm 2\pi R)^2}, \quad (3.9)$$

где R и Z – соответственно радиус и число вспомогательных элементов (зубьев инструмента);

S_z – подача на зуб;

знак «+» – соответствует встречному, знак «-» – попутному перемещению вспомогательного элемента.

Уравнения для расчета высоты остаточных микронеровностей

φ_1	$\varphi < \arcsin S/2R$	$\varphi > \arcsin S/2R$
$< \arcsin S/2R$	$R_z = \frac{\sin \varphi \sin \varphi_1}{\sin (\varphi + \varphi_1)} \left[S - R \left(\operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} + \operatorname{tg} \frac{\varphi_1}{2} \right) \right]$	$R_z = R (1 - \cos \varphi_1) + S \sin \varphi_1 \cos \varphi_1 - \sin \varphi \times \sqrt{S \sin \varphi_1 (2R - S \sin \varphi_1)}$
$> \arcsin S/2R$	$R_z = R (1 - \cos \varphi) + S \sin \varphi \cos \varphi - \sin \varphi \times \sqrt{S \sin \varphi (2R - S \sin \varphi)}$	$R_z = R - \frac{\sqrt{4R^2 - S^2}}{2}$

При некотором снижении точности расчета уравнение (3.9) можно упростить, исключив из знаменателя величину ZS_z , которая мала по сравнению с величиной $2\pi R$. Тогда:

$$R_z = S_z^2 / 8R. \quad (3.10)$$

Для обкатных зубообрабатывающих инструментов, у которых вспомогательные элементы выполнены в виде отрезков эвольвенты, несовпадающей по форме и протяженности с воспроизводимой линией, высота микрогребешков приблизительно может быть определена по уравнению [5]:

$$R_z = \frac{(Z_1 + Z_2) \sin \alpha S_k^2 \sqrt{(Z_1 + 2)^2 \cos^2 \alpha}}{4mZ_1^2 (Z_1 + Z_2) \sin \alpha - \sqrt{(Z_1 + 2)^2 - Z_1^2 \cos^2 \alpha}}, \quad (3.11)$$

где Z_1 и Z_2 – число зубьев соответственно нарезаемого колеса и долбяка;
 m – модуль;
 α – угол профиля исходного контура.

При использовании обкатных инструментов с телами качения (роликками и шариками), у которых вспомогательный элемент также не совпадает с образуемой поверхностью, высота микронеровностей находится или по уравнениям, приведенным в табл. 3.2, или по уравнению (3.10).

Геометрический образ инструмента вида $\{E \times E\}$, исходя из геометрических соображений, зеркально отображает микрогеометрию вспомогательного элемента на воспроизводимую поверхность. Однако реально получаемая микрогеометрия существенно отличается от микрогеометрии характеристического образа. Это объясняется особенностями того или иного вида обработки, конструктивным исполнением вспомогательного элемента, видом используемой энергии и динамической характеристикой технологической машины. Для некоторых относительно новых видов инструментов, например, луча лазера или иного потока энергии и т. п., понятие микрогеометрии вспомогательного элемента, по-видимому, не имеет смысла в традиционном представлении. Поэтому для таких инструментов нужны иные критерии при оценке их влияния на микрогеометрию получаемой поверхности.

4. МЕТОДИКА СИСТЕМНОГО ОПИСАНИЯ СПОСОБОВ ФОРМООБРАЗУЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ

4.1. Постановка задачи

В основе любой теоретической концепции лежит модель изучаемой действительности, наделенная структурой, некоторым числом свойств и функцией. Главная функция модели – быть представлением исследуемого объекта и средством получения о нем теоретической информации. Следовательно, описать способ формообразующей обработки, т. е. S-систему, значит построить ее модель, отображающую структуру, определенную группу свойств и функцию этой системы. Будем называть такое описание системным.

Системное описание должно давать представление о строении S-систем. Уровень детализации, т. е. выбор структурных элементов, внутри которых описание не проникает, определяется назначением описания. Системное описание S-систем должно быть иерархично. Первый уровень описания S-систем, как было показано выше, характеризуется их разбиением на четыре взаимосвязанные общей первообразной целевой функцией подсистемы: кинематическую, базирующую, энергетическую и стабилизации силового параметра. Дальнейшая конкретизация структуры должна даваться на стольких уровнях, сколько их требуется для полного представления об основных свойствах системы. Естественно, последним уровнем описания будет тот, после которого в пределах единого подхода к различным способам формообразующей обработки дальнейшее разбиение невозможно.

Существенным признаком структуры является назначение (свойство) элементов. Преобразование вещества твердого тела в S-системах может быть механическим, физическим, химическим или смешанным, объединяющим первые три в различных сочетаниях. Этот процесс требует энергии определенного вида, а ее передача невозможна без информации. Отсюда энергетические, информационные или вещественные свойства элементов S-системы.

Структурные свойства зависят от характера связей. Выделим энергетические, информационные и вещественные связи, определив их в том же смысле, что и соответствующие им свойства. Энергетические связи предназначены для переноса энергии, а информационные – информации. Вещественные связи переносят вещество твердого тела, но одновременно энергию и информацию, так что характер связи определяется удельным весом соответствующего компонента.

Связь между элементами S-системы зависит от природы воздействия на твердое тело. Для подтверждения этого рассмотрим три способа формообразующей обработки, основанные соответственно на удалении части материала заготовки, прибавлении части материала к заготовке и на перераспределении части материала заготовки.

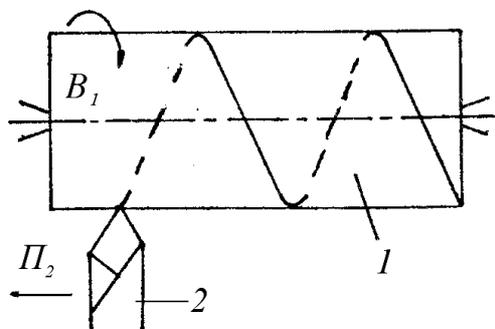


Рис. 4.1. Способ нарезания резьбы фасонным резцом

Классический способ нарезания резьбы резцом (рис. 4.1) характеризуется тем, что заготовке 1, определенным образом ориентированной в пространстве, сообщают вращательное движение B_1 , согласованное с поступательным движением Π_2 резца 2, профиль которого соответствует профилю нарезаемой резьбы. Таким образом, резьбовая поверхность воспроизводится одним сложным исполни-

тельным движением $B_1\Pi_2$, состоящим из двух согласованных между собой элементарных движений: вращательного B_1 и поступательного Π_2 .

Приведенный способ нарезания резьбы есть S-система. На первом уровне описания, в соответствии с изложенным в гл. 2, будем рассматривать ее как объединение трех подсистем: кинематической, базирующей и энергетической, каждая из которых наделена конкретной функцией. Функция кинематической подсистемы – обеспечение таких условий механического воздействия, при которых резец удаляет вещество твердого тела по винтовой линии; функция базирующей подсистемы – обеспечение определенности и повторяемости механического воздействия по винтовой линии; функция энергетической подсистемы – механическое воздействие на твердое тело (заготовку) посредством резца. Заметим, что функция каждой из подсистем одновременно определяет ее назначение (свойство). При функционировании анализируемой S-системы энергия механического воздействия подводится через кинематическую подсистему, а количество вещества, удаляемого в единицу времени, определяет потребление энергии во времени. Кинематическая подсистема несет также информацию о траектории исполнительного движения, т. е. осуществляет обмен информацией между взаимодействующими объектами. Эта информация определяет форму направляющей получаемой винтовой поверхности.

Таким образом, можно утверждать, что энергетическая и кинематическая подсистемы пересекаются. Причем пересечение понимается в том, смысле, в каком оно определено в теории множеств. Связь между подсистемами

темами носит преимущественно вещественно-энергетический характер. Отметим, что кинематический обмен информацией между объектами кинематической подсистемы, т. е. на уровне разбиения кинематической подсистемы, требует некоторой энергии, которая является энергией функционирования данной подсистемы и, следовательно, для воздействия на твердое тело не используется. В станковедении такая энергия называется энергией холостого хода. Количественно она зависит только от длины кинематических цепей, т. е. от количества кинематических передач между исполнительными органами технологической машины.

Рассмотренный в разделе 2 способ получения внутренних цилиндрических поверхностей с износостойким поверхностным слоем (рис. 2.2) основан на добавлении вещества к заготовке. В такой S-системе на добавляемое вещество воздействуют последовательно-параллельно энергией токов высокой частоты, расплавляющей вещество, и механической энергией, припекающей его к заготовке. Каждое из воздействий осуществляется отдельной подсистемой, входящей в энергетическую подсистему S-системы. Механическая составляющая энергетической подсистемы, как и в предыдущем примере, пересекается с кинематической подсистемой. Связь между ними носит также вещественно-энергетический характер. Связь между составляющими энергетической подсистемы на начальном этапе воздействия носит информационный характер (подвод механического воздействия только после разогрева вещества в течение определенного времени токами высокой частоты), а затем – неопределенный нейтральный характер. Таков же характер связи между составляющей токов высокой частоты и кинематической подсистемой.

С целью повышения качественных характеристик результата функционирования рассматриваемой S-системы нейтральная связь между составляющими может быть целенаправленно изменена. Например, обеспечив слежение за расплавлением прибавляемого вещества и его температурой в течение цикла обработки, можно соответствующим образом управлять механической составляющей. Вероятно, в этом состоит сущность одного из путей поиска новых S-систем, качественно отличающихся от своих прототипов.

Приведенные примеры являются типичными представителями S-систем, основанных на удалении или прибавлении вещества к заготовке. Поэтому характер связи между их составляющими, очевидно, будет таким же и для других S-систем, входящих в эти две группы способов формообразующей обработки.

Рассмотрим пример S-системы, основанной на формоизменении вещества твердого тела. Обкатку сферической поверхности заготовки 1 осуществляют механическим воздействием (рис. 4.2) посредством плашек 2 и 3, профиль которых соответствует образующей обрабатываемой поверхно-

сти. Причем плашка 3 неподвижна, а плашка 2 получает движение Π_1 . Фрикционный контакт между сферой и плашками обеспечивает вращение заготовки и ее обработку. В данной S-системе связь между энергетической и кинематической подсистемами носит преимущественно энергетический характер. Особенностью рассматриваемого способа является то, что заготовка входит в кинематическую подсистему в качестве ее конечного элемента, а определенность базирования обеспечивается характеристическим образом инструмента – обкатными плашками. Отсюда информационный характер связи между кинематической и базирующей подсистемами. Последний вид связи характерен для S-систем, в которых функция базирования перенесена на инструмент.

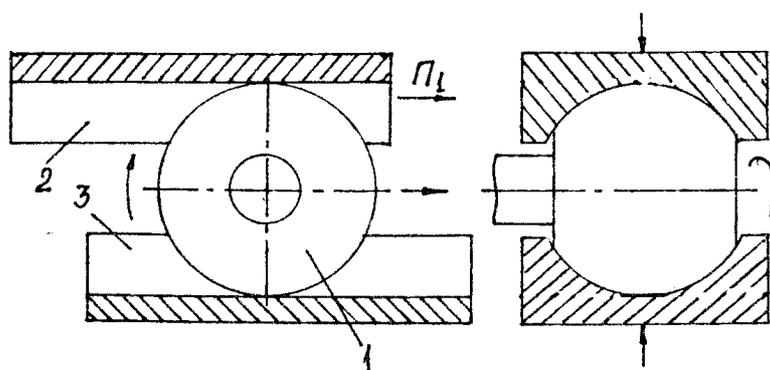


Рис. 4.2. Способ полноконтактной обкатки сферической поверхности

Рассмотренные связи предназначены для переноса или изменения состояния вещества твердого тела, энергии и информации в соответствии с последовательностью выполняемых функций. Они определяют количественную сторону функционирования S-систем. Будем называть такие связи прямыми. Возможны и обратные связи, которые предполагают некоторое преобразование параметра, поступающего по прямой связи, и передачу результата обратно, т. е. в направлении, противоположном функциональной последовательности к одному из предыдущих элементов системы. Обратные связи характерны для самоподнастраивающихся S-систем. Эти связи носят преимущественно информационный характер и имеют функцию управления качеством формообразования.

Особую группу составляют S-системы, обеспечивающие стабилизацию силового воздействия на обрабатываемую заготовку. Такие S-системы образуют, дополняя традиционные способы формообразующей обработки подсистемой стабилизации силового воздействия. Соответствующий пример преобразования традиционного способа токарной обработки (рис. 2.5)

в способ со стабилизацией силы резания рассмотрен в разделе 2. Функция подсистемы стабилизации силы резания преобразование силового воздействия в информацию, сообщаемую в кинематическую подсистему. Отсюда информационный характер связи подсистемы стабилизации силового параметра с кинематической подсистемой.

Способы формообразующей обработки (S-системы) как объекты техники имеют жесткую организацию. Качественная определенность их обусловлена структурой и функцией.

Таким образом, на основании изложенного можно утверждать, что системное описание любой S-системы есть множество:

$$S_s = \{\{Q_i\}, \{V_i\}, \{F_i\}\},$$

где S_s – системное описание S-системы (способа формообразующей обработки);

$\{Q_i\}$ – конечное множество элементов и их свойств;

$\{V_i\}$ и $\{F_i\}$ – соответственно конечное множество связей и функций.

Системное описание строится по многоуровневому принципу путем последовательной декомпозиции подсистем. В общем случае системное описание любой S-системы не содержащей подсистемы стабилизации силового параметра на первом уровне представляет собой объединение трех подсистем:

$${}_1S_s = {}^kM \cup {}^bM \cup {}^aM,$$

где kM , bM , aM – соответственно кинематическая, базирующая и энергетическая подсистемы.

Системное описание S-системы содержащей подсистему стабилизации силового параметра это объединение четырех подсистем:

$${}_1S_s = {}^kM \cup {}^bM \cup {}^aM \cup {}^cM,$$

где cM – подсистема стабилизации силового параметра.

Ниже будут изложены основные принципы системного описания кинематической, базирующей, энергетической и стабилизирующей силовой параметр подсистем. В методическом плане эти принципы могут быть изложены как на вербальном языке, так и посредством абстрактных математических кодов. Однако важно отметить, что переход с обычного вербального языка при описании системных объектов на язык математических абстракций упрощает логику суждений, уменьшает роль эмпирики и на этой основе позволяет увеличить информационную емкость модели исследуемого объекта. Поэтому в качестве языка изложения выбран язык теории множеств.

4.2. Методика системного описания кинематической подсистемы

Среди известных S-систем – способов формообразующей обработки значительную группу составляют такие, для осуществления которых требуются только формообразующие (Φ) движения, предназначенные для перемещения характеристического образа по воспроизводящим линиям. Однако известны также S-системы, целесообразное функционирование которых невозможно без осуществления дополнительных движений, непосредственно подготавливающих формообразующие перемещения характеристического образа. К дополнительным относятся движения деления (D), врезания (Vp) и вспомогательные движения (Vc) – позиционирование ($Пз$), транспортирование ($Тр$), отвода инструмента от заготовки (или наоборот) при холостом обратном ходе.

Формообразующие движения могут быть элементарными (вращательными и поступательными), составными и сложными. Элементарные формообразующие движения соответствуют преимущественно классу H^c образования производящих линий. Например, при зубодолблении (рис. 2.1) движение $П_1$, при точении цилиндрической поверхности (рис. 3.9) движения V_1 и $П_2$. Составные формообразующие движения соответствуют классу $П$ образования производящих линий и состоят из двух функционально несвязанных элементарных движений. Например, при зубофрезеровании червячной фрезой (рис. 3.8, *и*) направляющая (линия зуба) нарезаемого зубчатого колеса воспроизводится составным движением $V_1 \wedge П_3$. Символ « \wedge » в составном движении обозначает обязательную одновременность (параллельность) выполнения составляющих его элементарных движений. Составными движениями воспроизводятся элементарные образующая и направляющая – прямая линия и дуга окружности. Сложные движения состоят из двух и более функционально связанных между собой элементарных движений. Например, соответствующее классу H^k движение обката V_2V_3 , воспроизводящее направляющую (профиль зубчатого колеса) при зубодолблении (рис. 2.1) или соответствующее классу H^c винтовое движение $V_1П_2$ при нарезании резьбы фасонным резцом (рис. 4.1). Отсутствие символа в сложном движении по аналогии с принятым в станковедении обозначением сложного движения обозначает функциональную связь между образующими его элементарными движениями. Сложными движениями воспроизводятся также образующая и направляющая произвольной формы, как плоские, так и пространственные.

Движение деления предназначено для перемещения в новое геометрическое положение траектории движения формообразования с целью его многократного повторения при образовании сложнопрофильных поверхностей. Например, после шлифования очередной впадины зубчатого колеса дисковым однониточным кругом (рис. 3.8, в) движением деления B_5 переносят траекторию движения круга в следующую впадину зубчатого колеса. В некоторых способах обработки, например при зубодолблении колес долбяком, поступательно-возвратное движение долбяка при поступательном движении, т. е. при резании, является формообразующим, а при возвратном (холостом) ходе является движением деления.

Движение врезания служит для перемещения инструмента в зону формообразования. Оно обычно предшествует движению формообразования. Например, при точении фасонным резцом (рис. 3.8, о) этап срезания припуска до совпадения лезвия резца с образующей получаемой поверхности выполняется движением Π_2 врезания. Таким же по функциональному назначению движением Π_2 осуществляется подвод полноконтактного ролика к обкатываемой поверхности (рис. 3.8, и) и движением Π_1 при закрытии штампа при объемной штамповке (рис. 3.8, р).

Вспомогательные движения позиционирования и транспортирования характерны для способов обработки по роторной схеме. Ниже при системном анализе многообразия способов зубодолбления такая схема будет рассмотрена.

Движение отвода (отскока) инструмента от заготовки (или наоборот) при холостом обратном ходе используется при механическом резании и предназначено для устранения обратного резания или затирания инструмента о заготовку. Практически все известные способы строгания и долбления осуществляются с использованием этого движения, выполняемого после каждого рабочего хода, т. е. на холостом ходу.

Будем называть рассмотренные формообразующие и вспомогательные движения и перемещения характеристического образа исполнительными движениями. Для их выполнения любая S-система должна обладать вполне определенной структурой (механикой), обеспечивающей взаимодействующие объекты информацией о закономерностях этих перемещений. Такая структура является основой кинематической подсистемы. Будем рассматривать кинематическую подсистему в виде объединения структур отдельных формообразующих и вспомогательных движений:

$${}^k M = \bigcup_{i=1}^n {}^k M_i,$$

где ${}^k M_i$ – структура отдельного движения;
 n – количество отдельных движений.

Тогда функция кинематической подсистемы есть объединение функций структур отдельных движений:

$${}^K F = \bigcup_{i=1}^n {}^K F_i,$$

где ${}^K F$ – функция кинематической подсистемы;

${}^K F_i$ – функция структуры отдельного движения.

Функцию кинематической подсистемы представим как множество параметров:

$${}^K F = \{P, \Theta, \{\Phi_i\}, \{G_j\}\},$$

где P и Θ – соответственно характеристический образ и класс образования поверхности;

$\{\Phi_i\}$ – конечное множество формообразующих и вспомогательных движений;

$\{G_j\}$ – конечное множество отношений между формообразующими и вспомогательными движениями.

Передача информации о закономерностях перемещений невозможна без энергии. Причем она не используется для воздействия на твердое тело, а предназначена только для переноса кинематической информации. Следовательно, структуру отдельного движения можно рассматривать как объединение информационного и энергетического комплексов:

$${}^K M_i = J_i \cup E_i,$$

где J_i – информационный комплекс;

E_i – энергетический комплекс.

Функцию структуры отдельного движения представим как множество параметров:

$${}^K F_i = \{\Theta_L, \Phi, g\},$$

где Θ_L – подкласс образования воспроизводящей линии;

Φ – формообразующее или вспомогательное движение;

g – отношение между элементарными движениями, составляющими формообразующее или вспомогательное движение.

В станковедении каждое движение характеризуется следующими пятью параметрами: траекторией, путем, направлением, скоростью и исходной точкой. В других частных направлениях машиноведения понятие о параметрах

исполнительных движений не рассматривается, что можно объяснить существенно меньшим, чем в станковедении, разнообразием формообразующих движений. Тем не менее, это понятие носит всеобщий характер независимо от вида воздействия на твердое тело и класса технологических машин.

При описании S-систем рассматриваются наиболее общие качественные вопросы образования поверхностей. В этом случае наиболее важным параметром является траектория. Определенность траектории конкретного исполнительного движения обеспечивается информационным комплексом, а энергетический комплекс служит для обеспечения информационного комплекса энергией. Форма траектории взаимно однозначно соответствует конкретной воспроизводящей линии и может воспроизводиться различными движениями: элементарным вращательным или поступательным, составным, состоящим из двух элементарных движений, и сложным, состоящим из двух и более строго согласованных элементарных движений. Заметим, что элементарными и составными движениями образуется траектория простой формы – окружность или прямая линия. В случае составного движения одно из составляющих его элементарных движений обычно обеспечивает простое периодическое движение характеристического образа, например, вращение, а другое перемещает центр вращения по эквидистанте к воспроизводимой линии. Сложное движение используется в основном при образовании траекторий сложной формы.

Информация о траектории конкретного исполнительного элементарного движения заложена в соответствующей вращательной или поступательной элементарной кинематической паре. К подвижному звену этой пары подводится энергия от какого-либо источника. В технологических машинах связь между подвижными звеньями кинематических пар и источником (или источниками) энергии осуществляется кинематическими цепями различной протяженности. В S-системах источники энергии и кинематические связи непосредственно не указываются, а выражаются в описаниях и иллюстрирующих их схемах взаимодействия объектов посредством соответствующих движений. Будем называть информационным комплексом кинематическую пару, несущую информацию о траектории элементарного исполнительного движения, а ее связь с источником энергии и этот источник – энергетическим комплексом.

Информация о траектории сложного исполнительного движения, состоящего из двух и более строго согласованных элементарных движений, заложена в элементарных кинематических парах и связывающей их кинематической цепи, к одному из звеньев которой, называемому зве-

ном соединения связей, подводится энергия от соответствующего источника. В этом случае информационным комплексом будем называть совокупность соответствующих элементарных кинематических пар вместе с их связью, а энергетическим – источник энергии и его связь с информационным комплексом.

Известно, что в технологических машинах, реализующих один и тот же способ обработки, может использоваться для выполнения исполнительных движений как один, так и несколько источников энергии. В описаниях способов формообразующей обработки количество источников энергии не конкретизируется. Однако, принимая во внимание то, что структура каждого исполнительного движения обязательно содержит информационный и энергетический комплексы, а расход энергии для переноса информации в S-системах зависит только от количества информационных комплексов, эту неопределенность можно устранить. Поэтому будем считать, что любая S-система имеет общий источник энергии, а важнейшим элементом каждого конкретного энергетического комплекса является связь, передающая энергию от источника к подвижному звену информационного комплекса.

При теоретико-множественном описании кинематической подсистемы вспомогательные движения, выполняемые периодически, будем отмечать знаком « \ddagger », выполняемые одновременно (параллельно) с формообразующими движениями – « \wedge », выполняемые последовательно – «|» и выполняемые синхронно – «/». Переменное элементарное движение будем обозначать знаком « \sim », указывая его над соответствующим символом.

Представим кинематическую подсистему рассмотренного выше (рис. 4.1) способа нарезания резьбы фасонным резцом в виде теоретико-множественной модели. Профиль вспомогательного элемента резца совпадает (зеркально отображает) профиль резьбы. Поэтому характеристический образ этого резца – $\{E\}_1$. Следовательно, данный способ не имеет кинематической структуры, воспроизводящей образующую (профиль резьбы), а ее функцию выполняет характеристический образ инструмента.

Структура, воспроизводящая направляющую (винтовую линию), записывается формулой:

$${}^{\kappa}M_H = JJ \cup E.$$

Функция этой структуры есть множество:

$${}^{\kappa}F_H = \{H^c, \Phi_H(B_1\Pi_2)\}.$$

Следовательно, полная структура кинематической подсистемы описывается формулой, воспроизводящей направляющую, т. е.:

$${}^k M \equiv {}^k M_n,$$

где « \equiv » – символ эквиваленции – обозначает равнозначность обеих структур.

Функция кинематической подсистемы есть множество:

$${}^k F = \{ \{E\}_1, E - H^c, \Phi_H(B_1 P_2) \}.$$

Отдельно следует обсудить представление в символах поступательно-возвратного и вращательно-возвратного движений. В технической литературе [7], посвященной формообразованию, эти движения относят к элементарным, показывая их на схемах двухсторонней стрелкой (рис. 2.1, движения P_1 и P_5). Однако в математических моделях символы этих движений не отличаются от символов поступательного и вращательного движений. В системологии такая неопределенность недопустима.

При обкатном зубодолблении (рис. 2.1) поступательно-возвратное движение P_1 последовательно выполняет две функции: формообразование образующей зубчатого колеса (поступательная составляющая движения P_1) и перенос траектории формообразования (возвратная составляющая этого движения) в новое (исходное) положение для повторения формообразования. Следовательно, можно утверждать, что поступательно-возвратное движение P_1 есть непрерывная последовательность чередующихся формообразующего и делительного движений. Аналогично можно показать, что вспомогательное поступательно-возвратное движение P_5 есть непрерывная последовательность чередующихся движений позиционирования и деления, синхронизированная с соответствующими составляющими движения P_1 . Следовательно, анализируемые движения можно представить в виде математических моделей:

$$[\Phi(\uparrow P_1) \mid D(\downarrow P_1)] \text{ и } [P_3(\uparrow P_5) \mid D(\downarrow P_5)].$$

Однако такая форма представления движений достаточно громоздка. Ее можно упростить, не ухудшая информативности, на основе следующего рассуждения. Как известно рассматриваемые движения в технологических машинах воспроизводятся одним механизмом, например, кулисным, кривошипно-ползунным, кулачковым. Таким образом, для выполнения делительной составляющей этих специфических движений не требуется отдельный механизм. Это обстоятельство позволяет представить анализируемые движения более короткими математическими моделями:

$$\Phi(\uparrow P_1) \text{ и } P_3(\uparrow P_5).$$

В такой записи делительная составляющая поступательно возвратного движения не показывается, а признаком ее наличия является двухсторонняя стрелка « \updownarrow ».

В ряде схем обе составляющие поступательно-возвратного движения выполняют функцию формообразующего движения, например, при обработке сложнопрофильных поверхностей. Соответствующий пример будет рассмотрен ниже.

В табл. 4.1 приведены математические модели кинематических подсистем способов формообразующей обработки, представляющих все исходные классы образования реальных поверхностей. Схемы взаимодействия заготовки и инструмента, поясняющие эти способы, показаны на рис. 3.8.

Для оценки сложности кинематической подсистемы введем критерий сложности, который будем определять как общее количество информационных и энергетических комплексов подсистемы:

$$C_k = C_J + C_E = \sum_i J_i + \sum_j E_j,$$

где C_k – критерий сложности кинематической подсистемы;

C_J и C_E – соответственно критерий сложности информационного и энергетического комплексов.

Очевидно, минимальный критерий C_k характеризует наименьшее количество необходимых информационных и энергетических комплексов и, следовательно, наиболее простую кинематическую подсистему S-системы. Из рис. 3.8 и таблицы 4.1 следует, что простейшую кинематическую подсистему имеют S-системы, функционирование которых осуществляется по классу E – E образования поверхностей. Далее по мере усложнения следуют S-системы, воспроизводящие образующую по классу E и т. д.

Оценивая различные кинематические подсистемы критерием сложности можно определить пути уменьшения сложности кинематической подсистемы. Задачу уменьшения C_k можно решать следующими двумя путями: переходом к S-системам, образующим обе или одну из воспроизводящих линий по классу E; переносом функции некоторых энергетических комплексов в зону контакта заготовки и инструмента. Первый путь объясняет появление и интенсивное развитие таких процессов, как литье под давлением, непрерывное литье, различные виды штамповки, формирование изделий в электромагнитном поле и т. п., второй – появление процессов обработки поверхностным пластическим деформированием и резание самовращающимися резцами.

Критерии сложности кинематической подсистемы некоторых рассмотренных S-систем приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Структура кинематической подсистемы некоторых S-систем

Номер рисунка	Математическая модель кинематической подсистемы и ее функция	Критерий сложности $C_J + C_E = C_K$
1	2	3
3.8, а	${}^K M = ((J \cup E) \wedge (J \cup E))_O \cup ((J \cup E) \wedge (J \cup E))_H$	4 + 4 = 8
	${}^K F = \{\{1\}_1, \Pi - \Pi, \{\Phi_O(B_1 \wedge B_2), \Phi_H(B_3 \wedge \Pi_4)\}\}$	
3.8, б	${}^K M = ((J \cup E) \wedge (J \cup E))_O \cup ((J \cup E))_H$	3 + 3 = 6
	${}^K F = \{\{1\}_1, \Pi - H^C, \{\Phi_O(B_1 \wedge B_2), \Phi_H(\Pi_3)\}\}$	
3.8, в	${}^K M = ((J \cup E) \wedge (J \cup E))_O \cup ((J \cup E))_H \cup (J \cup E)_D$	5 + 4 = 9
	${}^K F = \{\{M_3\}_1, \Pi - H^K, \{\Phi_O(B_1 \wedge \Pi_2), \Phi_H(B_3 \Pi_4), \ddagger D(B_5)\}\}$	
3.8, д	${}^K M = (J \cup E)_O \cup (J \cup E)_H$	2 + 2 = 4
	${}^K F = \{\{1\}_1, H^C - \Pi, \{\Phi_O(\Pi_1), \Phi_H(\Pi_2)\}\}$	
3.8, е	${}^K M = (J \cup E)_O \cup (J \cup E)_H$	2 + 2 = 4
	${}^K F = \{\{1\}_1, H^C - H^C, \{\Phi_O(B_1), \Phi_H(\Pi_2)\}\}$	
3.8, ж	${}^K M = (J \cup E)_O \cup ((J \cup E) \wedge (J \cup E))_H$	3 + 3 = 6
	${}^K F = \{\{M_3\}_1, H^C - H^K, \{\Phi_O(B_1), \Phi_H(B_2 \wedge \Pi_3)\}\}$	
3.8, и	${}^K M = ((J \cup E))_O \cup ((J \cup E) \wedge (J \cup E))_H$	4 + 3 = 7
	${}^K F = \{\{M_3\}_k, H^K - \Pi, \{\Phi_O(B_1 B_2), \Phi_H(B_2 \wedge \Pi_3)\}\}$	
3.8, к	${}^K M = ((J \cup E))_O \cup (J \cup E)_H$	3 + 2 = 5
	${}^K F = \{\{M_3\}_k, H^K - H^C, \{\Phi_O(B_1 B_2), \Phi_H(\Pi_3)\}\}$	
3.8, л	${}^K M = ((J \cup E))_O \cup ((J \cup E))_H$	4 + 2 = 6
	${}^K F = \{\{M_3\}_1, H^K - H^K, \{\Phi_O(B_1 B_2), \Phi_H(B_3 B_4)\}\}$	
3.8, н	${}^K M = ((J \cup E) \wedge (J \cup E))_H$	2 + 2 = 4
	${}^K F = \{\{E\}_k, E - \Pi, \{\Phi_H(B_1 \wedge \Pi_2)\}\}$	
3.8, о	${}^K M = (J \cup E)_H \cup (J \cup E)_{Bp}$	2 + 2 + 4
	${}^K F = \{\{E\}_1, E - H^C, \{\Phi_H(B_1), \wedge Bp(\Pi_2)\}\}$	
3.8, п	${}^K M = ((J \cup E))_H \cup (J \cup E)_{Bp}$	3 + 2 = 5
	${}^K F = \{\{E\}_1, E - H^K, \{\Phi_H(B_1 B_3), \wedge Bp(\Pi_2)\}\}$	
3.8, р	${}^K M = (J \cup E)_{Bp}$	1 + 1 = 2
	${}^K F = \{\{E \times E\}_1, E - E, Bp(\Pi_1)\}$	

4.3. Методика системного описания базирующей подсистемы

Любой способ формообразующей обработки предусматривает определенную исходную ориентацию заготовки относительно характеристического образа инструмента. Для этого в технологических машинах используются различные установочные приспособления, материализующие технологический комплект баз. Как известно, комплект баз лишает заготовку всех шести степеней свободы: трех поступательных движений вдоль осей координат и трех вращений вокруг указанных осей. Это условие называют правилом шести точек. Базы, в том числе технологические, различаются по отнимаемым степеням свободы и характеру проявления. По отнимаемым степеням свободы различают установочную, направляющую, опорную, двойную направляющую и двойную опорную, а по характеру проявления – явную и скрытую.

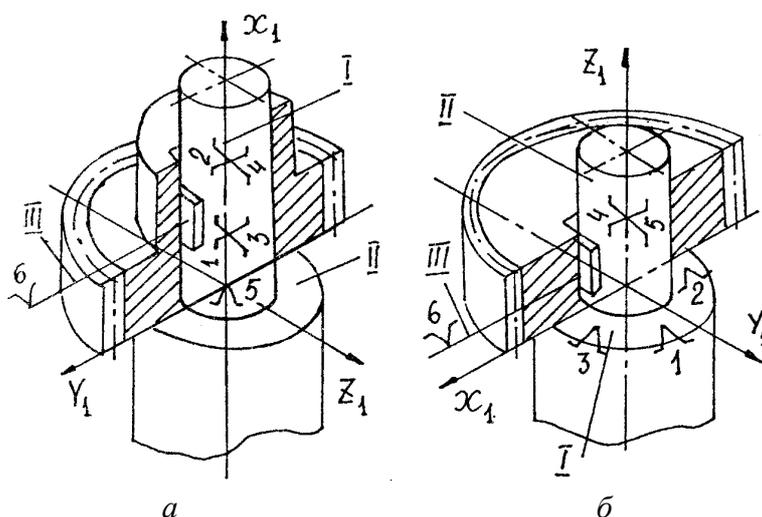


Рис. 4.3. Схемы базирования зубчатого колеса:
a – с длинной ступицей; *б* – с короткой ступицей

На рис. 4.3 приведены примеры базирования цилиндрического зубчатого колеса при качественно различной длине его ступицы. Комплект баз при базировании зубчатого колеса с длинной ступицей (рис. 4.3, *a*) состоит из двойной направляющей скрытой базы *I*, отнимающей четыре степени свободы (точки *1, 2, 3, 4*), опорной явной базы *II*, отнимающей одну степень свободы (точка *5*), и опорной скрытой базы *III*, отнимающей также одну степень свободы (точка *6*). При обработке узкого зубчатого колеса качественный характер баз изменяется. В этом случае комплект баз включает (рис. 4.3, *б*) установочную явную базу *I*, отнимающую три степени свободы (точки *1, 2, 3*), двойную опорную скрытую базу *II*, отнимающую две степени свободы (точки *4, 5*), и опорную скрытую базу *III*, отнимающую одну степень свободы (точка *6*).

Аналогично можно рассматривать комплекты баз, обеспечивающих определенность установки иных заготовок. Так, заготовку при точении цилиндрической поверхности устанавливают, используя комплект баз, составленный в зависимости от конкретных условий из качественно различных баз. Цилиндрическую заготовку возможно установить в токарном патроне, в центрах с использованием поводкового хомутика, в токарном патроне – с поджатием задним центром.

При разработке технологического процесса изготовления конкретной детали выбор оптимального комплекта баз из совокупности возможных имеет принципиальное значение. В то же время качественные различия отдельных комплектов баз несущественны при функционировании S-систем. Существен лишь сам факт базирования заготовки, обеспечивающий ее определенную ориентацию относительно характеристического образа инструмента. Это позволяет, абстрагируясь от конкретных конструкций установочных приспособлений и их элементов, рассматривать базирующую подсистему любой S-системы как счетное множество баз (подсистем второго уровня), обеспечивающих определенность исходной ориентации заготовки относительно характеристического образа инструмента:

$${}^{\sigma}M = \bigcup_{i=1}^3 {}^{\sigma}M_i,$$

где ${}^{\sigma}M_i$ – отдельная база базирующей подсистемы.

В сформулированном определении базирующая подсистема является аналогом технологического комплекта баз.

Базы характеризуются числом отнимаемых степеней свободы. Эту характеристику положим в основу формализации баз. Для этого в математических моделях различных баз (табл. 4.2) будем указывать отнимаемые степени свободы.

Таблица 4.2

Математические модели стандартных баз

Принятое название базы	Модель базы
Двойная направляющая	${}^{\sigma}M^{1-4}$
Установочная	${}^{\sigma}M^{1-3}$
Направляющая	${}^{\sigma}M^{4-5}$
Опорная	${}^{\sigma}M^6$
Двойная опорная	${}^{\sigma}M^{4-5}$

В приведенных примерах базирование рассмотрено применительно к материализации комплекта баз с помощью установочных приспособлений, не имеющих непосредственных функциональных связей с характеристиче-

ским образом инструмента. Однако в технологии формообразующей обработки известны S-системы, в которых полностью или частично функцию базирующей подсистемы выполняет характеристический образ. В технической литературе такое совмещение функций применительно к способам формообразующей обработки еще не анализировались. Поэтому рассмотрим некоторые известные варианты совмещения функций и его влияние на базирующую подсистему.

На рис. 4.4 приведена схема базирования втулки при протягивании шлицевого отверстия. Для обработки втулка 2 прижимается к подкладной плите 1 протяжного станка и центрируется до начала срезания припуска по цилиндрической поверхности протяжки 3. Комплект баз для данного способа состоит из трех явных баз. Установочная база I лишает заготовку трех степеней свободы (точки 1, 2, 3) и материализуется элементом (плитой 1) технологической машины. Направляющая база II лишает заготовку двух степеней свободы (точки 4, 5), а опорная III – одной степени свободы (точка 6). Причем направляющая и опорная базы материализованы на инструменте.

На рис. 4.5 приведена схема способа обработки поверхностным пластическим деформированием конической поверхности. Для обработки заготовка 1 размещается между подвижной 2 и неподвижной 3 плашками и поддерживается упором 4. При сообщении подвижной плашке 3 движения формообразования W_1 вследствие силового замыкания между заготовкой и плашками заготовка прокатывается по плашкам. Вместе с заготовкой перемещается упор 4. Комплект баз для этого способа обработки включает одну явную и две скрытые базы. Двойная направляющая база I лишает заготовку четырех степеней свободы (точки 1, 2, 3, 4). Эта база является скрытой и материализуется посредством характеристического образа инструмента (плашек). Опорная явная база II лишает заготовку одной степени свободы (точка 5) и материализуется посредством установочного элемента 4. Опорная база III лишает заготовку также одной степени свободы (точка 6), но является скрытой и материализуется, также как и двойная направляющая, посредством характеристического образа инструмента.

При формообразовании изделия из жидкого металла в управляемом электромагнитном поле функцию базирующей подсистемы выполняет поле, т. е. характеристический образ инструмента. Аналогично функцию базирующей подсистемы выполняет характеристический образ инструмента при полноконтактной обкатке сферы (рис. 4.2) и во многих других способах обработки.

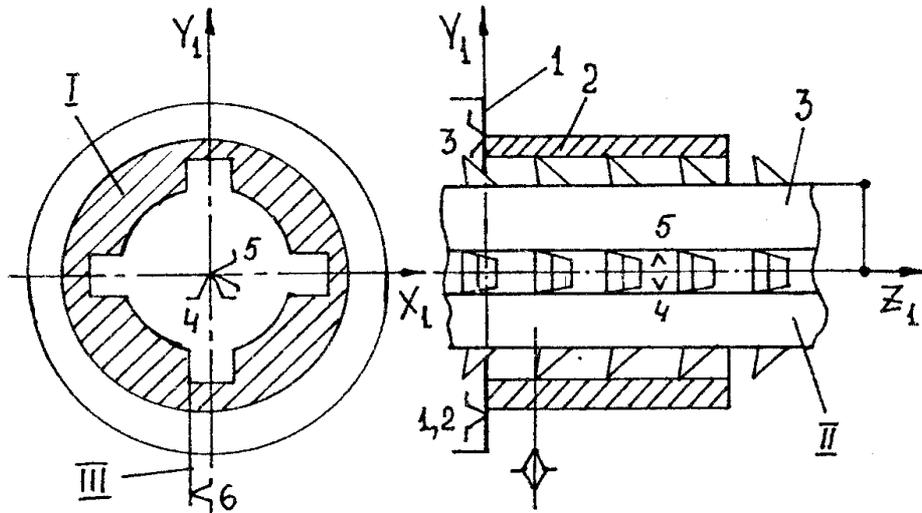


Рис. 4.4. Схема базирования шлицевой втулки при протягивании

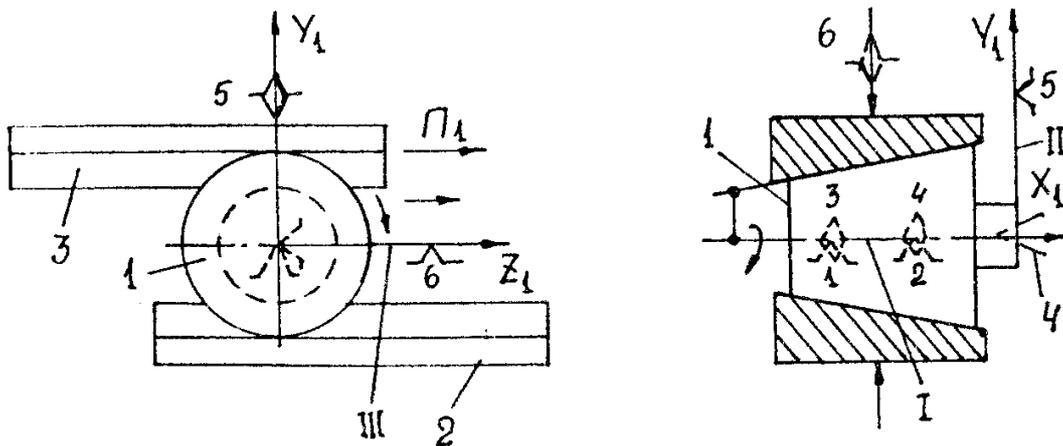


Рис. 4.5. Схема базирования конической детали при обкатке

Таким образом, независимо от конструктивных особенностей базы, составляющие базирующую подсистему любой S-системы можно разделить на две группы. Первую составляют базы, не имеющие структурных связей с характеристическим образом, а вторую – базы, функция которых передана характеристическому образу. На основании этого функцию базирующей подсистемы будем рассматривать как множество параметров:

$${}^{\circ}F = \{ \{W_i\}, \{Q_j\} \},$$

где ${}^{\circ}F$ – функция базирующей подсистемы;

W_i – конечное множество вариантов базирования для конкретной S-системы;

Q_j – конечное множество отношений между базами и характеристическим образом инструмента.

Рассмотренные примеры показывают, что чем больше баз первой группы содержит базирующая подсистема, тем она сложнее, и наоборот. Это позволяет для оценки сложности базирующей подсистемы ввести критерий сложности, который будем определять как общее количество баз, подлежащих материализации в виде конкретных установочных приспособлений или элементов:

$$C_{\bar{o}} = \bigcup_q^3 \bar{o}M_q,$$

где $C_{\bar{o}}$ – критерий сложности базирующей подсистемы;

$\bar{o}M_q$ – база, материализуемая установочным приспособлением или элементом.

Базирующая подсистема, являясь по определению аналогом технологического комплекта баз, всегда содержит три явных или скрытых базы в любом сочетании. Следовательно, максимальный критерий сложности базирующей подсистемы равен трем, а минимальный – нулю. Из определения понятия критерия сложности выводится единственный путь упрощения базирующей подсистемы, заключающийся в передаче функций одной или нескольких баз характеристическому образу инструмента.

Таблица 4.3

Структура базирующей подсистемы некоторых S-систем

Номер рисунка	Математическая модель базирующей подсистемы и ее функция	Критерий сложности $C_{\bar{o}}$
4.2	$\bar{o}M = \bar{o}M^{1-4} \cup \bar{o}M^5 \cup \bar{o}M^6$	0
	$\bar{o}F = \{1, \{\bar{o}M \cap P\}\}$	
4.3, а	$\bar{o}M = \bar{o}M^{1-4} \cup \bar{o}M^5 \cup \bar{o}M^6$	3
	$\bar{o}F = \{1, 0\}$	
4.3, б	$\bar{o}M = \bar{o}M^{1-3} \cup \bar{o}M^{4-5} \cup \bar{o}M^6$	4
	$\bar{o}F = \{1, 0\}$	
4.4	$\bar{o}M = \bar{o}M^{1-3} \cup \bar{o}M^{4-5} \cup \bar{o}M^6$	1
	$\bar{o}F = \{1, \{\bar{o}M^{4-5} \cup \bar{o}M^6 \cap P\}\}$	
4.5	$\bar{o}M = \bar{o}M^{1-4} \cup \bar{o}M^5 \cup \bar{o}M^6$	1
	$\bar{o}F = \{1, \{\bar{o}M^{1-4} \cup \bar{o}M^6 \cap P\}\}$	

В табл. 4.3 приведены математические модели базирующих подсистем некоторых рассмотренных выше способов формообразующей обработки (S-систем), а также их функции и коэффициенты сложности.

4.4. Методика системного описания энергетической подсистемы

Процесс воздействия на заготовку с целью получения на ней заданной поверхности осуществляется посредством подвода в зону обработки энергии различного вида. В разделе 2 показано, что вид используемой энергии определяет природу физико-химического воздействия, играющего основную роль в изменении исходного состояния заготовки.

Среди известных S-систем значительную группу составляют способы формообразующей обработки, для осуществления которых используется только один из возможных первичных видов физического или химического воздействия непосредственно для технологических целей. Большинство рассмотренных ранее примеров относится к этой группе S-систем. Значительную часть составляют S-системы, основанные на использовании механической энергии.

В промышленности непрерывно возрастает применение относительно новых материалов: высокопрочных, нержавеющей, жаропрочных сталей и сплавов, тугоплавких металлов, металло- и минералокерамики, пластмасс с особыми физико-механическими свойствами. Обработка таких материалов традиционными способами, основанными на механическом воздействии на твердое тело, затруднена, а в ряде случаев практически невозможна. Это определило направление интенсивных поисков качественно новых процессов обработки. Появились группы S-систем, основанные на использовании иного вида энергии для технологических целей, например, электрической, химической, а затем и группы S-систем, в которых используется одновременно два вида энергии и более.

Будем называть природу первичного воздействия на твердое тело, в необходимом единстве с которой функционируют кинематическая и базисная подсистемы, внутренней средой S-системы. Как следует из изложенного выше, внутренняя среда может быть простой однокомпонентной и сложной, состоящей из нескольких простых компонент. Вполне естественно предположить, что каждая компонента внутренней среды воспроизводится определенной структурой. При разработке различных по конструкции технологических машин, реализующих один и тот же способ формообразующей обработки, в структуре, воспроизводящей конкретную компоненту внутренней среды, возможны как качественные, так и количественные различия. Однако в соответствии с решаемыми в данном исследовании вопросами они не существенны при анализе структуры и функции S-систем. В данном случае существенен сам факт энергетического воздей-

ствия на твердое тело и, следовательно, необходимость в энергетической подсистеме. Это позволяет рассматривать энергетическую подсистему, воспроизводящую внутреннюю среду S-системы, в виде объединения отдельных структур (подсистем второго уровня), каждая из которых воспроизводит одну компоненту данной среды:

$$\mathfrak{M} = \bigcup_{i=1}^m \mathfrak{M}_i,$$

где \mathfrak{M} – энергетическая подсистема;

\mathfrak{M}_i – структура отдельной энергетической компоненты;

m – количество энергетических компонент.

Энергетическая подсистема S-систем по рис. 3.8 воспроизводит только одну компоненту внутренней среды – механическую и, следовательно, содержит только одну энергетическую структуру, воспроизводящую эту компоненту. Причем энергетическая подсистема названных S-систем пересекается с их кинематическими подсистемами.

Рассмотрим примеры некоторых известных S-систем, признанных в разное время изобретениями, энергетическая подсистема которых содержит более одной составляющих ее энергетических структур.

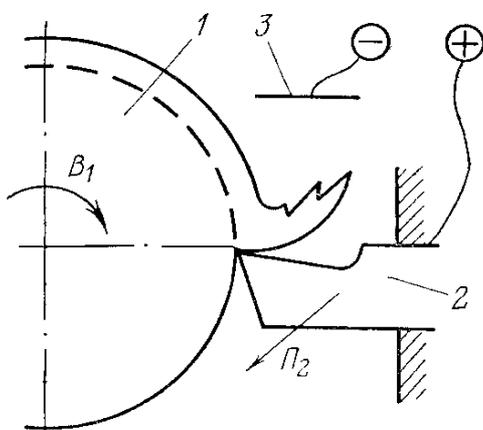


Рис. 4.6. Способ точения с наложением электростатического поля

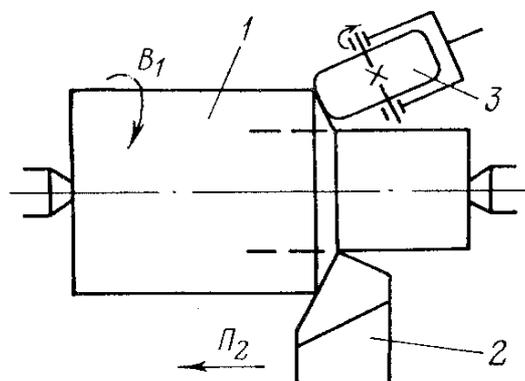


Рис. 4.7. Способ точения с опережающим пластическим деформированием

На рис. 4.6 показана схема способа точения в электростатическом поле по авторскому свидетельству 395181 (SU). Этот способ отличается от способа токарной обработки, рассмотренного ранее (рис. 2.5), тем, что на вещество заготовки 1 дополнительно воздействуют электростатическим полем, образуемым между резцом 2, являющимся анодом, и металлической пластиной 3, являющейся катодом. При этом поле направлено электродвижущей силой собственного поля, возникающего в зоне обработки вследствие резания.

В анализируемой S-системе внутренняя среда содержит две энергетические компоненты. Первая – первичное механическое воздействие на твердое тело – обеспечивает основную первообразную функцию S-системы, заключающуюся в срезании припуска с заготовки, т. е. в образовании заданной поверхности, форма которой определяется кинематической подсистемой. Вторая компонента – электростатическое воздействие – обеспечивает дополнительную функцию, заключающуюся в нейтрализации электродвижущей силы, возникающей вследствие срезания припуска. По утверждению автора способа, вторая компонента позволяет достичь дополнительной цели – повышения стойкости инструмента. Обе компоненты внутренней среды воспроизводятся соответствующими структурами энергетической подсистемы. Отметим также, что одна из компонент внутренней среды (механическое воздействие) воспроизводится энергетической структурой, совпадающей со структурой кинематической подсистемы, т. е. энергия механического воздействия переносится от источника этой энергии в зону воздействия посредством кинематической подсистемы. Вторая компонента внутренней среды (электростатическое поле) воспроизводится отдельной структурой энергетической подсистемы.

На рис. 4.7 приведена схема способа точения с опережающим пластическим деформированием по авторскому свидетельству 358089 (SU). Этот способ отличается от предыдущего тем, что на вещество заготовки *1* оказывают дополнительное воздействие не электростатическим полем, а механической энергией. Внутренняя среда такой S-системы содержит также две компоненты. Первая – механическая – обеспечивает основную функцию – срезание припуска резцом *2* и образования требуемой поверхности. Вторая – дополнительная механическая – обеспечивает дополнительную функцию – пластическое деформирование роликом *3* материала заготовки на некотором расстоянии от зоны срезания припуска. Как утверждают авторы данного способа, опережающее пластическое деформирование позволяет достичь дополнительной цели – повышения стойкости резца и производительности обработки. Обе механические компоненты внутренней среды воспроизводятся соответствующими составляющими энергетической подсистемы. Первая механическая компонента, обеспечивающая срезание припуска, как и в предыдущем примере, создается посредством кинематической подсистемы. Отметим также, что дополнительное механическое воздействие обеспечивается также ее кинематической подсистемой. При этом ролик *3* является конечным звеном составляющей кинематической подсистемы, воспроизводящей образующую цилиндрической поверхности (окружность) движением скорости резания $\Phi_0(B_1)$. Действительно, глубина проникновения опережающей пластической деформа-

ции материала заготовки зависит от установки ролика 3 относительно резца 2, что определяет в конечном итоге поток механической энергии по кинематической подсистеме, поступающей в зону деформирования, а скорость распространения деформации вдоль поверхности обработки – от диаметра ролика 3 и передаточного отношения между заготовкой и роликом. Следует также отметить, что вращение ролика 3 не является формообразующим или вспомогательным движением, подготавливающим формообразующие движения.

Рассмотренный способ точения с опережающим пластическим деформированием можно изменить таким образом, чтобы вторая компонента внутренней среды воспроизводилась отдельной составляющей энергетической подсистемы, независи-

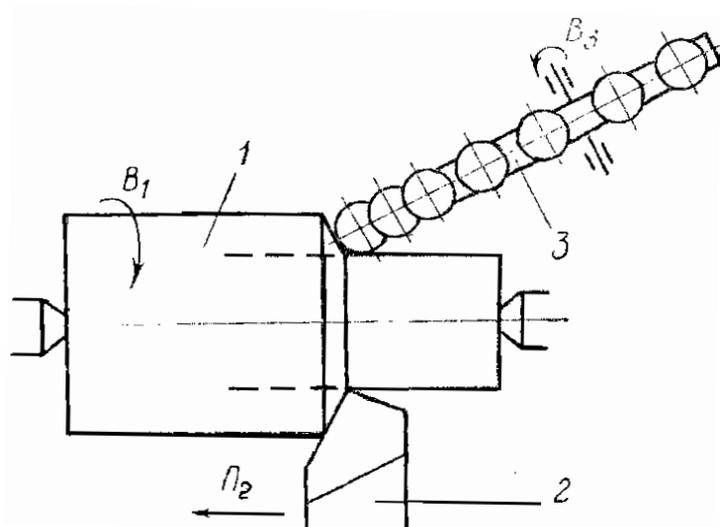


Рис. 4.8. Способ точения с пульсирующим пластическим деформированием

мой от составляющей кинематической подсистемы, воспроизводящей образующую получаемой поверхности. Такое видоизменение позволит управлять характеристиками процесса обработки в более широких пределах, чем при использовании рассмотренного способа – прототипа. Решение данной задачи иллюстрируется схемой, приведенной на рис. 4.8. Здесь дополнительное механическое

воздействие – пластическое деформирование заготовки – осуществляется инструментом 3, выполненным в виде диска, в периферийной части которого размещены свободно вращающиеся шарики. При обработке деформирующему инструменту 3 сообщают вращательное движение V_3 , у которого круговую частоту можно изменять в широких пределах независимо от скорости воспроизведения образующей движением V_1 заготовки 1. Характер воздействия при этом будет динамичным пульсирующим, что объясняется иным характеристическим образом деформирующего инструмента. Глубина проникновения опережающей пластической деформации при таком виде воздействия будет зависеть не только от усилия прижатия шариков к заготовке в статическом состоянии, но и от круговой частоты движения V_3 инструмента 3. В свою очередь это позволит уменьшить поток энергии, подводимой к зоне обработки, через кинематическую подсистему, воспроизводящую геометрическую форму обрабатываемой поверхности.

Как и в предыдущем примере вращение деформирующего инструмента 3 не является формообразующим или вспомогательным, подготавливающим формообразующее движение $\Phi_0(B_1)$. Следовательно, воспроизводящая его структура входит в энергетическую подсистему соответствующей S -системы.

Уместно отметить, что рассмотренный способ точения с пульсирующим пластическим деформированием мог быть признан изобретением, в случае подачи соответствующей заявки до разглашения его содержания в открытой технической литературе.

На рис. 4.9 показана схема способа электролитического сверления, используемого для обработки отверстий в твердых сплавах, закаленных сталях, магнитных сплавах и других токопроводящих труднообрабатываемых материалах. По этому способу обработку ведут алмазным сверлом 1 , закрепленным в шпинделе станка с помощью специальной головки, которая, кроме передачи движения вращения B_2 и подачи Π_2 , обеспечивает также подачу электролита под давлением P_3 во внутреннюю полость инструмента. Рассверливаемая заготовка 2 является анодом, а сверло 1 – катодом. Процесс обработки основан на использовании трех видов первичного воздействия: механического и двух видов электрического – электрохимического и электроэрозионного.

Наиболее интенсивный съем материала происходит при преимущественном механическом воздействии. В этом случае абразивный съем должен осуществляться при высоких удельных давлениях. В результате достигается высокая производительность, но происходит интенсивный износ инструмента. Если решающее значение при выполнении операции имеет обеспечение высокой стойкости инструмента, то основную роль в процессе съема припуска должно иметь электрохимическое воздействие. При определенных режимах обработки существенное значение может иметь электроэрозионное воздействие, которое обусловлено интенсивными электроэрозионными разрядами, происходящими вследствие контактирования токопроводящей связки алмазного слоя инструмента с обрабатываемой поверхностью.

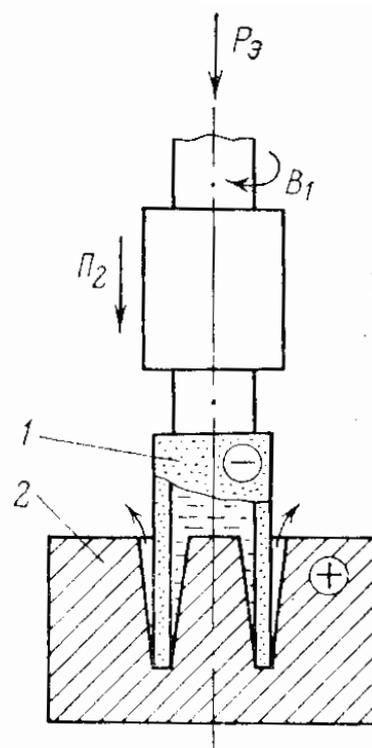


Рис. 4.9. Способ алмазно-электролитического сверления

Таким образом, энергетическая подсистема способа алмазно-электролитического сверления содержит три составляющие, каждая из которых воспроизводит одну компоненту внутренней среды. Отметим, что одну из компонент (механическое воздействие) воспроизводит кинематическая подсистема, т. е. составляющая энергетической подсистемы, воспроизводящая механическое воздействие, совмещена с кинематической подсистемой. Эффективность рассмотренного способа еще более возрастает при дополнении его четвертым видом воздействия на заготовку – вибрационным. Естественно, энергетическая подсистема способа в этом случае усложнится, так как в ее структуру необходимо дополнительно ввести еще одну составляющую.

Таким образом, рассмотренные примеры S-систем из различных областей формообразующей обработки в своей структуре обязательно имеют энергетическую подсистему, каждая структурная составляющая которой воспроизводит какое-то первичное воздействие на вещество твердого тела.

Независимо от конструкций устройств, реализующих энергетическую подсистему S-систем в конкретных технологических машинах, все структурные составляющие можно разделить на две группы. Первая содержит энергетические составляющие, функции структуры которых переданы отдельным структурам кинематической подсистемы. Как правило, составляющие кинематической подсистемы являются также составляющей энергетической подсистемы, осуществляющей механическое воздействие на вещество заготовки.

Естественно, такое совмещение упрощает энергетическую подсистему и всю S-систему в целом. Вторая группа включает энергетические составляющие, функции которых не переданы составляющим других подсистем S-системы. Следовательно, чем больше в энергетической подсистеме составляющих, функция которых перенесена в другие подсистемы, тем она проще и наоборот. Это позволяет для оценки сложности энергетической подсистемы ввести критерий сложности, который будем определять как общее количество составляющих энергетической подсистемы, функции которых не переданы другим подсистемам:

$$C_э = \bigcup_{v=1}^p {}^эM_v,$$

где $C_э$ – критерий сложности энергетической подсистемы;

эM_v – составляющая энергетической подсистемы, функция которой не передана другой подсистеме.

Из определения понятия критерия сложности энергетической подсистемы следует, что минимальное значение этого критерия равно нулю. В частности, способы обработки, схемы которых приведены на рис. 3.8 характеризуются нулевым коэффициентом сложности энергетической подсистемы. Коэффициент сложности энергетической подсистемы способов обработки, схемы которых приведены на рис. 4.6 – 4.9 соответственно равен единице, нулю, единице, двум (трем). Максимальное значение критерия сложности энергетической подсистемы может быть равно количеству первичных воздействий на твердое тело.

Из определения понятия критерия сложности энергетической подсистемы выводится единственный путь ее упрощения, заключающийся в передаче функций отдельных составляющих или подсистемы в целом другим подсистемам S-системы.

В практике формообразующей обработки возможны S-системы, в которых энергетическая подсистема параллельно выполняет функцию других подсистем. Поясним это на примере способа получения изделий из расплава в управляемом электромагнитном поле. В такой S-системе электромагнитное поле наделено функцией характеристического образа, т. е. является инструментом, посредством которого воздействуют на вещество расплава. Поле обеспечивает базирование заготовки расплава и процесс формообразования. Следовательно, энергетическая подсистема рассматриваемой S-системы одновременно выполняет функцию еще двух подсистем: базирующей и кинематической. Такой способ имеет простейшую структуру. Можно предположить, что S-системы, подобные данной, в будущем будут широко использоваться в промышленности. К этой группе S-систем можно отнести способы, в которых используется эффект гальванопластики.

Функцию энергетической подсистемы на основании приведенных примеров, охватывающих в наиболее общем виде все возможные варианты воздействия на твердое тело, можно представить множеством:

$${}^3F = \{\{T_i\}, \{\Gamma_q\}, \{\eta\}, \{C_j\}\},$$

где 3F – функция энергетической подсистемы;

$\{T_i\}$ – конечное множество составляющих энергетической подсистемы;

$\{\Gamma_q\}$ – обобщенный параметр состояний каждой компоненты внутренней среды;

$\{\eta\}$ – конечное множество уровней состояния каждой компоненты;

$\{C_j\}$ – конечное множество отношений между составляющими энергетической подсистемы и другими подсистемами S-системы.

Обобщенный параметр состояний компоненты внутренней среды есть вектор $\Gamma_q = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_q)$, составляющие которого – мощность, интенсивность, форма, длительность воздействия на твердое тело и другие частные параметры компоненты, задаваемые формулой способа формообразующей обработки.

4.5. Методика описания подсистемы стабилизации силового воздействия

Среди известных S-систем относительно небольшую группу составляют способы формообразующей обработки, структура которых содержит подсистему стабилизации силового воздействия посредством устранения влияния случайных факторов в процессе резания. К этим факторам относятся непостоянство припуска и микротвердости заготовки от среза к срезу в зоне контакта резец – заготовка. Будем называть эту зону средой резания, или в общем случае – средой силового воздействия. Силовое воздействие может регистрироваться в виде силы резания, крутящего момента или мощности резания. А стабилизировать силовое воздействие можно посредством изменения подачи или скорости резания в противофазе с изменением этого воздействия. Отсюда следует, что среда резания является источником информации и энергии для подсистемы стабилизации силового воздействия. В свою очередь подсистема стабилизации силового воздействия является источником информации для кинематической подсистемы. Это позволяет утверждать, что рассматриваемая подсистема пересекается с энергетической и кинематической подсистемами.

Структура подсистема стабилизации силового воздействия есть объединение информационного и энергетического комплексов:

$${}^c M_i = J_i \cup E_i,$$

где J_i и E_i – соответственно информационный и энергетический комплексы подсистемы стабилизации силового параметра.

Функцию этой подсистемы представим в виде множества:

$${}^c F_i = \{\{L_k\}, \{Q_g\}\},$$

где L_k – конечное множество отношений с другими подсистемами;

Q_g – обобщенный параметр состояния среды силового воздействия.

Обобщенный параметр состояния среды силового воздействия есть вектор $Q_g = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_q)$, составляющие которого – мощность, интенсивность, быстродействие и другие частные параметры компоненты, задаваемые формулой способа формообразующей обработки.

Функция подсистемы стабилизации силового воздействия не передается другим подсистемам S-систем. Следовательно, коэффициент сложности этой подсистемы равен $C_C = 1$.

Информация, вырабатываемая подсистемой стабилизации силового воздействия, сообщается структурным составляющим кинематической подсистемы, осуществляющими формообразующие движения скорости резания или подачи. Принципиальное значение при этом имеет выбор структурной составляющей кинематической подсистемы, для которой подсистема стабилизации силового воздействия является источником информации. Рассмотрим это обстоятельство на конкретных примерах.

Как известно способ точения цилиндрической поверхности (класс воспроизведения поверхности $H^C - H^C$), рассмотренный ранее (рис. 2.5), содержит две формообразующие группы:

- простую (элементарную) структурную составляющую скорости резания $\Phi_V(B_1)$, воспроизводящую образующую (окружность);
- простую (элементарную) структурную составляющую подачи $\Phi_S(\Pi_2)$, воспроизводящую направляющую (прямую, параллельную оси обрабатываемой поверхности).

В этом случае при включении в рассматриваемый способ подсистемы стабилизации силового воздействия она может быть источником информации для любой из названных структурных составляющих кинематической подсистемы. Однако предпочтительнее составляющая $\Phi_S(\Pi_2)$, так как сила резания более чувствительна к изменению подачи.

Способ нарезания резьбы фасонным резцом (класс образования винтовой поверхности $E - H^C$), рассмотренный ранее (рис. 4.1), содержит в кинематической подсистеме только сложную двухэлементарную структурную составляющую $\Phi_V(B_1\Pi_2)$, воспроизводящую направляющую (винтовую линию). В этом случае подсистема стабилизации силового воздействия является источником информации для названной структурной составляющей кинематической подсистемы.

На первом наиболее общем уровне разбиения способ точения и способ нарезания резьбы как не содержащие, так и содержащие подсистему стабилизации силового воздействия как S-системы представляют собой одинаковые множества. В частности оба рассматриваемых способа, содержащие подсистему стабилизации силового воздействия, т. е. с адаптивным предельным регулированием, на первом уровне есть множества:

$${}_1S = ({}^K M \cap {}^3 M \cap {}^C M) \cup {}^B M.$$

В тоже время их функциональное описание на этом же уровне различно. Функция способа точения цилиндрической поверхности с адаптивным предельным регулированием есть множество:

$${}_1F_S = \{1\}_1, H^C - H^C, \{[{}^K M_O \cup ({}^K M_H \cap {}^C M)] \cap {}^Э M\} \cup {}^B M.$$

А функция способа нарезания резьбы фасонным резцом с адаптивным управлением есть множество:

$${}_1F_S = \{E\}_1, E - H^C, \{({}^K M_H \cap {}^C M) \cap {}^Э M\} \cup {}^B M.$$

Металлорежущие станки, как правило, содержат несколько частных кинематических структур, каждая из которых реализует конкретный способ формообразующей обработки. Например, современные токарные станки с ЧПУ содержат, как правило, винторезную структуру. При оснащении таких станков системами адаптивного предельного регулирования используют оба рассмотренных способа со стабилизацией силового воздействия. Первый из них реализуется в структуре токарной обработки, а второй – в винторезной структуре, т. е. в структуре нарезания резьбы.

4.6. Примеры системного описания способов формообразующей обработки

Представление способов формообразующей обработки в виде объединенных общей первообразной целью четырех подсистем – кинематической, базирующей, энергетической и стабилизирующей силовое воздействие, каждая из которых наделена собственной функцией, носит всеобщий характер, так как базируется на наиболее общих принципах организации и развития технических систем. Изложенные методики системного описания подсистем, составляющих любую S-систему, носят также всеобщий характер. Это подтверждается рассмотренными примерами, взятыми из различных областей формообразующей обработки. Вместе с тем следует отметить, что развитость подсистем зависит от области обработки, к которой принадлежит S-система. Так, например, для способов формообразующей обработки, основанных на механическом резании, характерна высокая развитость кинематической подсистемы и практически незначительная энергетической, что объясняется исключительно большим разнообразием поверхностей, используемых в производственной практике, и широким применением материалов, относительно легко поддающихся резанию без дополнительных воздействий. Однако в связи с появлением труднообрабатываемых материалов во все больших масштабах применяется резание с наложением дополнительных воздействий. Причем во многих таких способах механическое резание выполняет вспомогательную функцию.

Этот закономерный процесс ведет к развитию энергетической подсистемы в способах механического резания. Можно предположить, что по мере развития таких способов будет сделан переход от использования дополнительных воздействий, характеризующихся единственным уровнем обобщенного параметра состояния воздействия, к многоуровневому, как, например, при термической обработке.

Способы, основанные на использовании физических явлений, характеризуются, наоборот, высокой развитостью энергетической подсистемы и незначительной развитостью кинематической. Особенно это относится к способам, где применяются управляемые физические явления для непосредственного образования заданных поверхностей. Например, в способе получения деталей из расплава в управляемом электромагнитном поле функция кинематической подсистемы передана энергетической. Естественно, энергетическая подсистема такого способа весьма развита.

В способах формообразующей обработки менее развита базирующая подсистема. Это можно объяснить тем, что для большинства способов не оговариваются габариты обрабатываемых заготовок и, как следствие, схема базирования, т. е. базирующая подсистема не может быть задана однозначно при анализе способа. Однако такая неопределенность при описании базирующей подсистемы устраняется в модели функции этой подсистемы. Для базирующей подсистемы характерен принцип ее упрощения за счет полной или частичной передачи функций характеристическому образу инструмента или энергетической подсистеме. Последнее присуще, вероятно, только тем способам обработки, в которых энергетическая подсистема выполняет функцию инструмента и кинематической подсистемы. При описании различных способов формообразующей обработки, особенно в патентных источниках, часто опускают функциональные отношения между отдельными структурными элементами. В ряде случаев это вполне оправдано. Например, не вызывает сомнения отношение между вращением заготовки и зуборезного долбяка или червячной фрезы в известных способах зубообработки. Однако для способов, в которых подобные отношения в явном виде неочевидны, такие пропуски недопустимы, так как существенно снижается информативность и ценность описания. Для подтверждения данного положения рассмотрим конкретные примеры.

На рис. 4.10 приведена схема способа точения поверхностей синусоидального профиля. Радиус-вектор образующей обрабатываемой поверхности описывается выражением:

$$\rho = R - \varepsilon (1 - \cos n\varphi),$$

где ρ – радиус-вектор образующей; R – радиус выступов;
 n – количество выступов; φ – угловой параметр.

Параметр ε характеризует особенности профиля образующей – вогнутость или выпуклость (вогнутость $\leftrightarrow 0 \leftrightarrow$ выпуклость).

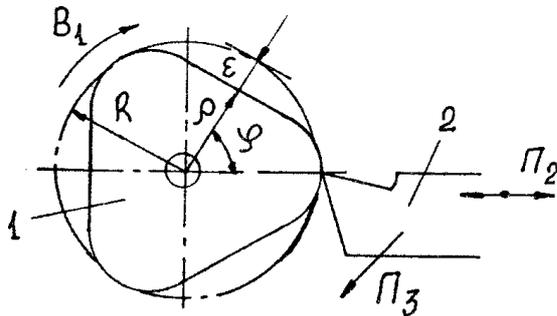


Рис. 4.10. Способ точения синусоидальной поверхности

Процесс получения заданной поверхности по этому способу основан на механическом резании и осуществляется двумя формообразующими движениями: сложным движением скорости резания $\Phi_O(V_1 P_2)$, состоящим из вращения V_1 заготовки 1 и поступательно-возвратного движения P_2 резца 2, и элементарным движением подачи $\Phi_H(P_3)$ резца 2 параллельно оси заготовки. Первое из этих движений

воспроизводит образующую, второе – направляющую. Следует отметить, что две эти составляющие элементарного поступательно-возвратного движения P_2 , входящего в сложное формообразующее движение, участвуют в срезании припуска и, следовательно, используются для воспроизведения профиля обрабатываемой поверхности. Следовательно, траектория сложного движения, воспроизводящего образующую, должна быть задана функцией, известной в станковедении как формула настройки кинематической цепи, определяемая на основе триады:

$$РП \rightarrow УКЦ \rightarrow ФН,$$

где РП – расчетные перемещения исполнительных элементов (движений V_1 и P_2);

УКЦ – уравнение кинематического баланса;

ФН – формула настройки.

В рассматриваемом способе РП имеют вид: 1 оборот заготовки 1 в движении $V_1 \leftrightarrow k$ двойных ходов в движении P_2 ;

$$УКЦ: k = 1 \times i_{B_2 P_2};$$

ФН: $i_{B_1 P_2} = k$, где k – количество выступов (впадин) профиля образующей.

Полученное отношение $i_{B_1 P_2} = f(k)$ учитывается при функциональном описании кинематической подсистемы.

Характеристический образ инструмента $\{1\}_1$, класс образования поверхности $H^C - H^C$.

Кинематическая подсистема и ее функция описываются выражениями: ${}^K M = (J J \cup E)_H^c \cup (J \cup E)_H^c$; ${}^K F = \{\{1\}_1, H^C - H^C, \{\Phi_O(V_1 P_2), \Phi_H(P_3)\}, g = i_{B_1 P_2}\}$. Коэффициент сложности кинематической подсистемы – 5.

Базирующая подсистема относительно выделена, не имеет структурных связей с характеристическим образом инструмента и состоит из трех отдельных баз. Коэффициент сложности этой подсистемы равен 3.

Энергетическая подсистема содержит одну компоненту, которая объединена с кинематической подсистемой. Коэффициент сложности энергетической подсистемы равен нулю.

На рис. 3.8, б показана схема способа планетарного точения по авторскому свидетельству 465274 (SU). По этому способу несколько заготовок 1 устанавливают в шпиндель по кругу. Процесс обработки осуществляют, сообщая заготовкам вращение B_1 вокруг собственных осей и вращение B_2 вокруг шпинделя 2 , а резцу 3 – движение P_3 в направлении продольной подачи.

Таким образом, одним резцом осуществляется обработка за один проход нескольких заготовок. Кроме того, за счет периодического контакта резца с заготовками обеспечивается надежное стружкодробление.

Характеристический образ инструмента $\{1\}_1$. Класс образования поверхности по данному способу $(P - P)$. Причем образующая воспроизводится двумя движениями B_1 и B_2 . Исходя из условия достижения предельно допустимой огранки получаемой поверхности, скорости этих движений должны быть функционально связаны, что вытекает из следующего рассуждения. Для равномерного снятия припуска с заготовки необходимо задать такое соотношение круговых частот вращения заготовки в относительном и переносном движениях, при котором каждый последующий проход будет перекрывать предыдущий (рис. 4.11) на некоторый угол 2ε . За время поворота заготовки в переносном движении B_2 на угол $2\pi - 2\varphi$ срезание припуска не происходит. В этот период в относительном движении B_1 заготовка должна повернуться на угол $2k\pi - 2\varepsilon$, где k – целое число. Тогда уравнение кинематического баланса можно записать в виде:

$$2k\pi - 2\varepsilon = (2\pi - 2\varphi) i_{B_1B_2},$$

где $i_{B_1B_2}$ – искомое отношение.

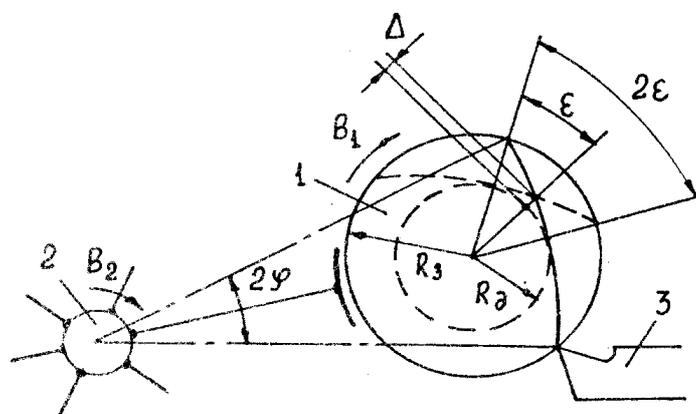


Рис. 4.11. Схема воспроизведения образующей при планетарном точении

Из этого уравнения получим $i_{B_1B_2} = (\kappa\pi - \varepsilon) / (\pi - \varphi)$.

На этом основании можно сделать вывод о том, что элементарные движения B_1 и B_2 образуют сложное формообразующее движение $\Phi_O(B_1B_2)$.

При точении высота получаемой огранки определяется выражением:

$$\Delta = t - R_3 \varepsilon \frac{H \sin \varphi}{\sqrt{R_3^2 - H^2 - \sin \varphi}},$$

где Δ – высота огранки;

R_3 – радиус заготовки;

t – припуск, снимаемый за проход;

H – расстояние между осями вращения заготовки и шпинделя.

Объединяя выражения для $i_{B_1B_2}$ и Δ , после преобразований окончательно получаем:

$$i_{B_1B_2} = \frac{\kappa\pi - (t - \Delta) \sqrt{\frac{1}{H^2 \sin \varphi} - \sqrt{\frac{1}{R_3^2}}}}{\pi - \varphi}.$$

Кинематическая подсистема и ее функция описываются выражениями:

$${}^K M = (JJ \cup E)_O \cup (J \cup E)_H;$$

$${}^K F = \{\{1\}_1, \Pi - \Pi, \{\Phi_O(B_1\Pi_2)i_{B_1\Pi_2}, \Phi_H(\Pi_3)\}, g = i_{B_1B_2}\}.$$

Коэффициент сложности кинематической подсистемы – 5.

Базирующая подсистема относительно выделена, материализация ее составляющих не зависит от характеристического образа инструмента и состоит из $3n$ отдельных баз, где n – количество одновременно обрабатываемых заготовок. Коэффициент сложности этой подсистемы равен $3n$.

Энергетическая подсистема содержит одну компоненту, которая объединена с кинематической подсистемой. Коэффициент сложности энергетической подсистемы равен нулю.

Дальнейшее развитие способ точения при планетарном движении заготовок получил в изобретении по авторскому свидетельству 1604503 (SU).

На рис. 4.12 приведена схема способа фрезерования цилиндрических зубчатых колес с наклонными по делительной окружности зубьями по патенту 6134 (BY). По этому способу заготовку 1 устанавливают в исходное положение относительно червячной фрезы 2. Причем начальное и конечное положение фрезы в движении Π_3 устанавливается с учетом величины

пути L , который складывается из высоты H зубчатого венца заготовки, верхнего K_1 и нижнего K_2 перебегов фрезы. Для воспроизведения линии зуба, являющейся направляющей при нарезании червячной фрезой, на делительном конусе 5 фрезе 2 необходимо сообщать два движения: традиционное для зубофрезерования цилиндрических колес с линией зуба на цилиндре движение Π_3 продольной подачи и дополнительное движение Π_4 , согласованное с движением Π_3 . Причем путь дополнительного движения Π_4 определяется по формуле:

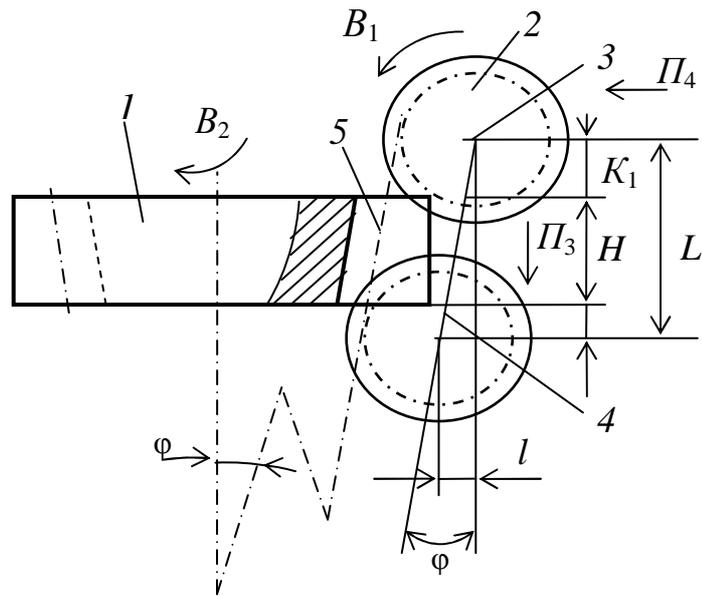


Рис. 4.12. Способ фрезерования зубчатых колес с наклонными зубьями

$$l = L \operatorname{tg} \varphi,$$

где l – путь дополнительного движения Π_4 , мм;

L – путь движения Π_3 , мм;

φ – угол наклона зубьев обрабатываемого колеса, град.

Таким образом, при кинематическом воспроизведении линии зуба на делительном конусе в рассматриваемом способе зубофрезерования линия зуба должна воспроизводиться сложным двухэлементарным движением $\Phi_H(\Pi_3\Pi_4)$ подачи.

При этом движение обката $\Phi_O(B_1B_2)$, воспроизводящее зацепление червячной передачи, остается таким же как у классического способа зубофрезерования червячными фрезами.

Движение B_1 скорости резания и движение Π_3 продольной подачи являются нормируемыми характеристиками процесса зубофрезерования. Согласование движений B_2 и Π_4 с движениями B_1 и Π_3 соответственно осуществляется на основе следующих РП: 1 оборот фрезы в движении $B_1 \rightarrow k/z$ оборота заготовки в движении B_2 ; L мм перемещения фрезы в движении $\Pi_3 \rightarrow l$ мм перемещения фрезы в движении Π_4 , где k – число заходов фрезы; z – число зубьев обрабатываемого колеса.

Второе выражение можно также записать через подачи движений $П_3$ и $П_4$: s_n – фрезы в движении $П_3 \rightarrow s_p$ – фрезы в движении $П_4$, где s_n – продольная подача, мм/об; $s_p = s_n \operatorname{tg}\varphi$ – радиальная подача, мм/об.

При сообщении фрезе и заготовке сложных формообразующих движений $\Phi_O(B_1B_2)$ и $\Phi_H(П_3П_4)$ осуществляется нарезание цилиндрического колеса с наклонными зубьями. При этом движение $\Phi_O(B_1B_2)$ воспроизводит на заготовке профиль зубьев (образующую), а движение $\Phi_H(П_3П_4)$ перемещает ось 3 фрезы по результирующей траектории 4, эквидистантной делительному конусу 5 обрабатываемого колеса.

Характеристический образ инструмента $\{M_3\}_K$, класс образования поверхности $H^K - П$.

Кинематическая подсистема и ее функция описываются выражениями: ${}^K M = (JJ \cup E)_{H^K} \cup (JJ \cup E)_{П}$; ${}^K F = \{\{M_3\}_K, H^K - П, \{\Phi_v(B_1П_2)i_{B_1П_2}, \Phi_s(П_3П_4)i_{П_3П_4}\}, g_1 = i_{B_1П_2}, g_2 = i_{П_3П_4}\}$.

Коэффициент сложности кинематической подсистемы – 6.

Таким образом, использование в данном способе фрезерования цилиндрических зубчатых колес с наклонными зубьями сложного движения для кинематического воспроизведения линии зуба по делительному конусу увеличивает его критерий сложности по сравнению с классическим (базовым) способом. Однако именно это обстоятельство обеспечивает достижение дополнительной цели – получение зубчатых колес с наклонными зубьями.

Базирующая подсистема относительно выделена, не имеет структурных связей с характеристическим образом инструмента и состоит из трех отдельных баз. Коэффициент сложности этой подсистемы равен 3.

Энергетическая подсистема содержит одну компоненту, которая объединена с кинематической подсистемой. Коэффициент сложности энергетической подсистемы равен нулю.

Способы формообразующей обработки по рис. 4.10, 4.11 и 4.12 основаны на использовании механического воздействия инструмента при удалении части материала с заготовки.

Рассмотрим комбинированный способ магнитно-абразивного полирования труднообрабатываемых материалов (рис. 4.13), совмещающий механохимический съем металла и его окислов с обрабатываемой поверхности микрорезанием, а также сглаживание микронеровностей посредством их пластического деформирования зёрнами абразивного порошка в электромагнитном поле [10]. По этому способу заготовку 1 устанавливают по линии центров технологической машины на некотором расстоянии h от смонтированного на суппорте инструмента. С заготовкой контактирует скользящий контакт 2, соединенный посредством электрической цепи с сердечником 4 электромагнита 3.

В качестве инструмента используется абразивный сектор 5, состоящий из ферропорошка и связующего вещества, функцию которого выполняет физическое явление – магнитное поле в зазоре сердечник 4 – заготовка 1. Компенсация расхода ферропорошка в процессе полирования обеспечивается дозатором 6, смонтированным на суппорте. Следовательно, можно утверждать, что абразивный сектор 5, образуемый в процессе функционирования посредством магнитного поля, по существу, представляет собой инструментальную подсистему рассматриваемого способа. А компенсация расхода ферропорошка в процессе полирования – это аналог износа традиционного абразивного инструмента при шлифовании. Уместно отметить, что компенсация износа традиционного абразивного инструмента осуществляется посредством периодической, статической поднастройки его положения относительно обрабатываемой заготовки. При обработке ряда деталей, например при шлифовании зубчатых колес, такая поднастройка сопровождается правкой инструмента.

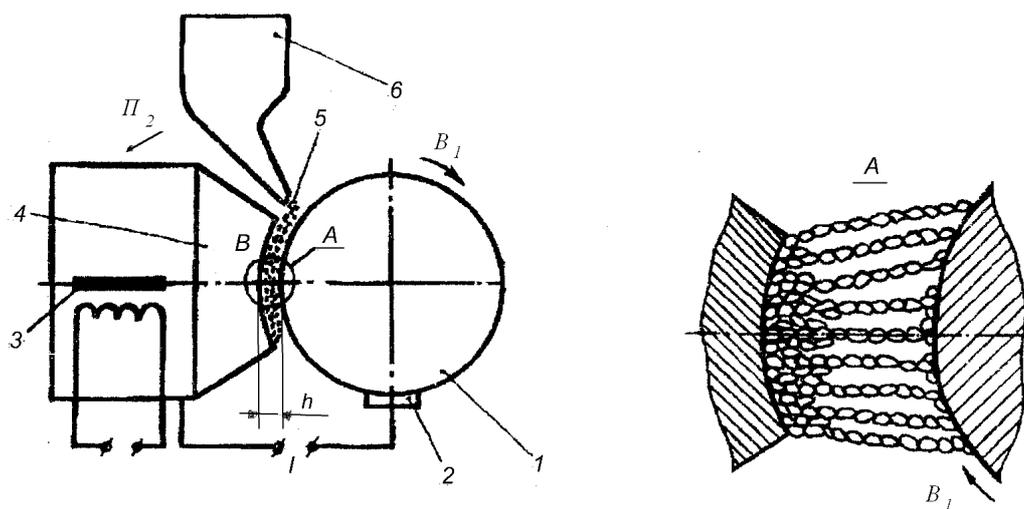


Рис. 4.13. Способ магнитно-абразивного полирования

Вспомогательный элемент режущего инструмента представляет собой некоторую выпуклую поверхность, адекватную вспомогательному элементу полюсного наконечника 4. Следовательно, характеристический образ инструмента $\{E \times E\}_j$, где j – количество вспомогательных элементов. В рассматриваемом способе полирования $j = 1$.

Таким образом, можно утверждать, что на первом уровне декомпозиции структура, рассматриваемого способа магнитно-абразивного полирования представляет собой множество:

$${}_1S_S = \{ {}^K M \cap {}^{\exists 1} M, {}^{\exists 2} M, {}^I M, {}^B M^{1-6} \},$$

где ${}^I M$ – инструментальная подсистема.

Инструментальная подсистема содержит одну компоненту. Ее функция не передается другим подсистемам рассматриваемого способа. Следовательно, коэффициент сложности инструментальной подсистемы $C_{II} = 1$.

Начальные условия процесса полирования определяются подачей в зону обработки смазочно-охлаждающей жидкости, например, 50 %-ый раствор эмульсола Э2 в воде. В данном случае этот раствор является носителем поверхностно-активных веществ, обеспечивающих возникновение электролиза в зоне обработки, в ходе которого расплавляется поверхностный слой полируемой детали.

При обработке заготовки сообщают вращательное движение B_1 , а суппорту продольную подачу P_2 . Одновременно включают электрическую цепь скользящий контакт 2 – сердечник 4 электромагнита 3. Под воздействием постоянного магнитного поля плотность зерен ферропорошка увеличивается, и они прижимаются к вращающейся обрабатываемой поверхности. Процесс обработки основан на использовании двух видов первичного воздействия: механического и электрохимического.

В процессе полирования сравнительно большие микровыступы зерна ферропорошка контактируют с обрабатываемой поверхностью по вершинам гребешков, являющихся концентраторами силовых линий магнитного поля. В результате обработка производится постоянно обновляющимися острыми кромками при самоориентации зерен свободного абразива. При этом процесс микрорезания сопровождается пластическим выглаживанием микронеровностей.

Управляя параметрами обработки: скоростью резания (движение B_1), подачей (движение P_2), силой тока I , и магнитной индукцией B в рабочем зазоре заготовка 1 – полюсный наконечник 4 можно управлять производительностью и формированием геометрических характеристик и физико-механических параметров поверхностного слоя совместными действиями абразивного микрорезания, пластического выглаживания микронеровностей, химических реакций активных веществ в зоне полирования, электрохимического воздействия и магнитных явлений. В первоисточнике отмечается: «Изменения физико-механических параметров упрочнения поверхностного слоя, в отличие от геометрических характеристик качества, резко увеличивается с ростом магнитной индукции B . Это происходит, потому что величиной B определяется количество абразивных зерен, формирующих поверхность. Однако, повышение рациональных значений $B = 1,1 \dots 1,3$ Тл приводит к увеличению жесткости и снижению проницаемости для смазывающей жидкости плотной массы магнитно-абразивного порошка. В результате повышается давление порошка на обрабатываемую поверхность и происходит переход от преоб-

ладающего микрорезания к выглаживанию. Это приводит к увеличению трения и соответственно тепловыделения в зоне обработки, что стимулирует развитие в поверхностном слое растягивающих напряжений, препятствует дроблению блоков мозаики, не дает возможность сформироваться деформационным структурам и разупрочняет поверхность». На основании данного тезиса, являющегося результатом осмысления результатов экспериментальных данных, можно сделать вывод о том, что магнитное поле, выполняющее функцию связки в абразивном инструменте, не используется непосредственно для первичного воздействия на обрабатываемую поверхность. Изменение индукции магнитного поля, т. е. связки, приводит к изменению внутренней структуры инструмента, и как следствие, к изменению его жесткости.

При отображении на обрабатываемую поверхность характеристический образ инструмента покрывает часть этой поверхности. Это позволяет сделать вывод о том, что класс образования поверхности при магнитно-абразивном полировании получен посредством повышающего комбинирования (K_n) основного класса $H^C - H^C$, т. е. представляет собой подкласс $H^C * E - H^C * E$.

Рассматриваемый способ включает простейшую кинематическую подсистему, идентичную соответствующей подсистеме классического способа точения цилиндрических поверхностей. Эта подсистема и ее функция описываются выражениями: ${}^K M = (J \cup E)_O \cup (J \cup E)_H$; ${}^K F = \{ \{E \times E\}, H^C * E - H^C * E, \{ \Phi_O(B_1), \Phi_H(\Pi_2) \} \}$.

Коэффициент сложности кинематической подсистемы – 4.

Инструментальная подсистема относительно выделена и содержит одну компоненту, функция которой не передана другим компонентам. Коэффициент сложности этой подсистемы – 1.

Базирующая подсистема относительно выделена, материализация ее составляющих не зависит от характеристического образа инструмента и состоит из трех отдельных баз. Коэффициент сложности этой подсистемы равен 3.

Энергетическая подсистема относительно выделена и содержит две компоненты:

$${}^{\mathcal{E}} M = \{ {}^{\mathcal{E}1} M, {}^{\mathcal{E}2} M \},$$

где ${}^{\mathcal{E}} M$ – энергетическая подсистема;

${}^{\mathcal{E}1} M$ – механическая компонента, обеспечивающая микрорезание и пластическое выглаживание поверхности;

${}^{\mathcal{E}2} M$ – электрическая компонента (электрическое поле), осуществляющая электрохимическое воздействие на поверхностный слой детали.

Механическая компонента энергетической подсистемы совмещена (пересекается) с кинематической подсистемой. Обобщенный параметр состояния электрохимической компоненты определяется силой тока и параметрами рабочей смазывающе-охлаждающей жидкости – адгезией, химической активностью и др. Коэффициент сложности энергетической подсистемы равен 2.

Рассмотрим способ плазменной лазерной наплавки, основанный на прибавлении вещества к заготовке. По этому способу (рис. 4.14) заготовку 1 устанавливают в шпиндель технологической машины по линии центров под смонтированными на суппорте источником лазерного луча 2 и питателем 3 газопорошковой смеси. Затем заготовке сообщают вращательное движение V_1 , а суппорту продольную подачу Π_2 . Одновременно с движением подачи на

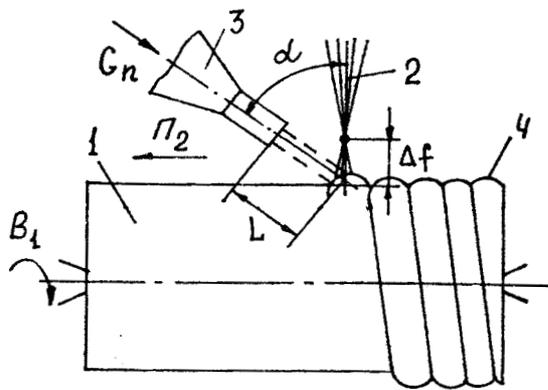


Рис. 4.14. Способ плазменной лазерной наплавки

поверхность заготовки направляют луч лазера и поток газопорошковой смеси. Этот поток под воздействием лазерного луча переходит в жидкое состояние и наплавляется на заготовку в виде спирального валика. На процесс формирования валика оказывают влияние коэффициент Δf фокусировки луча и параметры G_n , L , α , подачи газопорошковой смеси. Рекомендуемая скорость формообразования (геометрическая сумма векторов скоростей движений V_1 и Π_2) равна 8,3 – 50 мм/сек.

Функцию инструмента выполняет луч лазера ($P = \{E\}_1$), расплавляющий газопорошковую смесь (прибавляемое вещество). Класс образования поверхности – непрерывный при скольжении, т. е. $H^C - H^C$.

Способ включает простейшую кинематическую подсистему, идентичную соответствующей подсистеме классического способа точения цилиндрических поверхностей. Эта подсистема и ее функция описываются выражениями: ${}^K M = (J \cup E)_O \cup (J \cup E)_H$; ${}^K F = \{\{E\}_1, H^C - H^C, \{\Phi_O(V_1), \Phi_H(\Pi_2)\}\}$.

Коэффициент сложности кинематической подсистемы – 4.

Базирующая подсистема относительно выделена, материализация ее составляющих не зависит от характеристического образа инструмента и состоит из трех отдельных баз. Коэффициент сложности этой подсистемы равен 3.

Энергетическая подсистема относительно выделена и содержит три компоненты:

$${}^{\mathfrak{E}}M = \{ {}^{\mathfrak{E}1}M, {}^{\mathfrak{E}2}M, {}^{\mathfrak{E}3}M \},$$

где ${}^{\mathfrak{E}}M$ – энергетическая подсистема;

${}^{\mathfrak{E}1}M$ – компонента, перемещающая наплавленный валик по поверхности заготовки;

${}^{\mathfrak{E}2}M$ – компонента, образующая газопорошковую смесь;

${}^{\mathfrak{E}3}M$ – компонента, воспроизводящая лазерный луч.

Первая компонента энергетической подсистемы совмещена (пересекается) с кинематической подсистемой. Обобщенный параметр состояния второй компоненты определяется проходным сечением питателя и давлением газа при формировании потока газопорошковой смеси. Аналогичный параметр третьей компоненты определяется в основном мощностью, интенсивностью и коэффициентом фокусировки луча лазера.

В заключение раздела в табл. 4.4 приведены математические модели некоторых рассмотренных S-систем на первом иерархическом уровне разбиения. Здесь же указаны обобщенные критерии их сложности.

Таблица 4.4

Структура рассмотренных S-систем на первом уровне разбиения

Рис.	Модель S-системы на первом уровне разбиения	Критерий сложности $C_K + C_{\bar{\sigma}} + C_{\mathfrak{E}}$
1	2	3
2.2	${}_1S_S = \{ {}^K M \cap {}^{\mathfrak{E}1}M, {}^{\mathfrak{E}2}M, {}^B M^{1-6} \}$	2+3+1=6
2.3	${}_1S_S = \{ {}^K M \cap {}^{\mathfrak{E}}M, {}^B M^{1-6} \}$	5+3+0+10
2.4	${}_1S_S = \{ {}^K M \cap {}^{\mathfrak{E}1}M, {}^{\mathfrak{E}2}M, {}^B M^{1-6} \}$	2+3+1=6
2.5	${}_1S_S = \{ {}^K M \cap {}^{\mathfrak{E}}M, {}^B M^{1-6} \}$	4+3+0=7
3.8, <i>p</i>	${}_1S_S = \{ {}^K M \cap {}^{\mathfrak{E}}M, {}^B M^{1-6} \cap P \}$	2+0+0=2
3.8, <i>б</i>	${}_1S_S = \{ {}^K M \cap {}^{\mathfrak{E}}M, \left\{ \sum_{i=1}^n ({}^B M^{1-6})_i \right\} \}$	$n+n+0=2n$
4.1	${}_1S_S = \{ {}^K M \cap {}^{\mathfrak{E}}M, {}^B M^{1-6} \}$	3+3+0=6
4.2	${}_1S_S = \{ {}^K M \cap {}^{\mathfrak{E}}M, {}^B M^{1-6} \cap P \}$	2+0+0=2
4.6	${}_1S_S = \{ {}^K M \cap {}^{\mathfrak{E}}M, {}^B M^{1-4} \cap P, {}^B M^5 \}$	2+1+0=3
4.7	${}_1S_S = \{ {}^K M \cap {}^{\mathfrak{E}1}M, {}^{\mathfrak{E}2}M, {}^B M^{1-6} \}$	4+3+1=8
4.9	${}_1S_S = \{ {}^K M \cap {}^{\mathfrak{E}1}M \cap {}^{\mathfrak{E}2}M, {}^B M^{1-6} \}$	6+3+0=9
4.9	${}_1S_S = \{ {}^K M \cap {}^{\mathfrak{E}1}M, {}^{\mathfrak{E}2}M, {}^{\mathfrak{E}3}M, {}^B M^{1-6} \}$	4+3+2=9
4.10	${}_1S_S = \{ {}^K M \cap {}^{\mathfrak{E}}M, {}^B M^{1-6} \}$	5+3+0=8

Продолжение таблицы 4.4

Рис.	Модель S-системы на первом уровне разбиения	Критерий сложности $C_k+C_{\bar{\sigma}}+C_{\varepsilon}$
4.12	${}_1S_S = \{ {}^K M \cap {}^{\varepsilon} M, {}^B M^{1-6} \}$	5+3+0=8
4.15	${}_1S_S = \{ {}^K M \cap {}^{\varepsilon_1} M, {}^{\varepsilon_2} M, {}^{\varepsilon_3} M, {}^B M^{1-6} \}$	4+3+2=9
4.14*	${}_1S_S = \{ {}^K M \cap {}^{\varepsilon_1} M, {}^{\varepsilon_2} M, {}^H M, {}^B M^{1-6} \}$	$C_k+C_{\bar{\sigma}}+C_u+C_{\varepsilon}$
		4+3+1+1=8
		$C_k+C_{\bar{\sigma}}+C_{\varepsilon}+C_c$
1.5**	${}_1S_S = \{ {}^K M \cap {}^{\varepsilon} M \cap {}^C M, {}^B M^{1-6} \}$	4+3+0+1=8
3.1**	${}_1S_S = \{ {}^K M \cap {}^{\varepsilon} M \cap {}^C M, {}^B M^{1-6} \}$	3+3+0+1=7

В данной таблице символом «*» обозначена S-система – способ магнитно-абразивного полирования, содержащий в своей структуре инструментальную подсистему.

Символом «**» обозначены S-системы: способ точения цилиндрической поверхности и способ нарезания резьбы фасонным резцом, содержащие в структуре подсистему стабилизации силового воздействия. Схемы относительных перемещений инструмента и заготовки при точении цилиндрической поверхности и при нарезании резьбы фасонным резцом как для S-систем, не содержащих подсистему стабилизации силового параметра, так и для S-систем, содержащих эту подсистему, неразличимы.

Эффективность рассматриваемого способа возрастает при замене резца резцовой головкой. Ее характеристический образ $\{1\}_k$, где k – число резцов головки.

Одновременно изменяется функция способа, в частности, класс образования поверхности и характер движения, воспроизводящего направляющую.

Класс образования поверхности по прототипу (рис. 2.5) – $H^C - H^C$; по рассматриваемому способу (рис. 5.1) – $\Pi - \Pi$.

Структура и функция кинематической подсистемы:

– по прототипу: ${}^K M = (J \cup E)_O \cup (J \cup E)_H$; ${}^K F = \{\{1\}_1, H^C - H^C, \{\Phi_O(B_1), \Phi_H(\Pi_2)\}\}$.

– по рассматриваемому способу: ${}^K M = ((J \cup E) \wedge (J \cup E))_O \cup (J \cup E)_H$; ${}^K F = \{\{1\}_k, \Pi - \Pi, \{\Phi_O(B_3 \wedge \Pi_2), \Phi_H(B_1)\}\}$.

В последнем выражении составное движение $\Phi_O(B_3 \wedge \Pi_2)$ воспроизводит образующую (прямую) и состоит из двух элементарных движений, выполняемых обязательно одновременно. Каждое из этих элементарных движений осуществляется отдельным кинематическим комплексом. При-

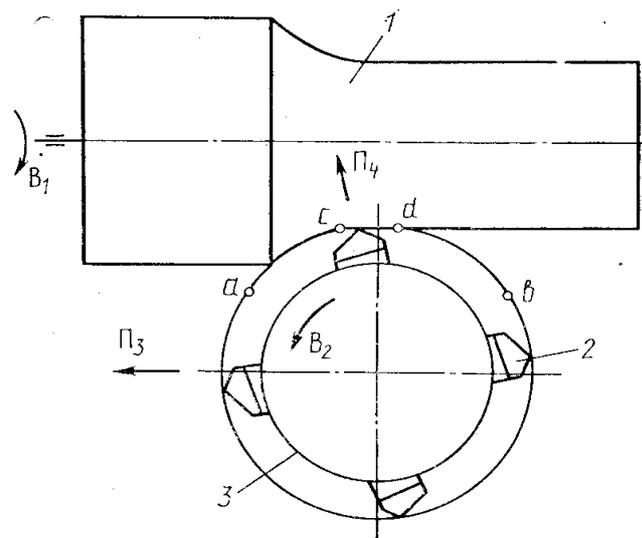


Рис. 5.2. Способ фрезоточения

чем движение B_3 является движением скорости резания, а движение Π_2 – движением подачи. Следовательно, составное движение $\Phi_O(B_3 \wedge \Pi_2)$ – это вектор составляющих его элементарных движений. Движение B_1 является круговой подачей заготовки.

В рассмотренном примере для достижения цели изобретения (обеспечение надежного стружкодробления) была изменена структура кинематической подсистемы исходного способа токарной обработки.

При использовании рассматриваемого способа из-за прерывистого характера резания на прямолинейной образующей получаемой цилиндрической поверхности образуются гребни. Можно устранить этот недостаток, если резцам 2 резцовой головки 3 (или одному из них) по авторскому свидетельству 854593 (SU) сообщать в зоне резания (рис. 5.2) дополнительно перемещение Π_4 в радиальном направлении, связанное с ее вращением B_2 зависимостью:

$$h = R (\sec \varphi - 1),$$

где h – путь радиального перемещения резца; R – радиус вершины резца при $h = 0$; φ – угол поворота резца от плоскости, нормальной оси заготовки.

В этом случае вершины режущих зубьев будут перемещаться на участке cd по прямолинейной образующей, получаемой номинальной поверхностью. А на участках bd и ac будет осуществляться плавный переход от округности к прямой и обратно. В итоге обеспечивается формообразование цилиндрической поверхности с той же точностью, что и при традиционном точении (рис. 2.5).

Автор данного технического решения такую схему обработки называет фрезоточением с модифицированным характеристическим образом инструмента. С позиций системного подхода, рассматриваемого в данной работе, посредством дополнительного движения $П_4$, и его функциональной связи с движением B_2 осуществляется повышающее комбинирование класса образования поверхности при воспроизведении образующей. А также изменяется структура кинематической подсистемы, рассмотренного способа фрезоточения.

Подкласс образования поверхности: $П^H^c - П$.

Структура и функция кинематической подсистемы: ${}^K M = ((J \cup E) \wedge (J \cup E))_O \cup (J \cup E)_H$; ${}^K F = \{ \{1\}_K, П^H^c - П, \{ \Phi_O(B_2 П_4 \wedge П_3), \Phi_S(B_1) \} \}$.

Возможно также изменение структуры других подсистем. Например, одновременно с сообщением резцу (или резцовой головке) вращательного движения на зону обработки можно воздействовать импульсным электростатическим полем, противонаправленным электродвижущей силе собственного поля, синхронизированным с периодами контакта резца с заготовкой. Полученный таким образом способ будет отличаться от предшествующего двухкомпонентной энергетической подсистемой и правилом осуществления дополнительного энергетического воздействия. Такое целенаправленное изменение структуры энергетической подсистемы обеспечивает повышение размерной стойкости инструмента.

Рассмотренные примеры создания новых способов формообразующей обработки основаны на целенаправленном усложнении структуры и функции исходного способа – прототипа. Возможно и целенаправленное упрощение исходного способа, в результате которого могут быть получены новые технические решения. Пути их поиска на этой основе сводятся к частичной или полной передаче функций базирующей подсистемы характеристическому образу инструмента или энергетической подсистеме, в совмещении кинематической подсистемой функций отдельных составляющих энергетической подсистемы или в полном совмещении в энергетической подсистеме функций всех трех подсистем способа.

В настоящее время значительное развитие получают комбинированные способы формообразующей обработки, создаваемые вследствие комбинирования различных видов механического, физического и химического

воздействия на твердое тело. Некоторые из них были рассмотрены ранее. В теории и практике формообразующей обработки возможны также и другие пути, основанные на иных принципах. Например, принцип поиска, основанный на согласовании ритмов физического воздействия, принцип поиска на основе совмещения обработки нескольких заготовок одним инструментом или набором различных инструментов. Принцип поиска, основанный на совмещении формообразующих и вспомогательных движений и принцип поиска, основанный на совмещении обработки с транспортированием.

Рассмотренные принципы поиска новых способов формообразующей обработки носят всеобщий характер. Например, принцип целенаправленного изменения совокупности приемов способа обработки широко используется исследователями на интуитивном уровне. Такой принцип, как комбинирование на основе дополнительных физических полей и потоков энергии при механической обработке резанием, получил распространение преимущественно в последние годы. В основу его развития положен перебор возможных вариантов и отбор тех, которые отвечают требованиям поставленной задачи. Принципы изменения последовательности приемов и правил выполнения приемов широко применяются в химико-термической обработке, а в формообразующей, особенно в резании, крайне ограничено.

Некоторые принципы, например, принцип согласования ритмов формообразующих движений и ритмов физических воздействий на твердое тело, вообще не нашли широкого применения, а принцип совмещения обработки нескольких заготовок одним инструментом при достижении нового эффекта используется редко.

Естественно, при поиске новых способов обработки возможно одновременное последовательное применение нескольких общих принципов. Ниже рассмотрим более подробное использование некоторых общих принципов на конкретных примерах способов формообразующей обработки.

5.2. Принцип совмещения обработки нескольких заготовок

В практике металлообработки, особенно в крупносерийном и массовом производствах, совместная обработка нескольких заготовок одним инструментом или набором различных инструментов используется достаточно широко. Известны два подхода при материализации этого принципа: технологический и конструкторский. При технологическом варианте способ формообразующей обработки по своей структуре и функции неизменный. Одновременная обработка нескольких заготовок обеспечивается за счет их набора на общее базирующее приспособление. Например, таким

образом обрабатывают пакеты цилиндрических зубчатых колес одной фрезой на зубофрезерных станках. Одновременная обработка нескольких заготовок может осуществляться также набором режущих инструментов. Например, практикуется обработка двух – четырех зубчатых колес таким же количеством зуборезных долбяков, установленных на некотором расстоянии друг от друга вдоль оправки.

Известны два варианта конструкторского совмещения обработки. По первому варианту при конструкторском совмещении обработки возможна материализация объединения одинаковых способов в одном корпусе. В этом случае первоначальная идея способа остается неизменной, а повышение производительности обеспечивается за счет суммирования производительности объединяемых способов. Примером такого совмещения является материализация объединения нескольких способов обработки в структуре токарных автоматов параллельного действия. При конструкторском совмещении обработки нескольких заготовок возможно также качественное изменение исходного способа, обеспечивающее достижение новой цели. Примером такого совмещения является способ токарной обработки, положенный в основу многошпиндельных токарных автоматов последовательного действия. Для данного совмещения обработки новая производная цель – возможность получения более сложных по конфигурации деталей, чем при совмещении по параллельной схеме.

По второму варианту конструкторского совмещения обработки в структуру способа, а следовательно и технологической машины, вводятся дополнительные базирующие позиции для обрабатываемых заготовок. При таком конструкторском совмещении обработки возможно достижение неожиданного (синергетического) эффекта. Например, при рассмотренном ранее способе планетарного точения (рис. 4.11) таким эффектом является достижение надежного стружкодробления.

По второму варианту конструкторского совмещения предложен ряд относительно новых способов формообразующей обработки двух заготовок одним инструментом. Рассмотрим некоторые из них.

На рис. 5.3 представлен способ одновременного зубодолбления двух колес одним долбяком по авторскому свидетельству 574283 (SU). По этому способу заготовки 1 и 2 устанавливаются симметрично относительно направления врезания с расстоянием h между делительными окружностями, равным делительному диаметру долбяка 3. Затем долбяку 3 сообщают поступательно-возвратное движение V_1 скорости резания и процесс зубодолбления выполняют в два этапа. На первом этапе заготовкам 1 и 2

сообщают движение врезания Π_2 , согласованное с их вращением B_3 в разные стороны, а долбяку 3 и заготовкам 1 и 2 – движение обката (профилирования), состоящее из согласованных вращений B_4 долбяка и вращения B_5 заготовок в одну сторону. Этот этап продолжают до тех пор, пока не будет достигнуто врезание долбяка на высоту зуба. После чего движение врезания прекращают и на втором этапе в течение полного оборота заготовок 1 и 2 профилируют зубья движением обката. На обоих этапах обработки заготовкам сообщают движение «отскока» Π_6 , синхронизированное с движением Π_1 для устранения затиранья (обратного резания) долбяка по вершинным режущим кромкам при холостом ходе.

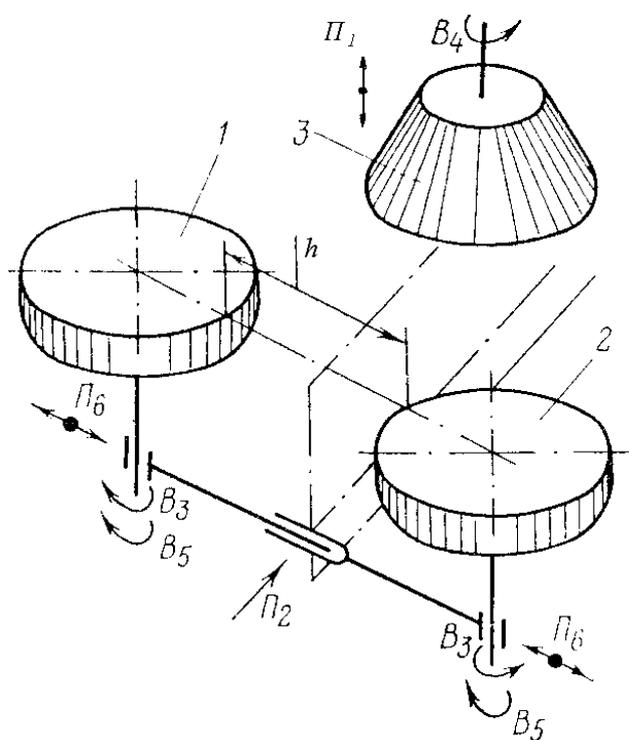


Рис. 5.3. Способ параллельной обработки двух зубчатых колес одним долбяком

Структура рассматриваемого способа зубодолбления одновременно двух колес включает следующие элементы: приемы – установка заготовок 1 и 2, сообщение долбяку 3 движения Π_1 скорости резания, сообщение заготовкам 1 и 2 движения врезания, состоящего из поступательного движения Π_2 и согласованного с ним вращения B_3 заготовок в разные стороны, сообщение заготовкам 1 и 2 и долбяку 3 движения обката (профилирования), состоящего из согласованных вращения B_4 долбяка и вращения B_5 заготовок в одну сторону, сообщение заготовкам движение «отскока» Π_6 ; последовательности

выполнения приемов – сначала установка заготовок, затем сообщение долбяку движения Π_1 , а заготовкам – движения «отскока» Π_6 , после этого одновременно сообщение движений врезания $\Pi_2 B_3$ и обката $B_4 B_5$, наконец, после завершения врезания на высоту зуба прекращение движения $\Pi_2 B_3$; правила выполнения отдельных приемов – определенность установки (базирования) заготовок относительно направления врезания, синхронизация движений Π_1 и Π_6 существенно меньшая скорость движения врезания по сравнению со скоростью обката.

Задача, решаемая анализируемым способом обработки – повышение (удвоение) производительности зубообработки по сравнению с прототипом (рис. 2.6).

Этот способ как S-система отличается от прототипа по структуре и функции. Математическая модель кинематической подсистемы способа есть множество ${}^K M = (J \cup E)_O \cup 2(JJ \cup E)_H \cup (JJ \cup E)_{Bp} \cup 2(J \cup E)_{Bc}$.

Таким образом, кинематическая подсистема по сравнению с прототипом включает две дополнительные структуры, одна из которых воспроизводит профиль зубьев на второй заготовке, другая – ее отскок при холостом ходе долбяка.

Функция кинематической подсистемы есть множество ${}^K F = \{\{M_{\mathcal{E}}\}_K, H^C - H^K, \{\Phi_O(\downarrow\Pi_1), 2\Phi_H(B_4B_5), Bp(\Pi_2B_3), 2Bc(\downarrow\Pi_6)\}\}$.

Критерий сложности кинематической подсистемы равен 16. Базирующая подсистема удваивается, т. е. преобразуется в множество, состоящее из двух одинаковых подмножеств: ${}^6 M = \{\{\bigcup_{i=1}^3 {}^6 M_i\}, \{\bigcup_{i=1}^3 {}^6 M_i\}\}$.

Энергетическая подсистема совмещена с кинематической подсистемой. Критерий сложности этой подсистемы равен 0.

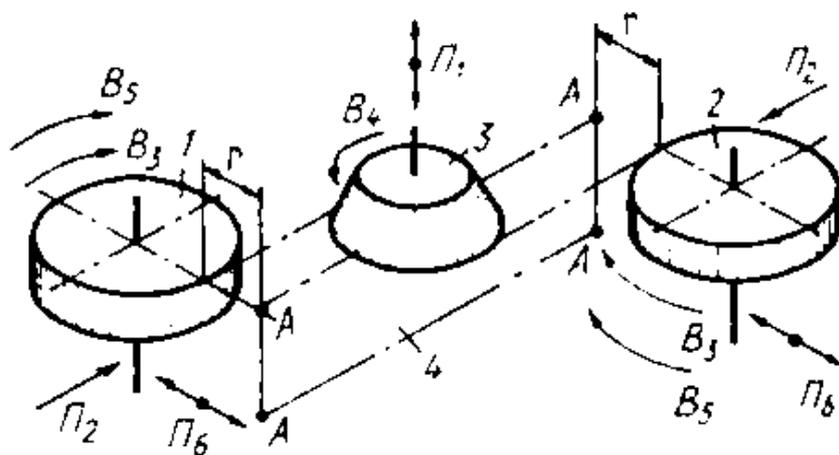


Рис. 5.4. Способ долбления двух зубчатых колес при встречном движении врезания

Характерная особенность рассмотренного способа – неодинаковые условия резания на этапе врезания на обеих заготовках из-за различных суммарных скоростей подачи. Однако это не оказывает принципиального значения на качество получаемых зубчатых колес, так как на этапе профилирования условия резания на обеих заготовках одинаковы. Тем не менее указанный недостаток устранен в следующем способе зубодолбления по авторскому свидетельству 1265017 (SU).

По этому способу (рис. 5.4) заготовки 1 и 2 устанавливаются с противоположных сторон долбяка 3 на расстоянии r от плоскости движения 4 движения врезания, равном половине диаметра делительной окружности долбяка. При обработке долбяку 3 сообщают поступательно-возвратное движение Π_1 скорости резания. На этапе касательного врезания заготовкам 1 и 2 сообщают движения Π_2 навстречу друг другу и одновременно вращательные движения B_3 , согласованные с движениями врезания Π_2 . Этап врезания продолжают до тех пор, пока ось долбяка 3 не совместится с линией $A - A$, что соответствует окончанию врезания на высоту зуба. Затем движения Π_2 и B_3 прекращают, и на втором этапе долбяку и заготовкам сообщают движения обката (профилирования), состоящие из вращения B_4 долбяка, согласованного с вращениями заготовок 1 и 2 в ту же сторону, что и при врезании. На обоих этапах заготовки сообщают также движение «отскока» Π_6 в направлении перпендикулярном плоскости резания.

Данный способ как S-система отличается от предшествующего иным расположением заготовок относительно долбяка. Это обстоятельство является причиной включения в кинематическую подсистему способа дополнительной структурной составляющей для осуществления движения врезания. Таким образом, математическая модель кинематической подсистемы и ее функция есть множества: ${}^K M = (J \cup E)_O \cup 2(JJ \cup E)_H \cup 2(JJ \cup E)_{Bp} \cup 2(J \cup E)_{Bc}$, ${}^K F = \{ \{M_{\Delta}\}_K, H^C - H^K, \{ \Phi_O(\downarrow \Pi_1), 2 \Phi_H(B_4 B_5), 2Bp(\Pi_2 B_3), 2Bc(\downarrow \Pi_6) \} \}$.

Критерий сложности кинематической подсистемы равен 16. Базирующая подсистема, также как и в предшествующем способе, удваивается, т. е. преобразуется во множество, состоящее из двух одинаковых подмножеств:

$${}^{\bar{0}} M = \{ \{ \bigcup_{i=1}^3 {}^{\bar{0}} M_i \}, \{ \bigcup_{i=1}^3 {}^{\bar{0}} M_i \} \}.$$

Энергетическая подсистема совмещена с кинематической подсистемой. Критерий сложности этой подсистемы равен 0.

На рис. 5.5 показан способ зубодолбления с касательным врезанием по авторскому свидетельству 1641533 (SU), позволяющий установку каждой последующей заготовки совместить с обработкой предшествующей. Заготовки 1 и 2 размещают в плоскости, отстоящей от плоскости касательного врезания 3 на расстоянии r , равном половине диаметра делительной окружности долбяка 4. В процессе обработки долбяк совершает поступательно-возвратное движение Π_1 скорости резания и синхронное с ним движение отскока Π_2 в плоскости, перпендикулярной направлению движения врезания. Профилирование заготовки 1 осуществляют согласованными

вращательными движениями B_3 заготовки и B_4 долбяка в течение одного оборота заготовки после прекращения движения врезания. После завершения профилирования заготовки 1 долбяк 4 в движении Π_1 выводят в крайнее верхнее положение, движение B_4 долбяка реверсируют (движение B_4^1), а движение B_3 заготовки 1 прекращают. Затем движением Π_5 на ускоренном ходе (позиционирование) заготовки совместно перемещают в положение, соответствующее исходному для обработки заготовки 2, где движение Π_5 переключают на подачу врезания (рабочий ход), долбяку 4 сообщают движение Π_1 , заготовке 2 – движение B_6 , согласованное с движением Π_5 , и движение B_6^1 , согласованное с движением B_4^1 долбяка 4. Этап врезания продолжают до тех пор, пока ось долбяка 4 не совпадет с линией $B - B$, соответствующей окончанию врезания на высоту зуба нарезаемого колеса. В этом положении движение Π_5 прекращают, одновременно прекращают согласованное с ним движение B_6 заготовки 2, и на втором этапе в течение одного оборота заготовки осуществляют профилирование ее зубьев движением обката, состоящим из согласованных вращательных движений B_4^1 долбяка и B_6^1 заготовки 2.

Во время профилирования заготовки 2 заменяется нарезанное зубчатое колесо новой заготовкой 1.

После завершения профилирования заготовки 2 долбяк выводят в крайнее верхнее положение, движение B_4^1 реверсируют (движение B_4), а движение B_6^1 заготовки 2 прекращают. Затем на ускоренном ходе движением Π_5^1 заготовки перемещают в положение для обработки заготовки 1. В этом положении движение Π_5^1 переключают на подачу врезания, долбяку 4 сообщают движение Π_1 , а заготовке 1 – движение B_3^1 , согласованное с движением Π_5^1 , и движение B_3 , согласованное с движением B_4 долбяка. Этап врезания продолжают до тех пор, пока ось долбяка 4 не совпадет с

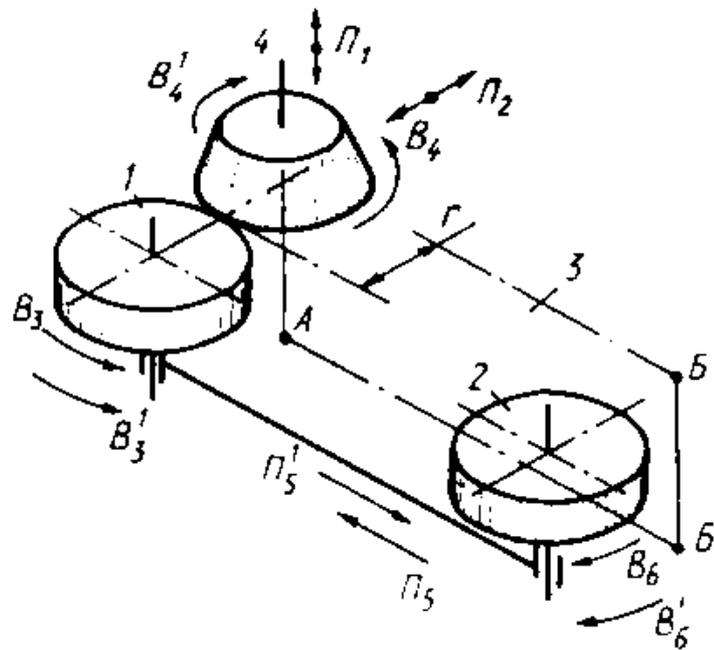


Рис. 5.5. Способ последовательного зубодолбления двух заготовок при касательном врезании

линией $A - A$. В этом положении движение Π_5^1 и согласованное с ним движение B_3^1 заготовки 1 прекращают, и в течение полного оборота заготовки 1 осуществляют профилирование ее зубьев движением обката, состоящим из согласованных вращательных движений B_3 заготовки 1 и B_4 долбяка.

Одновременно на этапе профилирования заготовки 1 устанавливают очередную заготовку 2 вместо обработанной и т. д.

Задача, решаемая данным способом – повышение производительности зубообработки за счет совмещения вспомогательного времени, необходимого для замены нарезанного зубчатого колеса очередной заготовкой, с машинным временем обработки на другой позиции по сравнению с прототипом (рис. 2.6).

Рассмотренный способ как S-система отличается от первообразного (прототипа) по структуре и функции. Составляющая его кинематическая подсистема содержит дополнительную составляющую ${}^K M_{Bp} = JJ \cup E$, функция которой ${}^K F = Bp(\Pi_5^1 B_6^1)$.

Базирующая и энергетическая подсистемы совпадают с соответствующими подсистемами S-систем, представленных на рис. 5.3 и 5.4.

Рассматриваемый принцип используется при обработке и других изделий, например, точение двух заготовок вращающимся круглым резцом по авторскому свидетельству 1127690 (SU), последовательная обработка нескольких заготовок при планетарном точении по авторскому свидетельству 1604503 (SU), одновременная обработка двух червячных колес червячной фрезой по авторскому свидетельству 971596 (SU) и т. д.

5.3. Принцип совмещения формообразующей обработки с транспортированием

Способ зубодолбления при касательном движении врезания (рис. 2.1) является первообразным для группы последующих способов обработки зубчатых колес (рис. 5.3 – 5.5). К этой же группе следует отнести способ зубодолбления по роторной схеме по авторскому свидетельству 1291311 (SU), совмещающий обработку с транспортированием.

Обработка заготовки 1 долбяком 2 по роторной схеме (рис. 5.6) осуществляется при их перемещении по концентрическим окружностям с общим центром O . В течении цикла обработки долбяк 2 , совершающий движение Π_1 скорости резания и движение «отскока» Π_6 , синхронизированное с движением Π_1 (на рис. 5.6 движения Π_1 и Π_6 не показаны), перемещаются относительно центра O с постоянной угловой скоростью движения транспортирования

V_1 и вращается вокруг собственного центра с угловой скоростью V_2 круговой подачи. Угловая скорость заготовки I относительно центра O имеет различные значения. В начальный момент цикла после установки заготовки I в положение E ей сообщают движение позиционирования $V_1 + V_3$, превышающее угловую скорость V_1 транспортирования долбяка на величину угловой скорости V_3 позиционирования.

В результате на участке позиционирования EA заготовка догоняет долбяк с угловой скоростью позиционирования V_3 . На участке касательного врезания AC заготовке сообщают движение V_4 , согласованное с движением V_2 долбяка (согласованные движения V_2 долбяка и V_4 заготовки образуют движение обката V_2V_4), движение касательного врезания $V_1 + V_5$, превышающее угловую скорость V_1 транспортирования долбяка на угловую скорость подачи касательного врезания V_5 (движение V_5 является аналогом прямолинейного движения подачи касательного врезания в первообразном способе по рис. 2.6) и согласованное с движением V_5 дополнительное движение V_6 . Врезание на высоту зуба заканчивается в позиции C , где движения V_5 и V_6 прекращаются. На участке CD заготовка и долбяк относительно центра O перемещаются с одинаковыми угловыми скоростями транспортирования V_1 . На этом участке осуществляют профилирование заготовки движением обката V_2V_4 , которое продолжается в течение одного поворота заготовки вокруг собственного центра. Профилирование заканчивается в позиции D . Здесь долбяк выводят в крайнее верхнее положение в движении V_1 , движение V_4 заготовки прекращают и одновременно ей сообщают движение $V_1 + V_3$, превышающее угловую скорость транспортирования V_1 долбяка относительно центра O на угловую скорость позиционирования V_3 . В итоге на участке DE заготовка уходит от долбяка и при достижении позиции загрузки – выгрузки E останавливается, где производят замену обработанного колеса новой заготовкой. За время смены заготовки долбяк в движении V_1 проходит позицию E и обгоняет заготовку. Затем цикл обработки повторяется.

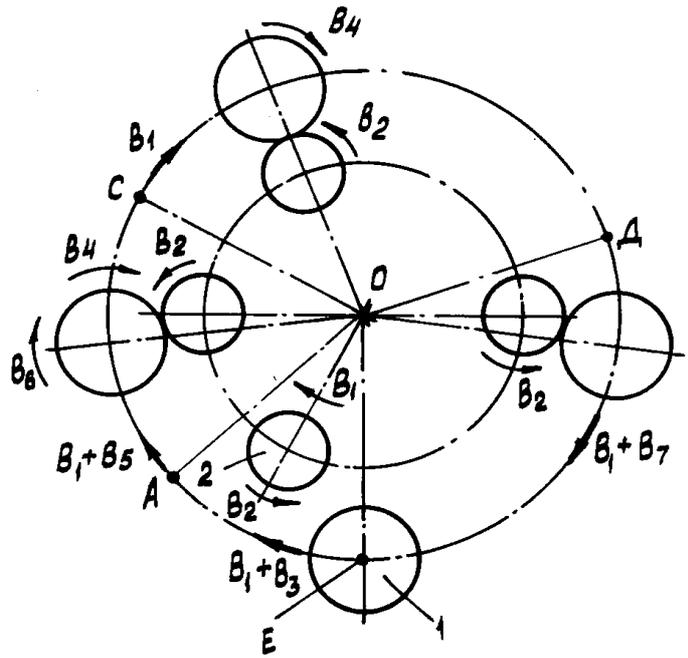


Рис. 5.6. Способ зубодолбления при непрерывном транспортировании пары долбяк – заготовка

Рассмотренный способ позволяет одновременно обрабатывать несколько заготовок за счет последовательного перемещения по концентрическим окружностям относительно центра O нескольких пар долбяк – заготовка. Допустим, например, что приведенная на рис. 5.6 схема является мгновенным положением четырех пар долбяк – заготовка. Тогда можно утверждать, что на позиции E устанавливается очередная заготовка, на участках AC и CD две заготовки проходят зону обработки, а на участке DE еще одна заготовка после окончания ее обработки в позиции D перемещается в зону загрузки – выгрузки E . При увеличении диаметров концентрических окружностей, по которым совместно перемещаются пары долбяк – заготовка, количество таких пар может быть увеличено.

Данный способ при использовании одной пары долбяк – заготовка по производительности равнозначен рассмотренному ранее способу зубодолбления с касательным врезанием (рис. 2.6). Вместе с тем он сложнее, так как содержит в кинематической структуре дополнительную составляющую, осуществляющую транспортирование пары долбяк – заготовка. При использовании n пар данный способ представляет собой совокупность n способов, включающих по одной паре долбяк – заготовка, объединенных общей транспортирующей составляющей кинематической подсистемы. Увеличение производительности в n раз в этом случае обеспечивается за счет объединения n одинаковых способов, а следовательно и зубодолбежных станков с касательным (дуговым) врезанием в одном объекте.

Математическая модель кинематической подсистемы при одной паре долбяк – заготовка есть множество: ${}^K M = (J \cup E)_O \cup (JJ \cup E)_H \cup \{(JJ \cup E)_{Br} \cap (J \cup E)_{Pz}\} \cup (J \cup E)_{Tp} \cup (J \cup E)_{Bc}$.

Функция этой подсистемы: ${}^K F = \{\{M_{\mathcal{E}}\}_K, H^C - H^K, \{\Phi_O(\downarrow\Pi_1), \Phi_H(B_2B_3), Br(B_7B_4), Pz(B_7 + B_8), \wedge Tp(B_7), / Bc(\downarrow\Pi_6)\}\}$.

Коэффициент сложности кинематической подсистемы – 12. Базирующая подсистема есть множество ${}^{\sigma} M = \bigcup_{i=1}^3 {}^{\sigma} M_i$.

Функцию энергетической подсистемы выполняет кинематическая подсистема.

Математическая модель кинематической подсистемы при n пар долбяк – заготовка есть множество ${}^K M = n \{(J \cup E)_O \cup (JJ \cup E)_H \cup \{(JJ \cup E)_{Br} \cap (J \cup E)_{Pz}\}\} \cup (J \cup E)_{Tp} \cup n (J \cup E)_{Bc}$.

Функция этой подсистемы: ${}^K F = \{n \{M_{\mathcal{E}}\}_K, H^C - H^K, n \{\Phi_O(\downarrow\Pi_1), \Phi_H(B_2B_3), Br(B_7B_4), Pz(B_7+B_8)\}, \wedge Tp(B_7), /n \{Bc(\downarrow\Pi_6)\}\}$.

Коэффициент сложности кинематической подсистемы: $12n + 1$. Базирующая подсистема есть произведение n одинаковых множеств:

$$\bar{M} = n \left\{ \bigcup_{i=1}^3 \bar{M}_i \right\}.$$

Рассмотренный способ зубодолбления при непрерывном транспортировании n пар долбяк – заготовка создает условия для последовательно-параллельной обработки зубчатых колес. Следует также отметить, что этот способ открывает возможность создания абсолютно нового по компоновке роторного зубодолбежного станка.

5.4. Принцип изменения правил выполнения приемов

Принцип изменения правил выполнения отдельных приемов широко распространен при различных видах обработки, в том числе формообразующей для достижения конкретных целей. Например, для обеспечения стабильности или оптимизации процесса повышение качества поверхностного слоя или прочности соединения прибавляемого материала с основным материалом твердого тела, снижения размерного износа инструмента или энергоемкости процесса. Характерная особенность S-систем, полученных на основе этого принципа, – изменение обобщенного параметра состояния компонент внутренней среды первообразного способа. Примерами таких S-систем могут служить способ соединения двух керамических материалов по авторскому свидетельству 827255 (SU), способ электроэрозионной обработки по авторскому свидетельству 848235 (SU), способ электронно-лучевой обработки по авторскому свидетельству 844184 (SU), способ электрохимического шлифования по авторскому свидетельству 833413 (SU) и др.

Менее распространен принцип изменения правил выполнения приемов в формообразующей обработке посредством механического резания. Рассмотрим возможности его применения в области обкатного зубодолбления.

Выше были рассмотрены три первообразных способа: зубодолбление при радиальном врезании (рис. 2.1), при касательном врезании (рис. 2.6) и зубодолбление по роторной схеме (рис. 5.6). Дальнейшее развитие процесса зубодолбления идет в направлении введения в структуру первообразных способов дополнительных приемов и изменения правил выполнения отдельных приемов этих способов. При этом в качестве цели выступает, как правило, или увеличение производительности, или повышение периода размерной стойкости долбяков.

Для всех способов зубодолбления с радиальным врезанием (рис. 2.1), путь врезания превышает на величину безударного перебега высоту зуба нарезаемого колеса. При зубодолблении с касательным врезанием (рис. 2.6, 5.3 – 5.6) этот путь существенно возрастает, и его величина без учета безударного перебега определяется по формуле:

$$h = m\sqrt{2(Z_1 + Z_{II}) + 4},$$

где h – путь врезания, мм;

m – модуль, мм;

Z_1 и Z_{II} – число зубьев соответственно нарезаемого колеса и долбяка.

Из приведенного выражения видно, что при касательном врезании путь врезания возрастает как при увеличении числа зубьев нарезаемого колеса, так и при увеличении числа зубьев долбяка. Вполне естественна следующая производная цель: уменьшение машинного времени врезания. Рассмотрим возможные варианты достижения данной цели. По сложившейся традиции врезание осуществляют одновременно с обкатом. Причем подачу врезания устанавливают 0,1 – 0,3 значения круговой подачи. Следовательно, процесс зубодолбления на этапе врезания осуществляется при суммарной подаче, значение которой при касательном врезании составляет 1,1 – 1,3 значения круговой подачи. Считая, что суммарная подача на этапе врезания лимитирует технологическую надежность станка, можно уменьшить машинное время выполнения этого этапа посредством последовательного выполнения врезания и обката, установив значение подачи врезания, равное суммарной подаче, например, среднее ее значение, составляющее 1,2 значения круговой подачи.

Расчеты показывают, что при нарезании зубчатых колес с числом зубьев от 20 до 120 долбяком с числом зубьев равным 50 машинное время обработки уменьшается в 1,2 – 1,7 раза. Причем эффект уменьшения машинного времени возрастает с увеличением числа зубьев нарезаемого колеса.

При использовании способа зубодолбления при последовательном выполнении касательного врезания и обката (профилирования) в структуре соответствующего станка в момент прекращения движения врезания и включения движения профилирования в цепи обката происходит натяжение кинематических передач под воздействием силы резания. В итоге происходит круговое смещение долбяка относительно нарезаемого колеса на величину пропорциональную суммарной круговой податливости передач, следствием чего является заужение (утонение по толщине) последнего нарезаемого зуба.

Устранить это, как правило, нежелательное явление можно следующим образом (рис. 5.7). Необходимо движение касательного врезания на протяжении $2/3 - 3/4$ пути осуществлять с подачей 1 , составляющей $1,2$ значения круговой подачи S_K . Затем на участке L подачу врезания регрессивно уменьшают, а круговую подачу 2 прогрессивно увеличивают так, что суммарная подача сохраняется постоянной. К моменту окончания касательного врезания круговая подача увеличивается до значения S_K , а подача касательного врезания уменьшается до нулевого значения.

В данном варианте (по сравнению с предшествующим) несколько увеличивается время выполнения этапа врезания. Вместе с тем этот вариант обеспечивает повышение точности получаемых зубчатых колес.

Рассмотренные изменения правил выполнения приемов врезания и круговой подачи не изменяют структуру способов зубодолбления с касательным врезанием.

Принципиальной особенностью обкатного зубодолбления является дискретный характер резания, так как срезание стружки происходит только при рабочем ходе долбяка при его поступательно-возвратном движении. Количество резов обратно пропорционально скорости обката, определяемой круговой подачей долбяка.

Основная масса припуска при зубодолблении срезается вершинными и входными режущими кромками зубьев долбяка. Причем толщина стружек, срезаемых режущими кромками на окружностях выступов, приблизительно одинакова, а толщина стружек, срезаемых выходными режущими кромками значительно меньше толщин стружек, срезаемых входными режущими кромками на одноименных окружностях. Таким образом, для зубодолбления характерны неодинаковость толщин стружек на различных режущих кромках зубьев долбяка и возрастание толщин стружек от основания к вершине зубьев долбяка. При малых круговых подачах выходная режущая кромка срезает тонкие стружки, соизмеримые с естественным радиусом закругления режущей кромки. С увеличением круговой подачи толщина стружек на различных участках режущих кромок зубьев долбяка возрастает пропорционально круговой подаче.

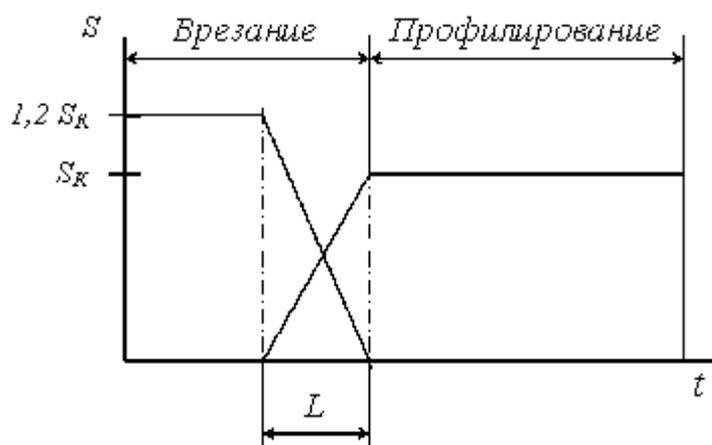


Рис. 5.7. Правило выполнения подач при зубодолблении с касательным врезанием

При прохождении каждым зубом долбяка зоны обработки прослеживаются следующие этапы процесса срезания стружки.

1. Период, начинающийся с момента начала резания вершинной и входной режущими кромками до вступления в зону обработки выходной режущей кромки. Срезаемые стружки имеют *L*-образную форму.

2. Период резания вершинной, входной и выходной режущими кромками. Срезаемые стружки имеют *U*-образную форму.

3. Период выхода зуба долбяка из зоны резания. Срезаемые стружки имеют *L*-образную форму, постепенно переходящую в *I*-образную.

При зубодолблении по классической схеме наиболее распространен тип *U*-образного схода стружки (рис. 5.8, *a*), при котором входная 1 и вершинная 2 режущие кромки срезают более толстые стружки, чем выходная режущая кромка 3. Вершинная стружка прижимает стружку, сходящую с выходной режущей кромки, к передней поверхности и затрудняет ее сход. Стружка, срезанная вершинной режущей кромкой, отклоняется от стружки, сходящей с входной режущей кромки, и подвергается высокой растягивающей нагрузке. Это приводит к разрыву промежуточной зоны стружки между вершинной и входной режущими кромками зуба долбяка. Затем обе стружки сходят беспрепятственно и не вызывают высоких механических или температурных деформаций на границе между вершинной и входной режущими кромками. Тонкая стружка, срезанная выходной режущей кромкой зуба, также отделяется от толстой стружки, сходящей с вершинной режущей кромки. Эта стружка выдавливается толстыми стружками в зазор между боковой стороной зуба долбяка и обрабатываемой поверхностью, где она истирается на участке стыка вершинной и выходной режущих кромок. Здесь образуется лунка локального износа по передней поверхности. Расстояние от выходной режущей кромки до центра лунки зависит от круговой подачи. При ее увеличении это расстояние также увеличивается.

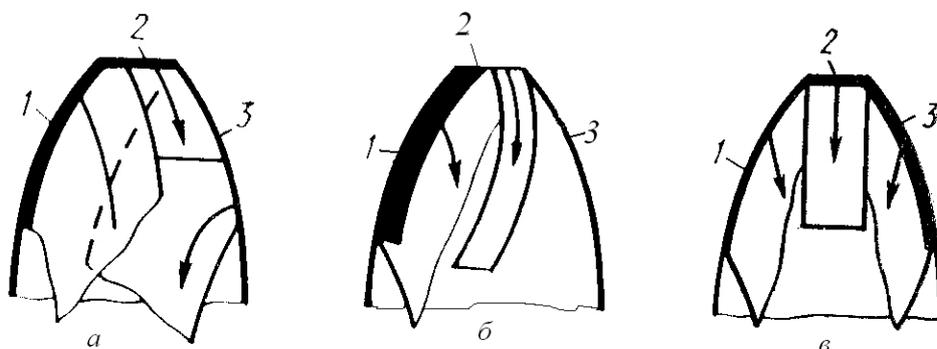


Рис. 5.8. Схемы схода стружек при зубодолблении

При зубодолблении, как и при любой другой обработке резанием, износ наблюдается по периметру всех режущих кромок. Однако лимитирует размерную стойкость долбяков лунка локального износа по передней поверхности у выходной режущей кромки. Данное явление представляет собой специфический парадокс процесса зубодолбления, так как оно возникает на участке, срезающем минимальные по толщине стружки. Постепенное увеличение лунки локального износа приводит к разрушению выходной режущей кромки по передней поверхности.

При зубодолблении по классической схеме для снижения интенсивности развития лунки локального износа используется технологический прием, заключающийся в изменении направления движения обката перед обработкой очередной заготовки. В этом случае лунки локального износа образуются симметрично на входной и выходной режущих кромках. Однако интенсивность их развития замедляется примерно в 2 раза.

Наряду с указанным технологическим приемом назовем на основе анализа схода стружек еще два возможных пути существенного замедления лунки локального износа. Первый путь связан с такой модификацией классической схемы, которая обеспечит срезание вместо *U*-образной более простой *L*-образной стружки. Такой тип стружки, срезаемой входной *L*-образной стружкой и вершинной 2 режущими кромками, представлен на рис. 5.8, б. Выходная режущая кромка в резании не участвует, *L*-образная стружка после разрыва промежуточной зоны между вершинной и входной режущими кромками зуба долбяка сходит беспрепятственно и не вызывает высоких деформаций на границе между этими режущими кромками.

Второй путь – создание условий резания, при которых толщина стружки, срезаемой входной и выходной режущими кромками, будет одинакова рис. 5.8, в. В этом случае стружки, имеющие одинаковую толщину, вызывают равную взаимную деформацию и сходят в стыке между вершинной и боковыми режущими кромками в одинаковых условиях. Вследствие взаимной деформации передняя поверхность зубьев долбяка подвергается равномерной силовой и тепловой нагрузке. Образование зоны локализованного износа сдвигается во времени и одновременно происходит ее перераспределение на обе боковые режущие кромки. Таким образом, лунки локального износа на передней поверхности появляются в окрестностях вершинной режущей кромки у обеих боковых режущих кромок. Однако интенсивность их развития замедляется в два раза, что соответственно увеличивает период размерной стойкости долбяков.

Единственный возможный способ однопроходного зубодолбления при радиальном врезании, обеспечивающий срезания L -образной стружки, защищен авторским свидетельством 1380881 (SU). По этому способу (рис. 5.9) обработку заготовки 1 производят долбяком 2 с заууженными по делительной окружности зубьями. При каждом рабочем ходе долбяка в поступательно-возвратном движении Π_1 (на схеме не показано) долбление осуществляют попеременно вершинными и входными, затем вершинными и выходными режущими кромками. Для этого в начале каждого рабочего хода долбяку 2 сообщают дискретную круговую подачу B_6 попеременно в направлении основной круговой подачи B_2 , затем против нее. Для обеспечения такого правила выполнения дискретной круговой подачи B_6 ее величину задают по выражению:

$$\Delta S = S_K \frac{Z_1 + Z_H}{Z_1} \sin \left[\arccos \left(1 - \frac{4Z_1}{(Z_1 + Z_H)(Z_H + 2)} \right) \right],$$

где Δs – дискретная круговая подача долбяка;

S_K – основная круговая подача;

Z_1 и Z_H – число зубьев заготовки и долбяка соответственно.

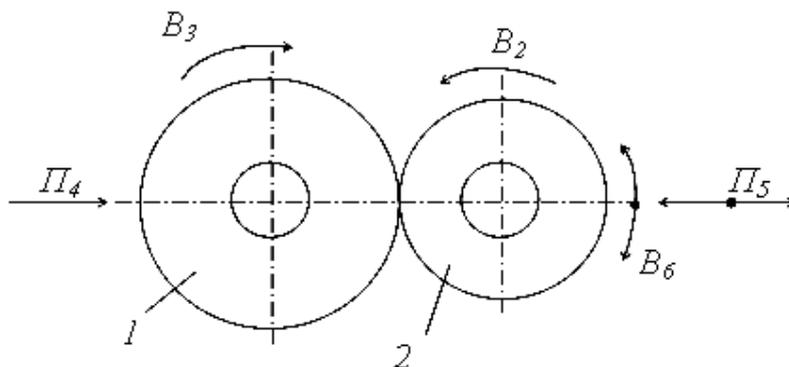


Рис. 5.9. Схема взаимодействия долбяка и заготовки в плане

Данный способ отличается от первообразного (рис. 2.1) дополнительной дискретной круговой подачей, синхронизированной с поступательно-возвратным движением Π_1 долбяка. Эта подача функционально не связана с движением B_3 заготовки и, следовательно, является вспомогательным движением, периодически изменяющим ориентацию движения обката B_2B_3 .

Структура кинематической подсистемы рассматриваемого способа описывается множеством ${}^K M = (\downarrow J \cup E)_O \cup (J \cup E)_H \cup (J \cup E)_{Bp} \cup (\downarrow J \cup E)_{Bc1} \cup (J \cup E)_{Bc2}$.

Функция этой подсистемы есть множество ${}^K F = \{ \{M_{\mathcal{E}}\}_{Zu}, H^C - H^K, \{ \Phi_O(\downarrow \Pi_1), \Phi_O(B_2 B_3), Bp(\Pi_4), Bc_1(\downarrow \Pi_5), Bc_2(B_6) \Delta s \} \}$.

В выражении для функции кинематической подсистемы дискретная круговая подача Δs является специфическим правилом выполнения дополнительного приема – движения B_6 .

Базирующая и энергетическая подсистемы рассматриваемого способа совпадают с соответствующими подсистемами прототипа (первообразного способа). Критерий сложности способа равен 11.

При однопроходном зубодолблении нормальными долбяками реализация рассмотренных выше путей замедления лунки локального износа невозможна, а при двух-трехпроходном – мало эффективна. Именно поэтому в области конструирования зубодолбежных станков ведущих станкостроительных фирм произошел переход от классического одно-трехпроходного зубодолбления к многопроходному при шести – десяти проходах с увеличенными круговыми подачами до 3,5 – 4,5 мм/дв. ход долбяка на предварительных черновых и получистовых проходах. Такой режим при сохранении производительности традиционного зубодолбления с малыми круговыми подачами обеспечивает повышение периода размерной стойкости зуборезных долбяков. Объясняется это следующими обстоятельствами. С увеличением круговой подачи толщина стружки возрастает, одновременно уменьшается ее длина, т.е. происходит перераспределение параметров сечения стружки. При этом количество срезаемых стружек уменьшается примерно на порядок. Увеличение толщины стружек, срезаемых выходной режущей кромкой, обеспечивает благоприятные условия их схода и, как следствие, лунку локального износа сдвигает к центру передней поверхности зуба. Интенсивность развитие лунки локального износа заметно замедляет. Кроме того, каждый зуб долбяка, срезая существенно меньшее количество стружек, меньше нагревается. В результате возрастает термоциклическая стойкость режущих кромок зубьев.

При многопроходной обработке нет необходимости использовать долбяки с заууженными зубьями по делительной окружности при срезании L -образной стружки. А при использовании нормальных долбяков дополнительную круговую подачу рационально сообщать при очередном врезании перед каждым последующим проходом. В итоге долбление на проходах, кроме первого, будет осуществляться либо вдоль входной, либо вдоль выходной режущей кромки.

Более предпочтительно при многопроходной обработке для минимизации влияния неодинаковости толщины стружки, срезаемой боковыми режущими кромками, на период размерной стойкости долбяков создание условий для срезания U -образной стружки. Рассмотрим решение данной задачи, предложенное в описании изобретения по авторскому свидетельству 1641534 (SU). При врезании перед очередным проходом долбяку сообщают угловое смещение, противоположное его круговой подаче, и одновременно измеряют момент силы резания. При достижении моментом силы резания нулевого значения, что соответствует одинаковой по толщине стружки, срезаемой обеими боковыми режущими кромками, угловое смещение долбяка прекращают. В итоге на проходе будет срезаться U -образная стружка, имеющая одинаковую толщину на боковых режущих кромках.

Из описания принципа функционирования рассматриваемого технического решения следует, что эта S -система содержит подсистему стабилизации момента силы резания, обеспечивающую повышение периода размерной стойкости долбяка посредством создания условий для срезания симметричной U -образной стружки на каждом проходе кроме первого.

Источником информации и энергии для подсистемы стабилизации силового воздействия является среда резания. В свою очередь эта подсистема является источником информации для структуры врезания кинематической подсистемы. Следовательно, структура и функция рассматриваемого способа зубодолбления на первом уровне есть множества: ${}_1S = ({}^K M \cap {}^{\mathcal{A}} M \cap {}^C M) \cup {}^B M$, ${}_1F_S = \{M_{\mathcal{A}}\}_{z_{\mathcal{A}}}, H^C - H^K, \{[{}^K M_O \cup {}^K M_H \cup ({}^K M_{Bp} \cap {}^C M) \cup {}^K M_{Be1} \cup {}^K M_{Be1}] \cap {}^{\mathcal{A}} M\} \cup {}^B M$.

Данный способ можно изменить таким образом, чтобы выполнять процесс зубодолбления с L -образной стружкой на втором и последующих кроме последнего проходах. Для этого при каждом последующем врезании угловое смещение долбяка изменяют на противоположное, и одновременно измеряют момент силы резания. При достижении моментом силы резания максимального значения, что соответствует максимальной по толщине стружки, срезаемой одной из боковых режущих кромок, угловое смещение долбяка прекращают. В итоге на проходе будет срезаться L -образная стружка. На последнем чистовом проходе срезание припуска должна осуществляться в форме U -образной стружки.

При большом количестве проходов возрастает машинное время врезания. Устранить этот недостаток классической схемы позволяет способ зубодолбления по авторскому свидетельству 1763112 (SU), по которому на предварительных проходах врезание осуществляют непрерывно по спирали (рис. 5.10). При постоянных значениях подачи радиального врезания и круговой подачи на этапе предварительных проходов при непрерывном вреза-

Следовательно, длину архимедовой спирали, по которой перемещается долбяк на этапе врезания, можно определить как разность длин спиралей: полюс O – точка A и полюс O – точка B . После элементарных преобразований получим:

$$L = \frac{a}{2} \left[\left(\varphi_2 \sqrt{1 + \varphi_2^2} - \varphi_1 \sqrt{1 + \varphi_1^2} \right) + (Arsh \varphi_2 - Arsh \varphi_1) \right],$$

где φ_1 и φ_2 – углы поворота заготовки в движении обката по длине архимедовой спирали на участках соответственно от полюса до точки B и от полюса до точки A .

Углы φ_1 и φ_2 определим из выражений:

$$\varphi_1 = 2\pi \frac{R_a - h}{a}; \quad \varphi_2 = 2\pi \frac{R_a}{a},$$

где R_a – радиус заготовки (радиус окружности выступов обрабатываемого колеса), мм.

Параметр a и шаг t архимедовой спирали связаны соотношением $t = 2\pi a$.

Шаг архимедовой спирали при зубодолблении можно выразить через количество проходов k :

$$t = h / k.$$

Следовательно: $a = h / 2\pi k$.

В выражении для определения L второе слагаемое, представляющее разность обратных гиперболических синусов в пределах приемлемого числа предварительных проходов, не превышает 0,1 мм. Поэтому этим слагаемым можно пренебречь при практических расчетах. После подстановки значения L в выражение для S_p окончательно получим:

$$S_p = \frac{2S_k h}{a (\varphi_2 \sqrt{1 + \varphi_2^2} - \varphi_1 \sqrt{1 + \varphi_1^2})}.$$

Для данного способа зубодолбления из-за особенностей движения врезания машинное время обработки определяется по следующей отличной от традиционной формуле:

$$T_M = \frac{\pi m Z}{n S_{K1}} + \frac{L}{n S_\partial},$$

где T_M – машинное время обработки, мин;

m – модуль, мм;

Z – число зубьев нарезаемого колеса;

S_{K1} – круговая подача на чистовом проходе, мм / дв. ход долбяка;

n – число двойных ходов долбяка в минуту.

Базирующая и энергетическая подсистемы рассматриваемого способа совпадают с соответствующими подсистемами прототипа – первообразного способа с радиальным врезанием.

Особенность кинематической подсистемы – сложная двухэлементарная структура врезания $Vp(B_2\Pi_4)$, элементарное движение B_2 которой входит также в структуру сложного движения профилирования (обката) $\Phi_H(B_2B_3)$. Следовательно, эти составляющие кинематической подсистемы пересекаются. Отсюда, структура и функция этой подсистемы есть множества: ${}^K M = (\uparrow J \cup E)_O \cup [(JJ \cup E)_H \cap (JJ \cup E)_{Vp}] \cup (\uparrow J \cup E)_{Vc}$; ${}^K F = \{\{M_{\Sigma}\}_{Zu}, H^C - H^K, \{\Phi_O(\uparrow\Pi_1), \{\Phi_H(B_2B_3) \cap Vp(B_2\Pi_4)\}, Vc(\uparrow\Pi_5)\}\}$.

Функционируют пересекающиеся структуры последовательно по следующему правилу: многопроходное спиральное врезание \rightarrow профилирование (чистой проход).

Функциональная связь между движениями B_2 и B_3 , образующими сложное движение обката (профилирования), устанавливается по известным правилам для настройки расчетных цепей обката зубодолбежных станков и выражается зависимостью $i_x = Z_1 / Z_H$, где Z_1 и Z_H – соответственно число зубьев нарезаемого колеса и долбяка.

Функциональную связь между движениями B_2 и Π_4 , образующими сложное движение врезания, можно определить на основе следующих РП: 1 оборот заготовки нарезаемого колеса $\rightarrow (t = h/\kappa)$ перемещения долбяка.

Тогда РП имеют вид:

$$(t = h / \kappa) = 1i_y.$$

Отсюда находим функциональную связь (ФН): $i_y = h / \kappa$.

Рассмотренный способ многопроходного зубодолбления со спиральным врезанием реализован в одной из частных структур зубодолбежных станков с ЧПУ германской фирмы «Lorenz».

5.5. Принцип совмещения исполнительных движений

Совмещение исполнительных движений позволяет уменьшить общее количество движений, необходимое для формообразования обрабатываемых поверхностей. Это упрощает способ обработки и, как следствие, кинематическую структуру станка. На этом принципе основаны первообразные способы обкатной обработки зубчатых колес, когда образование профиля зубьев осуществляют движением обката. Характерным для данных способов обработки является совмещение сложного движения профилирования зубьев с простым движением деления и обеспечение на этой основе непрерывности процесса зубонарезания.

Для нарезания цилиндрических зубчатых колес с наклонными по делительной окружности зубьями зуборезными долбьяками используется способ зубодолбления, согласно которого инструмент (или заготовку) устанавливают под углом к оси заготовки (или к оси инструмента), равным углу наклона нарезаемых зубьев. Такое решение реализуется посредством изменения компоновки станка на этапе конструирования. Изменение компоновки снижает коэффициенты универсальности и мобильности базовых моделей зубодолбежных станков, так как их наладка на обработку традиционных зубчатых колес или переналадка на иной угол наклона зубьев проблематична. Поэтому представляется целесообразным использование кинематического принципа воспроизведения траектории движения инструмента по делительному конусу при обработке колес с наклонными зубьями.

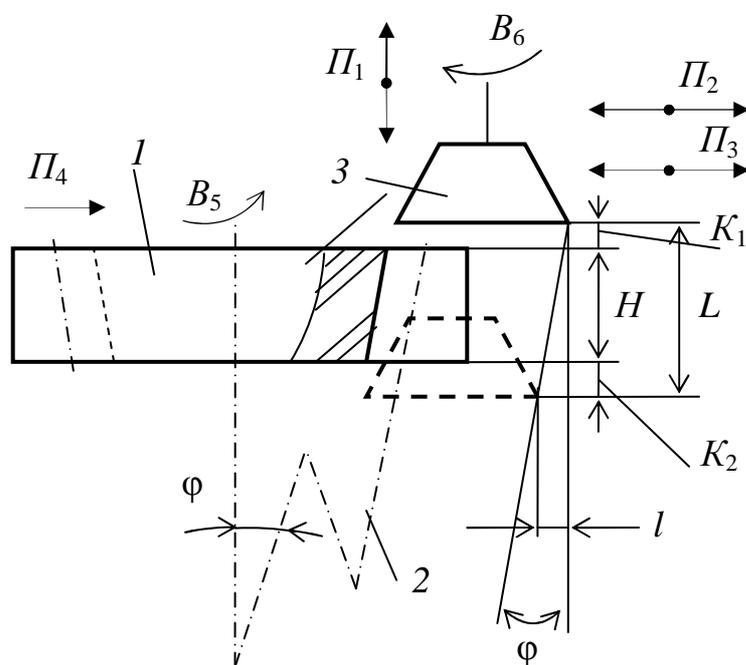


Рис. 5.11. Способ долбления цилиндрических колес с наклонными зубьями

На рис. 5.11 приведена схема способа зубодолбления колес с наклонными зубьями по патенту 3343 (ВУ). Для обработки заготовку 1 устанавливают в исходное положение относительно долбяка 3. Причем начальное и конечное положение долбяка в движении $\uparrow P_1$ устанавливают с учетом параметра путь L , который складывается из высоты H зубчатого венца заготовки, верхнего K_1 и нижнего K_2 перебегов долбяка. Для воспроизведения

линии зуба на делительном конусе 2 долбяку 3 необходимо сообщать два движения: традиционное для зубодолбления с линией зуба на цилиндре поступательно-возвратное движение $\uparrow P_1$ скорости резания и дополнительное радиальное равномерное движение $\downarrow P_2$, синхронное с движением $\uparrow P_1$. Причем путь дополнительного движения $\downarrow P_2$ рассчитывается по формуле:

$$l = L \operatorname{tg} \varphi ,$$

где l – путь дополнительного движения P_2 , мм;

L – путь поступательно-возвратного движения $\uparrow P_1$, мм;

φ – угол наклона зубьев обрабатываемого колеса, град.

Таким образом, при кинематическом воспроизведении линии зуба на делительном конусе в рассматриваемом способе обработки колес с наклонными зубьями линия зуба должна воспроизводиться сложным двух-элементарным движением $\Phi_v \uparrow (P_1 P_2)$ скорости резания. При этом движения обката $\Phi_s(B_5 B_6)$, врезания $Vp(P_4)$ и отвода («отскока») долбяка $Vc(\uparrow P_3)$ при его холостом ходе в движении Φ_v остаются такими же как у классического (первообразного) способа зубодолбления.

Элементарные движения $\uparrow P_1$ скорости резания, B_6 круговой подачи и P_4 подачи врезания являются нормируемыми характеристиками процесса зубодолбления. Функциональную связь дополнительного радиального равномерного движения $\uparrow P_2$ с нормируемым движением $\uparrow P_1$ устанавливают на основе известного в станковедении правила составления расчетных перемещений исполнительных органов расчетных кинематических (структурных) цепей: L мм перемещения долбяка в движении $P_1 \rightarrow l$ мм перемещения долбяка в движении P_2 .

При обработке долбяку 3 сообщают движение скорости резания $\Phi_v \uparrow (P_1 P_2)$ и движение отвода $Vc(\uparrow P_3)$, а заготовке 1 – движение врезания $Vp(P_4)$ на высоту зуба нарезаемого колеса. Затем заготовке и долбяку сообщают движение обката $\Phi_s(B_5 B_6)$. В результате сообщения долбяку и заготовке указанных движений долбяк воспроизводит линию зуба (образующую) по делительному конусу 2, которая переносится по профилю зуба (направляющей). В итоге на заготовке образуется зубчатый венец с наклонными зубьями.

В данном способе зуборезный долбяк в радиальном направлении по циклу обработки совершает элементарное движение $\uparrow P_2$, входящее в сложное формообразующее движение $\Phi_v \uparrow (P_1 P_2)$, и элементарное вспомогательное движение $\uparrow P_3$. Элементарные движения $\uparrow P_2$ и $\uparrow P_3$ выполняют синхронно с движением $\Phi_v \uparrow (P_1 P_2)$ и, следовательно, синхронно между собой. Названные элементарные движения различаются только параметром траектория. Следовательно, используя особенности тягового вала кинематической группы зубодолбежного станка, воспроизводящей движение $Vc(\uparrow P_3)$, можно использовать кулачок тягового вала этой группы одновременно как физический программноситель траектории движения $\uparrow P_2$ и таким образом не вводить дополнительную структурную составляющую в кинематическую подсистему первообразного способа зубодолбления и, следовательно, при разработке кинематической схемы соответствующего станка не преобразовывать группу скорости резания $\Phi_v(\uparrow P_1)$ базовой модели станка в сложную группу $\Phi_v \uparrow (P_1 P_2)$, характерную для рассматриваемого способа.

Таким образом при совмещении формообразующего движения $\uparrow\Pi_2$ и вспомогательного движения $\uparrow\Pi_3$ в рассматриваемом способе обеспечивается повышение коэффициентов мобильности и универсальности при сохранении коэффициента сложности первообразного способа зубодолбления.

Для сравнения приведем математическое описание кинематической подсистемы первообразного и рассматриваемого способов зубодолбления.

Первообразный способ: ${}^K M = (J \cup E)_O \cup (JJ \cup E)_H \cup (J \cup E)_{Bp} \cup (J \cup E)_{Bc}$;
 ${}^K F = \{\{M_{\mathcal{E}}\}_K, H^C - H^K, \{\Phi_O(\uparrow\Pi_1), \Phi_H(B_5 B_6), Vp(\Pi_4), /Bc(\uparrow\Pi_3)\}\}$.

Рассматриваемый способ: ${}^K M = [(JJ \cup E)_{\Phi} \cap (J \cup E)_{Bc}]_O \cup (JJ \cup E)_H \cup (J \cup E)_{Bp}$;
 ${}^K F = \{\{M_{\mathcal{E}}\}_K, H^C - H^K, \{\Phi_O[\uparrow\Pi_1(\uparrow\Pi_2 \cap \uparrow\Pi_3)], \Phi_H(B_5 B_6), Vp(\Pi_4)\}$.

Рассмотренное совмещение формообразующего и вспомогательного движений на примере зубодолбления с радиальным врезанием без изменений можно использовать также в рассмотренных ранее способах зубодолбления с касательным врезанием. Естественно эффект от этого будет таким же, как и в рассмотренном способе.

Ряд способов формообразующей обработки, предложенных на основе использования принципа совмещения исполнительных движений, можно найти в описаниях изобретений по авторским свидетельствам и патентам.

5.6. Принцип согласования ритмов физического воздействия на заготовку

Объединим рассмотренные ранее способ планетарного течения (рис. 4.11) и способ течения с наложением электростатического поля (рис. 4.6). Получим комбинированный способ формообразующей обработки, обеспечивающий суммирование эффектов, получаемых объединяемыми способами по отдельности, т. е. надежное стружкодробление и повышение периода размерной стойкости инструмента. По этому способу (рис. 5.12) по кругу относительно общего шпинделя 1 устанавливают несколько заготовок 2. Процесс обработки осуществляют, сообщая заготовкам 2 вращение B_2 вокруг собственных осей 3 и вращение B_1 вокруг оси шпинделя 2, а резцу 4 – движение Π_3 в направлении продольной подачи (на схеме не показано). Одновременно между резцом и изолированной металлической пластиной 5 создают внешнее электростатическое поле, противоположенное электродвижущей силе собственного поля среды резания.

При указанном характере воздействия на заготовки резцом и электростатическим полем припуск b срезается в виде слоев $A - A$, равномерно расположенных по сечению заготовок, соответствующих углу φ в пе-

реносном движении B_1 . В то же время внешнее электростатическое поле создается между резцом 4 и пластиной 5 постоянно. Таким образом, процессы срезания припуска и дополнительного электростатического воздействия на среду резания имеют различный ритм. В периоды, когда припуск не срезается, происходят непроизводительные затраты энергии на создание внешнего электростатического поля. Устранить их, т. е. снизить энергоемкость процесса обработки, можно согласованием ритмов силового и электростатического воздействия на материал заготовки. Для этого необходимо внешнее электростатическое поле создавать только на периоды срезания припуска с заготовок. При этом форма напряжения электростатического поля может быть различной, например, прямоугольной или виде полуволны синусоиды и т. п.

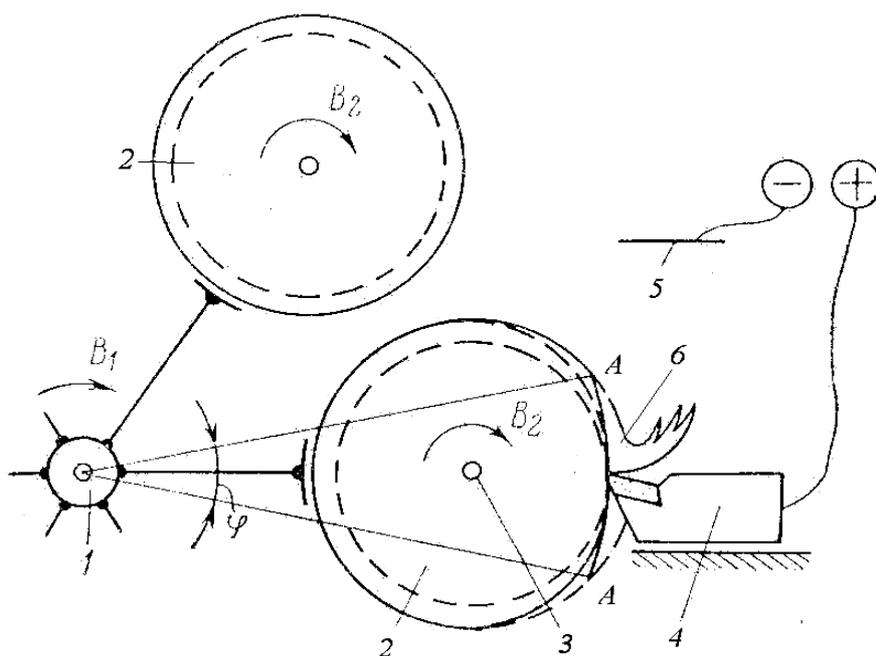


Рис. 5.12. Способ планетарного точения с наложением электростатического поля

Данный комбинированный способ точения отличается от сборного прототипа синхронизацией электростатического воздействия на среду резания с периодами срезания припуска. Этот способ с большой степенью вероятности мог быть признан изобретением при подаче соответствующей заявки до разглашения его в открытой печати.

В приведенном примере для достижения цели осуществляется согласование ритмов физического воздействия двух компонент энергетической подсистемы способа обработки. В следующем способе, содержащем однокомпонентную энергетическую подсистему, для решения конкретной задачи осуществляется согласование ритмов формообразующих движений.

При нарезании зубчатых колес зуборезными долбяками (рис. 2.1) срезание стружки происходит дискретно, т. е. только при рабочем ходе долбяка в движении $\downarrow \Pi_1$ скорости резания. Вместе с тем движение обката B_2B_3 , скорость которого определяется круговой подачей долбяка, в течение всего цикла обработки происходит непрерывно. Следовательно, оба формообразующих движения функционируют в качественно различном ритме. Это неизбежно при каком-то значении круговой подачи и при принятой величине «отскока» долбяка на холостом ходу приводит к возникновению явления затирания. Это явление проявляется в виде трения скольжения боковых режущих кромок зубьев долбяка о профилируемые зубья колеса.

Природу явления затирания можно объяснить следующим образом. При обкате долбяка и заготовки очередной зуб долбяка, вступая в зону зацепления, профилирует впадину копированием и обкатом. На первом рабочем ходе долбяка в движении $\downarrow \Pi_1$ на заготовке копируется часть профиля зуба, а при последующих рабочих ходах копирование сопровождается обкатом. Причем по мере прохождения каждым зубом долбяка зоны резания протяженность копирующей части профиля зуба сначала возрастает от нуля до некоторого максимума, а затем убывает, приближаясь к нулю. Перенос зоны копирования по линии зуба осуществляется по винтовой линии, угол подъема которой равен углу между вектором скорости резания и вектором движения формообразования, определяемом как геометрическая сумма векторов скорости резания и круговой подачи. При холостом ходе в движении $\downarrow \Pi_1$ долбяк контактирует боковыми задними поверхностями каждого зуба с материалом заготовки на локализованном участке, срезаемом при следующем рабочем ходе, т. е. возникает явление затирания. Это явление циклически повторяется на каждом зубе долбяка, вступающем в процесс долбления. Наиболее неблагоприятные условия резания каждым зубом соответствуют начальному этапу, где преобладает копированием и, следовательно, возникают наибольшие по величине натяги при затирании. На режущих кромках данному этапу соответствуют зоны более интенсивного износа по задним поверхностям входных боковых режущих кромок у вершин зубьев долбяка чем у их ножек. Совместное влияние явления затирания и образования лунок локализованного износа на передней поверхности интенсифицируют разрушение режущих кромок у вершин зубьев долбяков.

Природа образования лунок локализованного износа по передней поверхности и пути замедления их развития рассмотрены выше (комментарий к рис. 5.8).

Рассмотрим возможные пути устранения явления затирания, основанные на принципе согласования ритмов формообразующих движений.

Согласно первого пути можно «привести» дискретный ритм движения $\uparrow\Pi_1$ к ритму движения B_2B_3 . Для этого необходимо снизить скорость движения $\uparrow\Pi_1$ до уровня подачи токарной обработки и осуществлять это движение в течение всего цикла обработки не поступательно-возвратно, а поступательно. Необходимо также увеличить круговую частоту B_2 долбяка, определяющую скорость движения обката, до уровня скорости течения. Это приводит к замене зубодолбления зуботочением (рис. 3.8, к). Одновременно вследствие непрерывности зуботочения отпадает необходимость в движениях врезания Π_4 и «отскока» $\uparrow\Pi_5$ инструмента. Отметим также, что этот путь согласования ритмов формообразующих движений приводит к перестановке воспроизводящих линий: линия, имеющая форму профиля зубчатого колеса, будет образующей, а прямая линия зуба по длине – направляющей. Значительно изменятся структура и функция кинематической подсистемы (табл. 4.1), хотя мощность характеристического образа инструмента остается прежней. Изменится и обобщенный параметр состояния внутренней среды, так как воздействие на твердое тело заготовки в течение всего цикла обработки будет непрерывным.

Кинематика зуботочения аналогична кинематике токарной обработки, при которой не возникает явление затирания. Следовательно, зуботочение не сопровождается возникновением этого явления.

Вероятно, именно так рассуждал автор изобретения способа зуботочения, анализируя пионерный способ зубодолбления, изобретенный на несколько десятилетий раньше.

Второй путь основан на приведении ритма движения обката B_2B_3 к ритму движения $\uparrow\Pi_1$. Для этого необходимо заменить непрерывный характер движения обката дискретным, что возможно, например, согласно авторского свидетельства 698732 (SU) посредством прекращения движения обката на периоды свободного хода долбяка в движении $\uparrow\Pi_1$ (рис. 5.13, вариант 1). Такой вариант приводит к существенному качественному изменению функции первообразного способа. Однако структура его кинематической подсистемы не претерпевает значительных изменений. Однако такое техническое решение в некоторых случаях может ухудшить динамику группы обката зубодолбежного станка, так как при дискретном обкате кинематические связи этой группы будут периодически натягиваться и ослабляться. В итоге понизится кинематическая точность ее внутренней связи и, следовательно, ухудшится качество обработки. Поэтому рассматриваемый вариант согласования ритмов формообразующих движений можно видоизменить на основе следующего обоснования.

Экспериментально или теоретически с помощью математической модели по расчету боковых зазоров можно определить минимальную круговую подачу, при которой гарантируется для зуба долбяка, находящегося в наихудших условиях обработки, минимальный зазор между режущей кромкой и профилируемой впадиной при свободном ходе долбяка. Сообщая полученное минимальное значение круговой подачи во внутреннюю связь (цепь обката) группы обката параллельно с дискретной рабочей подачей, можно обеспечить постоянное натяжение этой цепи (рис. 5.13, вариант 2).

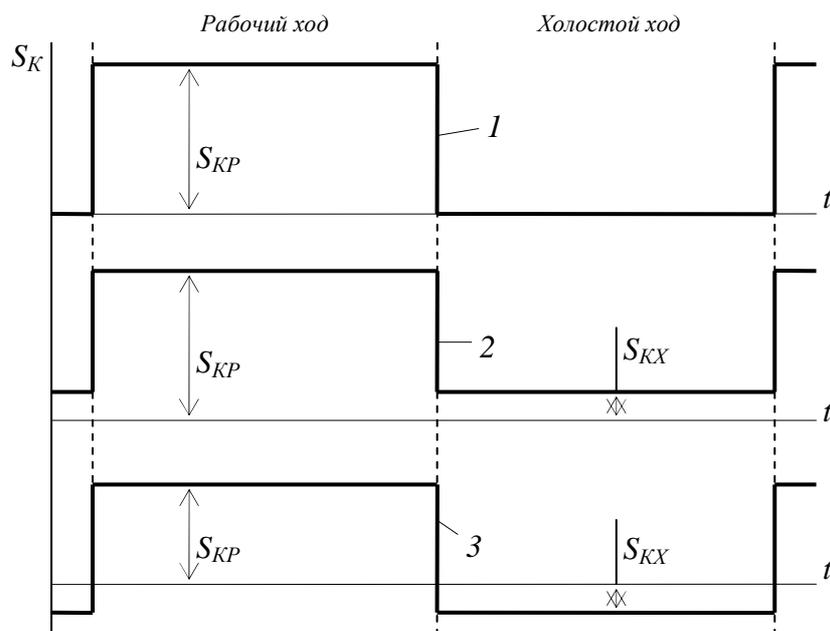


Рис. 5.13. Варианты дискретного изменения круговой подачи:
 S_{KP} и $S_{КХ}$ – круговая подача соответственно при рабочем и холостом ходе

Можно дискретный характер движения обката заменить качательным ($\updownarrow B_2 B_3$), синхронизированным с движением $\updownarrow \Pi_1$. При этом для обеспечения процесса формообразования при рабочем ходе долбяка в движении $\updownarrow \Pi_1$ движение обката должно иметь большую скорость, чем при возвратном свободном ходе (вариант 3). Во избежание потери производительности разность круговых подач при рабочем и свободном ходах необходимо установить с учетом допустимой условиями обработки высоты огранки поверхности зубьев в направлении их профиля. Для этого можно воспользоваться выражением, полученным из уравнения 3.11:

$$S_{KP} - S_{КХ} = 2 \sqrt{\frac{\Delta m Z_1^2 \left[(Z_1 + Z_2) \sin \alpha - \sqrt{(Z_1 + 2)^2 - Z_1^2 \cos^2 \alpha} \right]}{(Z_1 + Z_2) \sin \alpha \sqrt{(Z_1 + 2)^2 - Z_1^2 \cos^2 \alpha}}},$$

где Δ – допустимая высота огранки поверхности зубьев в направлении их профиля.

Варианты 2 и 3 согласования ритмов формообразующих движений также, как и вариант 1, приводит к качественному изменению функции первообразного способа зубодолбления. При этом структура производных способов остается неизменной, т. е. графическое представление первообразного и производных способов неразличимы.

Приведенные примеры использования принципа согласования ритмов энергетического воздействия на заготовку или ритмов исполнительных движений позволяют создавать новые способы обработки с качественно иной структурой и функцией по сравнению с исходными (первообразными) способами. Это позволяет утверждать, что принцип поиска на основе анализа и согласования ритмов физических воздействий в способах получения реальных поверхностей может быть использован для создания новых технических решений. В частности его рационально применять для устранения явления затирания, возникающего при зубообработке в условиях обката инструментами, совершающими поступательно-возвратное движение, например, при долблении реек долбяком, долблении колес зубчатой рейкой, строгании конических колес резцами.

5.7. Различимость способов формообразующей обработки

Из определения понятия способа формообразующей обработки следует, что одинаковые способы невозможны. Все известные и возможные новые способы обработки различны. Причем мера их различимости даже в пределах одной группы, полученной на основе одного и того же первообразного способа посредством соответствующих изменений приемов, их последовательностей и правил выполнения, будет также различна. При системном анализе способов формообразующей обработки было показано, что абсолютное большинство S-систем на первом уровне разбиения может быть представлено в виде объединения трех подсистем: кинематической, базирующей и энергетической. Незначительную группу составляют S-системы, содержащие в своей структуре еще и подсистему стабилизации силового параметра.

Энергетическая подсистема воспроизводит внутреннюю среду S-системы, определяющую природу физического воздействия на твердое тело при формообразующей обработке. Внутренняя среда S-систем содержит не менее одной компоненты. Одна из компонент внутренней среды – силовое воздействие – обычно воспроизводится кинематической подсистемой, другие составляющие энергетической подсистемы, как правило, не имеют общих элементов с кинематической подсистемой. Как было показано ранее, энергетическая подсистема может выполнять функцию не только кинемати-

ческой, но и базирующей подсистемы. Это позволяет рассматривать энергетическую подсистему в качестве основного подмножества S-систем. Отсюда первый наиболее общий уровень различимости способов формообразующей обработки: по виду физического воздействия на твердое тело заготовки.

В пределах одного и того же вида физического воздействия посредством кинематической подсистемы воспроизводится поверхность заданной формы. При этом поверхность конкретной геометрической формы может быть получена различными по структуре кинематическими подсистемами, что объясняется большим разнообразием характеристических образов инструментов и еще большим классов и подклассов геометрического образования поверхностей. Отсюда следующий достаточно общий уровень различимости способов формообразующей обработки в пределах любого отдельного вида или произвольной совокупности видов физического воздействия определяется классом характеристического образа инструмента и классом или подклассом геометрического воспроизведения поверхности.

По сложившейся традиции, как в технической, так и в патентной литературе, описание любого способа формообразующей обработки обычно поясняется схемой взаимодействия объектов – инструмента и заготовки. Как правило, она иллюстрирует принцип получения геометрической формы поверхности и исходную ориентацию заготовки относительно инструмента, т. е. кинематическую и базирующую подсистемы.

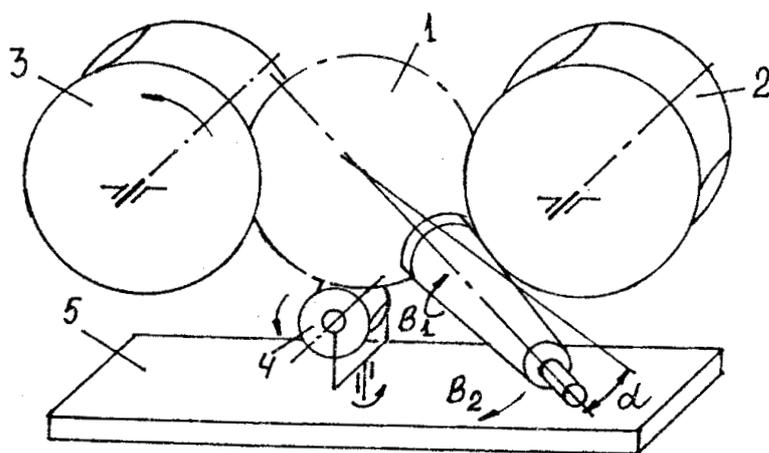


Рис. 5.14. Способ обкатки сферической поверхности с самоподачей

На рис. 5.14 приведена схема способа чистовой обработки поверхностным пластическим деформированием шаровых поверхностей большого диаметра по авторскому свидетельству 222184 (SU). Шаровую поверхность детали 1 размещают между ведущим 2, поджимным 3 и опорным 4 роликами, которые обеспечивают ориентацию и вращение детали.

Для осуществления подачи по периметру обкатываемой поверхности цапфа детали размещается на опоре 5 под некоторым углом α к плоскости осей деформирующих роликов 2 и 3. Затем при сообщении вращения ведущему ролику 2 деталь 1 получает на-

ряду с вращением обкатки B_1 еще и круговую подачу B_2 , скорость которой зависит от диаметра ведущего ролика и угла наклона цапфы детали на опоре 5. В результате такого целенаправленного воздействия роликов на деталь происходит обработка (обкатка) ее сферической поверхности.

Внутренняя среда способа содержит одну компоненту – силовое воздействие роликов на обкатываемую поверхность. Кинематическая подсистема способа по сравнению с аналогичной подсистемой первообразного способа, имеющего отдельную структуру движения подачи, упрощена посредством расположения оси детали под некоторым углом к плоскости осей накатных роликов. При такой ориентации детали скорость ее самоподачи есть функция скорости вращения ведущего ролика, его диаметра и угла наклона оси детали. В этом сущность новизны способа.

Возможно несколько модификаций вспомогательного элемента инструмента (рабочей поверхности накатных роликов). При этом вспомогательный элемент инструмента может иметь форму дуги окружности, радиус которой несколько больше или равен радиусу обкатываемой сферы. Он может быть также очерчен дугами двух окружностей, радиус внутренней дуги равен радиусу обкатываемой сферы, радиус внешней дуги – несколько больше радиуса сферы. Поэтому характеристический образ инструмента (комплект из двух накатных роликов) есть декартово произведение:

$$P = \{M_{Э1} \times M_{Э2}\},$$

где $M_{Э1}$ и $M_{Э2}$ – соответственно мощность ведущего и поджимного роликов.

По авторскому свидетельству 384662 (SU) известен еще один способ обкатки сферической поверхности с самоподачей. По этому способу (рис. 5.15) шаровую поверхность детали 1 также размещают между роликами 2, 3, 4. Для осуществления самоподачи цапфу детали располагают на опоре 5 под углом к плоскости осей роликов 2 и 3. При сообщении вращения ведущему ролику 2 деталь 1 получает вращение обкатки B_1 и круговую самоподачу B_2 . В

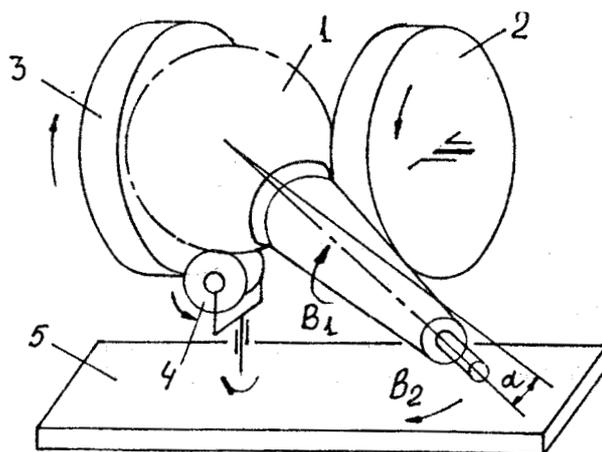


Рис. 5.15. Способ обкатки сферы торцом роликов

итоге производится чистовая обработка (обкатка) ее сферической поверхности. Новизна способа по сравнению с предыдущим заключается в том, что вспомогательные элементы ведущего 2 и поджимного 3 роликов выполнены

не на периферии, а на торце. Перенос вспомогательных элементов с периферии на торец роликов не изменил характеристического образа инструмента. Однако такой перенос обеспечил достижение производной цели – повышение безопасности процесса обработки при снижении требования к точности расположения центра обрабатываемой сферы относительно плоскости осей ведущего и поджимного роликов. По существу именно достижение этой цели обеспечило признание данной технической идеи изобретением.

Оба рассмотренных способа по своей структуре и принципу функционирования одинаковы, а их математическая модель есть множество:

$${}_1S_S = \{ \{ {}^K M \cap {}^\mathcal{O} M, {}^B M^{1-6} \cap P \}, \{ F \}_3 \}.$$

Сравнивая описания этих способов на различных языках: вербальном (функциональное описание способа и его логической формулы изобретения), графическом (в виде схемы взаимодействия объектов) и математическом (в виде множества подсистем, составляющих способ), несложно заметить, что они различимы только на уровне графического представления.

Подобный перенос вспомогательного элемента известен также и в других группах способов обработки резанием. Например, в значительном многообразии способов обработки самовращающимися резцами, признанных в разное время изобретениями, передняя поверхность, несущая вспомогательный элемент (режущую кромку), расположена или на торце чашки инструмента, или на его конической периферии, или выполнена в виде винтовой поверхности. В этом многообразии способы обработки различимы так же, как правило, на уровне графического изображения.

На рис. 5.16 показаны возможные схемы способов нарезания резьбы резцом, профиль которого соответствует профилю впадины резьбы. По первой наиболее распространенной пионерной схеме (рис. 5.16, а) при нарезании резьбы заготовке I сообщают вращательное движение B_1 , а резцу 2 – продольное перемещение Π_2 . Приоритет этого способа подтверждается двумя патентами, полученными английским механиком Г. Мондсли в 1798 г. (токарно-винторезный станок со сменными ходовыми винтами) и в 1800 г. (токарно-винторезный станок с двухколесной гитарой сменных зубчатых колес). Другие схемы получены посредством перераспределения элементарных движений B_1 и Π_2 между заготовкой и резцом.

Для приведенных схем характеристический образ инструмента, класс образования резьбы и условия базирования заготовки одинаковы. Образующая винтовой поверхности по каждой схеме воспроизводится копированием, а направляющая – одним и тем же сложным формообразующим движением

$\Phi_v(B_1\Pi_2)$. Структура кинематической подсистемы для каждой из схем также одинакова и описывается формулой, воспроизводящей направляющую ${}^K M \equiv {}^K M_H$, а ее функция есть множество ${}^K F = \{\{E\}_1, E - H^c, \Phi_H(B_1\Pi_2)\}$.

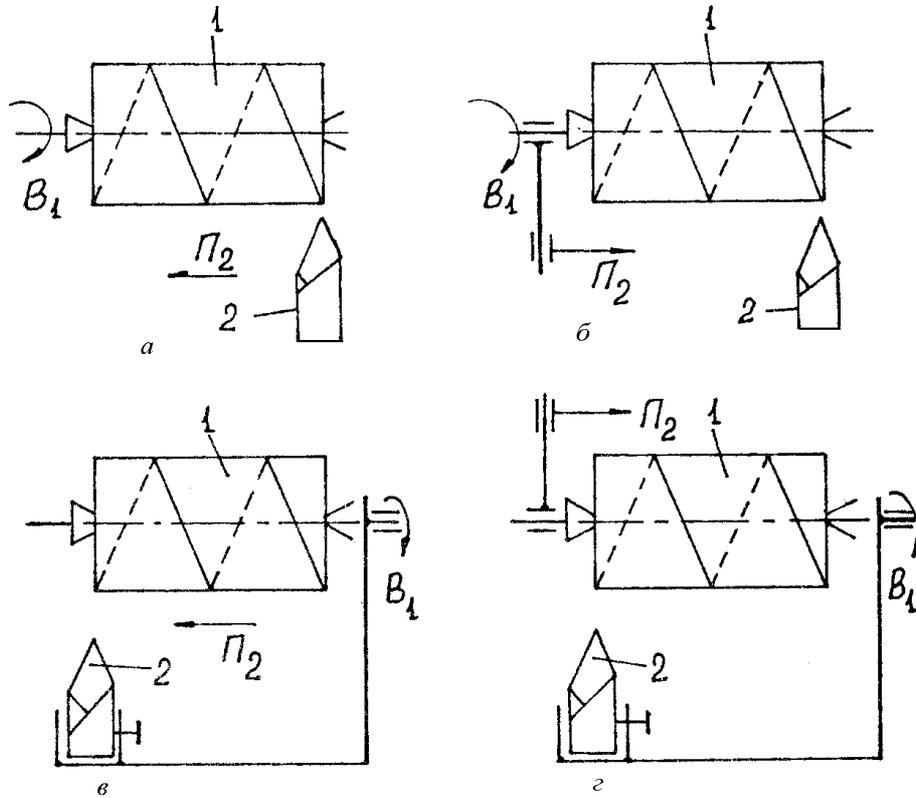


Рис. 5.16. Способы нарезания резьбы резцом

Вместе с тем каждая схема имеет область предпочтительного использования. Так, первая схема (рис. 5.16, а) наиболее распространена в универсальных токарно-винторезных станках, вторая (рис. 5.16, б) положена в основу прецизионных высокоточных станков, третья (рис. 5.16, в) применяется в тяжелых станках, а четвертая (рис. 5.16, г) еще не используется. Причем такое распределение областей предпочтительного использования рассмотренных схем (способов) имеет вполне определенную для каждого конкретного варианта цель, например, возможность создания универсального станка токарной группы, создание специализированного высокоточного резьбообрабатывающего станка или улучшения динамических характеристик специализированного тяжелого станка.

Таким образом, в рассмотренном примере перераспределение движений между заготовкой и инструментом, обеспечивающее достижение дополнительной (производной) цели, позволяют утверждать, что схемы, представ-

ленные на рис. 5.16, б, в, г, иллюстрируют относительно новые способы нарезания резьбы резцом, производные от пионерного способа, представленного схемой 5.16, а. Вполне вероятно, что способы по рис. 5.16, б, в были защищены соответствующими патентами.

Способы нарезания резьбы резцами могут также содержать в своей структуре подсистему стабилизации силового параметра. В этом случае их функция есть множество ${}_1F_S = \{E\}_1, E - H^C, \{(^K M_H \cap ^C M) \cap ^3 M\} \cup ^B M$.

Естественно, подобное схемное перераспределение движений между заготовкой и инструментом возможно также и для других способов формообразующей обработки. При этом чем большее число элементарных движений составляет структуру способа, тем больше возможных технических (схемных) решений.

Из определения способа обработки как целенаправленной S-системы следует, что целенаправленное изменение последовательности приемов или правил их выполнения приводит к созданию новых способов обработки. При этом схема взаимодействия заготовки и инструмента производных способов неразличима со схемой первообразного способа. Вместе с тем производные способы имеют качественно и количественно иную структуру и функцию, что обеспечивает скачкообразное достижение качественно нового эффекта, недостижимого при использовании исходного способа в любой конкретной ситуации. Поэтому названные общие принципы получения новых способов обработки характеризуют вполне определенный уровень различимости способов в пределах конкретных групп S-систем. В этом случае каждый новый способ может иллюстрироваться схемой первообразного способа. Данный тезис подтверждается, например, рассмотренными ранее группой способов зубодолбления с касательным врезанием и группой способов зубодолбления, обеспечивающих устранение явления затирания.

При воспроизведении конкретной геометрической поверхности возможны различные варианты базирования. Например, при нарезании цилиндрического зубчатого колеса в зависимости от длины его ступицы возможны две схемы базирования. Причем воспроизводятся они базирующими подсистемами, имеющими одинаковый коэффициент сложности (рис. 4.3 и табл. 4.2). Аналогично для установки цилиндрической заготовки при токарной обработке возможно использование трех различных базирующих подсистем, имеющих одинаковый коэффициент сложности.

При разработке конкретного технологического процесса выбор комплекта баз из совокупности возможных схем имеет принципиальное значение. Вместе с тем качественные различия отдельных комплектов баз при

одном и том же коэффициенте сложности базирующей подсистемы несущественны с точки зрения структуры и принципа функционирования S-систем. Это позволяет для примеров, аналогичных приведенным, считать варианты базирующей подсистемы, имеющие одинаковый коэффициент сложности неразличимыми в S-системе.

При изложении методики системного описания базирующей подсистемы было показано, что известны способы обработки, в которых частично или полностью функцию базирующей подсистемы выполняет характеристический образ инструмента, что упрощает базирующую подсистему, в частности, уменьшается ее коэффициент сложности. В данном случае изменение структуры базирующей подсистемы существенно с точки зрения структуры и функции S-системы. На этой основе S-системы при одинаковой энергетической и кинематической подсистемах, но при качественно различных базирующих подсистемах, имеющих ту или иную вполне определенную функциональную связь с характеристическим образом инструмента, будем считать различимыми на уровне базирующей подсистемы.

Понятие о различимости способов формообразующей обработки вытекает из определения способа как технической целенаправленной S-системы. Из изложенного также следует, что характер различимости S-систем на разном уровне требует разной детализации системы или составляющих ее подсистем. Например, на высшем уровне, характеризующемся видом физического воздействия, детализация системы, по существу, не требуется. Вместе с тем, например, на уровне изменения правил выполнения отдельных приемов требуется достаточно подробная детализация энергетической или кинематической подсистем для выявления различия между S-системами, представляющими группу способов, для иллюстрации которых используется одна и та же схема взаимодействия инструмента и заготовки. Такой многоуровневый подход к различимости S-систем позволяет применять его при анализе, синтезе и классификации способов формообразующей обработки.

6. КЛАССИФИКАЦИЯ СПОСОБОВ ФОРМООБРАЗУЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ

6.1. Методика классификации

В настоящем параграфе рассматривается возможный вариант общей методики классификации способов формообразующей обработки поверхностей деталей (изделий) различного вида. В основу построения такой схемы положен принцип многоуровневого описания технических систем, при котором на каждом последующем уровне для конкретизации общей схемы включаются новые признаки.

При разработке общей схемы не учитываются размеры получаемых в результате формообразующей обработки поверхностей, а также изменения макро- и микрогеометрии поверхностей и физико-химических свойств поверхностного слоя. Эти характеристики рационально рассматривать при количественном сравнительном анализе по конкретным параметрам качества различных групп способов, охватываемых общей схемой.

В технической литературе понятие метода формообразующей обработки ассоциируется с разрушением, изменением или возникновением связей в твердом теле в процессе обработки. Поэтому различают:

– методы обработки, основанные на удалении части материала с заготовки (механическое резание, физическое, химическое, комбинированное удаление материала), $V_{изд} < V_{заг}$;

– методы обработки, основанные на формоизменении материала заготовки (литье, порошковая металлургия, пластическая деформация, послойный синтез и т. д.), $V_{изд} = V_{заг}$;

– методы обработки, основанные на прибавлении материала к заготовке (наплавка, сварная сборка, склеивание и т. д.), $V_{изд} > V_{заг}$.

В приведенных определениях $V_{изд}$ и $V_{заг}$ – соответственно объем изделия (детали) и заготовки.

По существу в данном определении все многообразие технических решений (идей) в области формообразующей обработки на первом иерархическом уровне состоит из трех групп методов, отличающихся принципом воспроизведения поверхностей. На втором и последующих уровнях каждая группа методов должна конкретизироваться по иным признакам на каждом уровне.

Выделим из общего многообразия способов формообразующей обработки ту ее часть, которая основана на удалении части материала заготовки. Тогда все известные и возможные новые способы обработки, со-

ставляющие эту часть (рис. 6.1) на 2-м уровне будут различаться методом первичного воздействия на заготовку, или видом используемой энергии. На третьем уровне в пределах каждого вида или совокупности видов используемой энергии каждая группа способов разделяется на множества, различающиеся формой воспроизводимой поверхности, а на четвертом уровне – видом используемого инструмента. На пятом уровне в зависимости от вида инструмента и вида используемой энергии многообразие методов обработки разбивается на методы точения, фрезерования, шлифования, зубонарезания, лазерного резания, комбинированной обработки и т. п.

На нескольких последующих подуровнях способы обработки последовательно разбиваются на подгруппы, конкретизированные в пределах соответствующей формы воспроизводимой поверхности. Вероятно, наибольшее число подуровней содержат способы обработки зубчатых поверхностей (рис. 6.2). На первом подуровне эта группа способов делится на способы для обработки поверхностей с круглым и некруглым венцом, на втором – для обработки зубчаток с наружным и внутренним венцом, на третьем – на способы, различающиеся по виду получаемых зубчаток (цилиндрических, конических, плоских, торцовых), на четвертом – на способы, различающиеся формой зуба по длине (с прямым, винтовым, дуговым, червячным зубом).

Теоретически группа способов формообразующей обработки зубчатых поверхностей, характеризующаяся удалением части материала заготовки, при использовании наиболее распространенного вида энергии (механическое резание) должна состоять из 64 подгрупп. В действительности таких подгрупп только 29. Объясняется это тем, что некоторые виды зубчаток непредставимы и, следовательно, не используются в машиностроении. Например, бесполезно торцовое колесо с некруглым или внутренним венцом. То же можно отметить и для зубчатой рейки.

Выше было рассмотрено несколько способов обработки зубчатых колес зуборезным долбяком и червячной фрезой. В частности пионерный способ зубодолбления и предложенный на его основе способ со стабилизацией силового параметра, т. е. с адаптивным управлением. Рассмотрены также относительно новые способ зубодолбления цилиндрических колес с наклонными по делительной окружности зубьями и способ зубофрезерования червячной фрезой таких же колес, признанные изобретениями (патенты Республики Беларусь).

На рис. 6.3 приведены подуровни пятого уровня разбиения, позволяющие определить и классифицировать все возможные подгруппы способов формообразующей обработки винтовых поверхностей (ВП) при резании. На первом подуровне эта группа способов делится на способы для обработки внутренних и наружных ВП, на втором – для обработки цилинд-

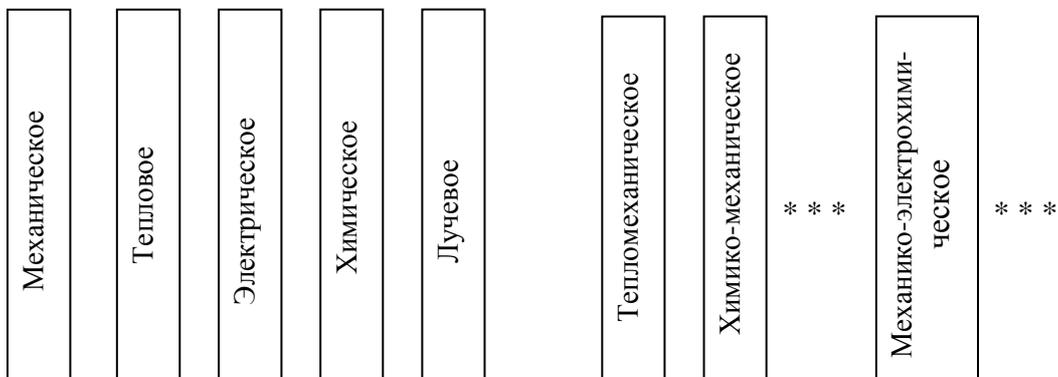
рических, конических и торцовых ВП, на третьем – на способы для обработки ВП, с постоянным и переменным шагом. Теоретически возможны 12 подгрупп. В действительности таких подгрупп только 10, так как наружные и внутренние торцовые поверхности неразличимы.

Многообразие способов формообразующей обработки при $V_{изд} < V_{заг}$

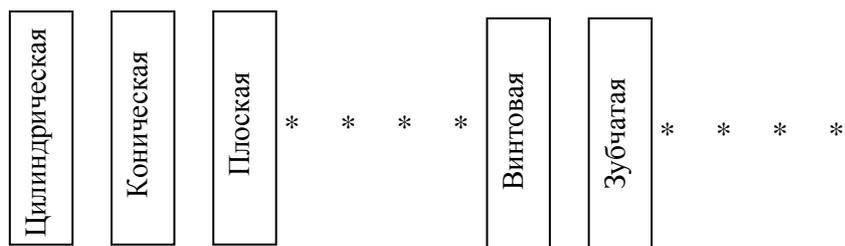
1-й уровень – принцип воспроизведения поверхности

Удаление вещества с заготовки

2-й уровень – методы первичного воздействия на заготовку



3-й уровень – форма воспроизводимой поверхности



4-й уровень – вид инструмента

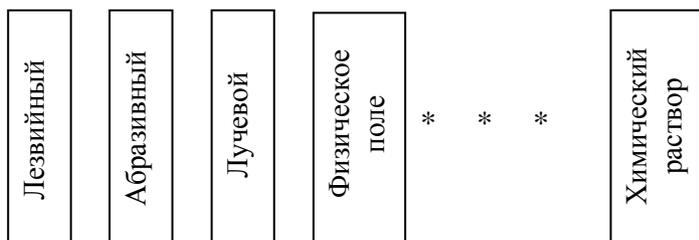


Рис. 6.1. Схема классификации способов формообразующей обработки при удалении части материала заготовки

Способы формообразующей обработки
зубчатых поверхностей (ЗП)

Подуровень 5.1

ЗП с круглым венцом

ЗП с некруглым венцом

Подуровень 5.2

ЗП с наружным венцом

ЗП с внутренним венцом

Подуровень 5.3

Цилиндрические
ЗП

Конические
ЗП

Плоские ЗП
(рейки)

Торцовые
ЗП

Подуровень 5.4

ЗП с прямыми
зубьями

ЗП с винтовыми
зубьями

ЗП с дугowymi
зубьями

ЗП с червячными
зубьями

Рис. 6.2. Схема классификации способов формообразующей обработки зубчатых колес

Аналогично можно рассматривать подгруппы способов формообразующей обработки, входящие в другие группы пятого уровня. Сочетая группы и подгруппы этого уровня разбиения с признаками предшествующих уровней, получим все возможные группы и подгруппы способов формообразующей обработки. Элементарный подсчет показывает, что таких подгрупп несколько тысяч. Полученные таким образом подгруппы представляют собой минимальные подсистемы способов формообразующей обработки. Каждая из них описывается строго определенным набором признаков, определяющих характер воспроизведения поверхностей определенной формы при условии использования конкретного вида или видов первичного воздействия на заготовку. Каждая подгруппа включает все из-

вестные и возможные новые способы формообразующей обработки, различающиеся между собой структурой и функцией. Отметим также, что уровень развития подгрупп различен. Например, по патентным источникам информации известно большое многообразие способов формообразующей обработки механическим резанием поверхностей различного вида. Отсюда высокий уровень развития соответствующих групп и составляющих их подгрупп. Вместе с тем в патентной и технической литературе минимум информации о способах получения реальных изделий посредством формоизменения вещества заготовки с использованием управляемых физических полей и потоков энергии.

Способы формообразующей обработки
Винтовых поверхностей (ВП)

Подуровень 5.1

Внутренние ВП
(гайки)

Наружные ВП
(винты)

Подуровень 5.2

Цилиндрические
ВП

Конические
ВП

Торцовые
ВП

Подуровень 5.3

ВП с постоянным
шагом

ВП с переменным
шагом

Рис. 6.3. Схема классификации способов формообразующей обработки винтовых поверхностей

Ниже в качестве примера рассматривается классификация пионерных (первообразных) способов формообразующей обработки резанием прямозубых цилиндрических колес.

6.2. Структурный анализ и классификация пионерных способов обработки резанием прямозубых цилиндрических колес

В основу известных к настоящему времени способов обработки зубчатых колес положен один из следующих методов профилирования их зубьев.

Метод копирования, при котором профиль впадины нарезаемого колеса представляет точную копию профиля зуба инструмента. В этом случае для нарезания цилиндрических зубчатых колес с прямыми зубьями используют пальцевые и дисковые модульные фрезы и контурные зубодолбежные головки.

Метод центроидного обкатывания, при котором центроиды инструмента и нарезаемого колеса обкатываются без скольжения. Профиль нарезаемых зубьев получается как огибающая различных положений режущих кромок. В качестве инструмента в этом случае применяют зуборезные гребенки, червячные фрезы и долбяки.

Метод бесцентроидного обкатывания, при котором профиль нарезаемых зубьев получается как огибающая различных положений режущих кромок инструмента, но в процессе нарезания центроиды инструмента и нарезаемого колеса отсутствуют. При обработке прямозубых цилиндрических колес этот метод профилирования еще не получил распространения.

Схемы пионерных способов обработки прямозубых цилиндрических колес, созданные в разное время на основе первых двух методов приведены в табл. 6.1 в порядке возрастания темпа образования воспроизводящих линий.

Рассматриваемая подгруппа способов характеризуется использованием одного вида энергетического воздействия на твердое тело. При механическом резании функцию энергетической подсистемы выполняет кинематическая подсистема. Поэтому для всех способов подгруппы критерий сложности энергетической подсистемы равен нулю. При качественно различной длине ступицы нарезаемого колеса возможны две схемы базирования. Поэтому для каждого способа анализируемой подгруппы возможны два варианта базирования, т. е. два варианта базирующей подсистемы. Конечное множество отношений между базами и характеристическим образом инструмента для обоих вариантов базирования равно нулю. Следовательно, критерий сложности базирующей подсистемы для всех способов подгруппы равен трем. Тогда общий критерий сложности рассматриваемых способов обработки будет равен сумме критериев сложности кинематической и базирующей подсистем.

Схема 1 иллюстрирует способ долбления зубчатого колеса 1 зубо-резной гребенкой 2. Способ осуществляется при условии, если число зубьев гребенки больше числа зубьев нарезаемого колеса. В этом случае характеристический образ инструмента имеет вид:

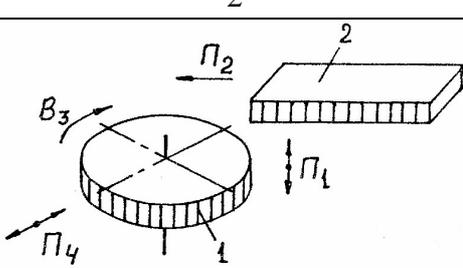
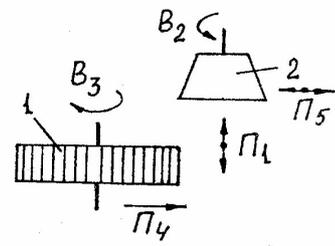
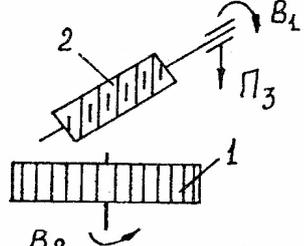
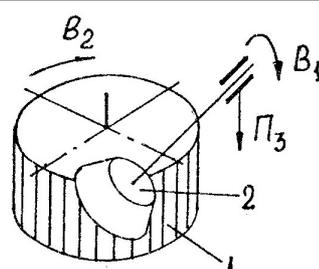
$$P = \{M_{\mathcal{E}}\}_K, \quad (k > Z),$$

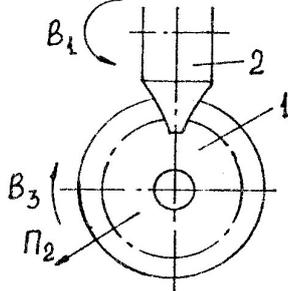
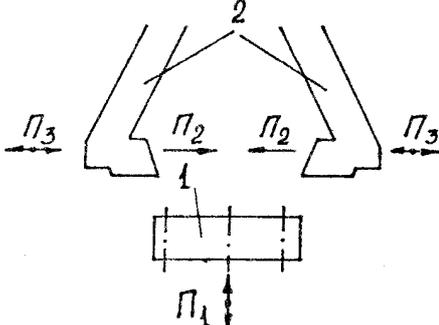
где k – число зубьев гребенки;

Z – число зубьев нарезаемого колеса.

Таблица 6.1

Классификация пионерных способов обработки резанием цилиндрических прямозубых колес

Но- мер схемы	Схема способа формообразующей обработки зубчатой поверхности	Класс образования поверхности	Критерий сложности
1	2	3	4
1		$H^C - H^K$	10
2		$H^C - H^K$	12
3		$H^C - H^K$	8
4		$H^K - H^C$	8

1	2	3	4
5		E – П	9
6		E – H ^C	9

При долблении образующая – прямая, параллельная оси заготовки – воспроизводится движением Π_1 , а направляющая – линия, очерчивающая профиль колеса – сложным движением обката $\Pi_2 B_3$. Класс образования зубчатой поверхности ($H^C - H^K$). При долблении заготовке сообщают также вспомогательное движение Π^A , предназначенное для ее отвода от гребенки при свободном ходе последней.

Критерий сложности кинематической подсистемы равен 7, а общий критерий сложности способа – 10.

Описанный способ используется главным образом в станках для обработки мелко- и среднемодульных зубчатых колес с небольшим числом зубьев. На базе этого способа создан еще один способ, позволяющий короткой гребенкой с малым числом зубьев нарезать крупномодульные зубчатые колеса с большим числом зубьев. Характеристический образ короткой гребенки $P = \{M_{\text{Э}}\}_K$, ($K \ll Z$).

На тяжелых зубообрабатывающих станках используются гребенки, у которых $K = 3$. По этому способу, по сравнению с первообразным, гребенке дополнительно после прорезки одной впадины сообщают движение деления на один зуб, что усложняет кинематическую структуру способа. Однако такое усложнение обеспечивает повышение точности обработки зубчатых колес.

Схема 2 иллюстрирует классический способ зубодолбления, используемый в большинстве зубодолбежных станков. Подробное описание данного способа приведено в пункте 2.1.

Схема 3 иллюстрирует способ зубофрезерования прямозубых колес червячной фрезой, положенный в основу большинства зубофрезерных станков.

При зубофрезеровании образующая – линия профиля зубьев колеса – воспроизводится движением обката B_1B_2 , состоящим из двух согласованных движений – вращения B_1 фрезы 2 и вращения B_2 заготовки 1, а направляющая – прямая, параллельная оси колеса – движение $П_3$ фрезы. Класс образования поверхности ($H^K - П$).

Критерий сложности кинематической подсистемы равен 5, а общий критерий сложности способа – 8.

На схеме 4 показан способ зуботочения заготовки 1 чашечным резцом 2. Подробное описание этого способа изложено выше.

Класс образования поверхности ($H^K - H^C$). Критерий сложности кинематической подсистемы равен 5, а общий критерий сложности – 8.

После изобретения способа зуботочения на первом этапе оценки его возможностей утверждалось, что зуботочение позволит постепенно отказаться от зубодолбления. В пользу зуботочения приводился довод о том, что этот процесс более производительен, так как инструмент при образовании формы зуба по длине совершает поступательное, а не поступательно-возвратное, как при зубодолблении. Отмечалось, что процесс зуботочения не требует движения врезания и, следовательно, проще зубодолбления. Однако дальнейшие исследования показали, что зуботочение имеет и недостатки. В частности, оно существенно уступает зубодолблению в универсальности.

Схема 5 иллюстрирует способ фрезерования колес модульной фрезой. При фрезеровании образующая – линия профиля впадины нарезаемого колеса 1 – воспроизводится зеркальным отображением профиля режущих зубьев фрезы 2, т. е. копированием, а направляющая – прямая, определяющая форму зуба по длине – составным движением, состоящим из двух элементарных – вращения B_1 фрезы и подачи $П_2$ заготовки. Для прорезки каждой последующей впадины периодически последовательно с составным движением осуществляют движение деления B_3 .

Класс образования поверхности ($E - П$). Критерий сложности кинематической подсистемы равен 6, а общий критерий сложности – 9.

Способ фрезерования модульной фрезой непроизводителен и не обеспечивает требуемой в настоящее время точности. Поэтому используется главным образом в ремонтном производстве.

На схеме 6 показан способ контурного зубодолбления одновременно всех впадин колеса 1 резцами 2, собранными в долбежную головку. По этому способу одновременно обрабатываются все впадины колеса. При этом образующая – линия профиля впадин – воспроизводится зеркальным отображением профиля резцов, а направляющая – прямая, определяющая форму зуба по длине – поступательно-возвратным движением $П_1$ заготовки 1 нарезаемого колеса. При долблении резцы 2 получают также подачу врезания $П_2$ и движение «отскока» $П_3$ для устранения затирания резцов о заготовку при ее обратном ходе в движении $П_1$.

Класс образования поверхности ($E - H^C$). Критерий сложности кинематической подсистемы равен 6, а общий критерий сложности – 9.

По производительности контурное зубодолбление превосходит все другие способы зубообработки. Недостаточное распространение данного способа объясняется большой конструктивной сложностью инструмента и относительно узкой специализацией, поэтому он используется только в крупносерийном и массовом производстве зубчатых колес.

В табл. 6.1 включены наиболее известные пионерные способы формообразующей обработки прямозубых цилиндрических колес. Вместе с тем любому иному пионерному способу как известному, так и возможному новому в соответствии с общей схемой классификации отводится вполне определенное место в подгруппе по признаку возрастания темпа воспроизведения воспроизводящих линий получаемого зубчатого колеса.

6.3. Критерии сравнительной оценки способов формообразующей обработки

Системология как точная наука предполагает возможность сравнения принципов, методов и способов обработки на основе наиболее общих критериев. Будем считать первым таким критерием сложность S-системы, сформулированный на основе методики морфологического (структурного) описания способов обработки. Данный критерий носит всеобщий характер и не зависит от принципа обработки и вида используемой энергии. Применение критерия сложности для сравнения различных способов обработки наиболее рационально в пределах конкретного вида обработки или в пределах близких по своей природе видов. Например, сравнение способов зубофрезерования червячными фрезами цилиндрических зубчатых колес или сравнение способов, составляющих данный вид обработки со способами зубодолбления, составляющими по своей сущности близкий вид обработки – обкатное зубодолбление.

Другим всеобщим критерием является энергоемкость. Однако этот критерий приемлем только на уровне сравнения принципов и методов обработки.

Как известно, наиболее полными показателями эффективности любого технологического процесса являются производительность и стоимость обработки деталей требуемого качества. Следовательно, сравнительный анализ должен давать ответ в виде отношений основного и штучного времени, а также стоимости операций. Последнее невозможно при сравнении способов обработки, так как их невозможно характеризовать стоимостью единицы времени работы технологической машины. Сформулируем на основе понятия производительности технологического процесса соответствующие критерии для сравнения способов формообразующей обработки.

Основное время цикла функционирования S-системы по аналогии с выполнением перехода технологической операции выражается в общем случае уравнением:

$$t_0 = \frac{L}{s n},$$

где L – длина поверхности;

s – подача;

n – круговая частота вращения заготовки.

Выражая подачу через расчетную высоту микронеровностей, а круговую частоту через скорость обработки, получим зависимость вида:

$$t_0 = \frac{1}{R_z v} f(A),$$

где R_z – высота неровностей;

v – скорость обработки (скорость резания);

A – геометрические параметры детали и инструмента.

От основного времени можно перейти к штучному времени, которое в общем случае определяется выражением:

$$t_{um} = t_0 + t_e,$$

где t_e – вспомогательное время, затрачиваемое на движения, предшествующие формообразующим.

При нормировании технологических операций в штучное время входит также дополнительное время, затрачиваемое на обслуживание рабочего места. Обычно это время составляет 6 – 8 % от t_{um} . Способ обработки – это техническая идея. Поэтому данная составляющая при оценке производительности S-систем не имеет смысла.

Выражения для t_0 и t_{um} по существу определяют производительность способов обработки по времени формообразования поверхности и по времени цикла функционирования при условии достижения конкретного теоретического уровня качества поверхности.

Отношение времени формообразования одним способом к времени формообразования той же поверхности другим способом может быть выражено в виде непрерывной функции параметров процесса:

$$\frac{t_{01}}{t_{02}} = \frac{v_1}{v_2} f(B, C, D \dots).$$

От отношения времени формообразования можно перейти к отношению времени цикла:

$$\frac{t_{um1}}{t_{um2}} = \frac{t_{01} + t_{e1}}{t_{02} + t_{e2}}.$$

Будем считать полученные выражения критериями относительной производительности по времени формообразования (ПФ) и по времени цикла функционирования (ПЦ) способов обработки. Данные критерии также как и критерии сложности носят всеобщий характер.

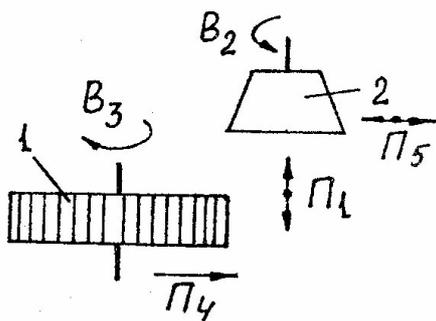
Для обеспечения максимально возможной точности при сравнении способов обработки по производительности скорость обработки, например, скорость резания необходимо задавать или усредненно по нормативным данным, или по достигнутому уровню.

6.4. Методика составления банка данных о способах формообразующей обработки

Одной из конечных целей любой частной системологии является создание банка данных о систематизируемых объектах. Изложенные выше принципы многоуровневой классификации способов формообразующей обработки определяют основы формирования такого банка. Из структурного анализа, произвольно выбранных способов обработки, следует, что максимальная информация о любой S-системе (способе формообразующей обработки) должна быть сосредоточена во фрагменте, содержащем результаты системного анализа этого объекта. Фрагмент может быть выполнен или в виде отдельной информационной карты, или в виде кадра, соответствующего файла, хранящегося в памяти компьютера. Первый фрагмент должен содержать последовательность кадров, описывающих пионерные (первообразные) способы обработки поверхностей одного вида различными инструментами с соответствующими комментариями. Табл. 6.1 (и комментарии к ней) по су-

шеству является первым фрагментом для многообразия способов обработки цилиндрических зубчатых колес. Комментарий должен содержать также информацию, например, в виде графиков сравнения производительности пионерных способов обработки по критериям ПФ и ПЦ. Последующие фрагменты должны содержать кадры с информацией о всех известных S-системах, образующих развивающееся многообразие способов обработки поверхностей одного вида, начиная с пионерного или первообразного способа.

В предшествующих разделах приведен анализ большинства известных способов зубодолбления на основе общеметодологических принципов системологии и ряда гипотез, объясняющих некоторые физические явления в среде (зоне) долбления (резания). Полученных при этом данных достаточно для формирования банка данных об анализируемом виде зубообработки. На рис. 6.4 представлен фрагмент банка данных, описывающий пионерный способ обкатного зубодолбления. Здесь Н – название способа обработки; Ц – цель создания способа; И – первоисточник информации.



(Н) – способ нарезания зубчатых колес в условиях обката.

(Ц) – получение цилиндрической зубчатой поверхности.

(И) – Ф. Гир-Шепер. Зубодолбежный станок. – М.: 1914.

$$P = \{M_3\}_{Zu}; H^C - H^K.$$

$${}_1S_s^K M \cap {}^3M \cup {}^B M.$$

$$C_s = (C_k = 9) + (C_3 = 0) + (C_6 = 3) = 12.$$

$${}^K M = (J \cup E)_O \cup (J \cup E)_H \cup (J \cup E)_{Bp} \cup (J \cup E)_{Bc}.$$

$${}^K F = \{\{\Phi_V(\uparrow \Pi_1), /Bc(\uparrow \Pi_3)\}, \Phi_S(B_2 B_3), Bp(\Pi_4)\}.$$

$${}^6 M = \cup {}^6 M_i.$$

Рис. 6.4. Фрагмент банка данных: пионерный способ обкатного зубодолбления

Пионерный способ формообразующей обработки, как правило, скачкообразно открывает относительно новое направление в развитии конкретной области производства. В частности рассмотренный пионерный способ обкатного зубодолбления длительное время доминировал в области производства зубодолбежных станков. По мере накопления практического и научного опыта на его основе были разработаны на уровне изобретений производные способы, обеспечивающие достижение дополнительных (производных) целей. Например, повышение качества получаемых зубчатых поверхностей, повышение периода размерной стойкости инструмента, повышение производительности зубонарезания, получение колес с винтовыми

(косыми) зубьями, обработка цилиндрических колес с наклонными по делительной окружности зубьями и т. д. Ряд производных способов зубодолбления, например, зубодолбление колес с винтовым зубом, многопроходное зубодолбление со спиральным врезанием и др., в настоящее время реализованы в зубодолбежных станках станкостроительных фирм-законодателей в этой отрасли станкостроения.

(Н) – способ нарезания зубчатых колес в условиях обката.

(Ц) – получение цилиндрической зубчатой поверхности с наклонными по делительной окружности зубьями.

(И) – Патент 3343 (ВУ).

$$P = \{M_{\mathcal{E}}\}_{z_i}; H^C - H^K.$$

$${}_1S_s = {}^K M \cap {}^{\mathcal{E}} M \cup {}^B M.$$

$$C_s = (C_k = 8) + (C_s = 0) + (C_{\sigma} = 3) = 11.$$

$${}^K M = [(JJ \cup E)_{\Phi} \cap (J \cup E)_{Bc}]_O \cup \\ \cup (JJ \cup E)_H \cup (J \cup E)_{Bp}.$$

$${}^K F = \{ \{M_{\mathcal{E}}\}_K, H^C - H^K, \Phi_O[\downarrow \Pi_1(\downarrow \Pi_2 \cap \\ \cap \downarrow \Pi_3)], \Phi_H(B_5 B_6), Bp(\Pi_4).$$

$$l = L \operatorname{tg} \varphi.$$

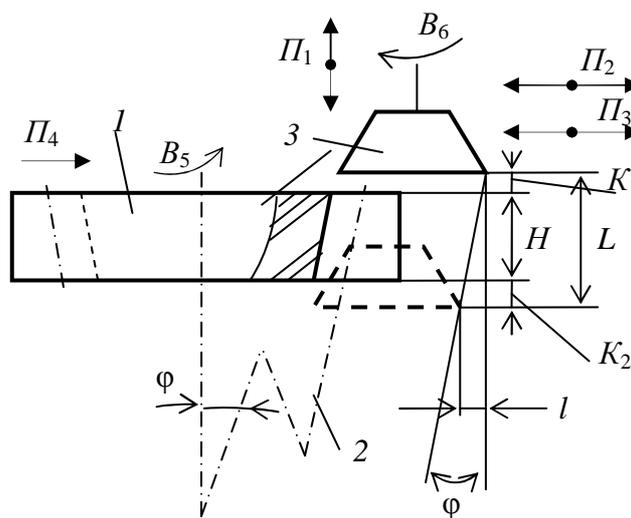


Рис. 6.5. Фрагмент банка данных: производный n -ный способ обкатного зубодолбления

На основе практически любого пионерного способа возможно также появление относительно нового способа обработки, открывающего новый ряд технических решений. Например, на основе рассмотренного пионерного способа зубодолбления был предложен способ зубодолбления с касательным врезанием (рис. 2.6). В настоящей работе такие способы формообразующей обработки названы первообразными.

Для повышения информативности фрагменты банка данных для первообразных и производных способов обработки должны также содержать библиографическую информацию о пионерном или первообразном способе, используемом в качестве прототипа. Целесообразно также включение дополнительных иллюстраций, отображающих дополнительную цель, обеспечиваемую описываемым способом.

На рис. 6.5 представлен фрагмент банка данных, описывающий производный способ обкатного зубодолбления.

7. РЕАЛИЗАЦИЯ СПОСОБОВ ФОРМООБРАЗУЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ В СТРУКТУРЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН

В основу любой технологической машины, предназначенной для получения деталей заданной геометрической формы и размеров с требуемыми физико-механическими свойствами, положен вполне определенный способ или группа однотипных способов формообразующей обработки, различающихся преимущественно только последовательностью и правилами выполнения отдельных приемов. С точки зрения теории технических систем технологическую машину можно рассматривать в виде объединения кинематической структуры, системы управления и компоновки (несущей системы). Однако первичной базой большинства конструкций технологических машин является кинематическая структура, так как назначение такой машины – создание относительных движений инструмента и заготовки, необходимых для получения заданных поверхностей на твердом теле. Несмотря на разнообразие технологических машин, предназначенных для выполнения не только различных, но и однотипных технологических операций, кинематическая структура любой из них базируется на ряде основных, достаточно общих, кинематических закономерностей, присущих всем машинам. В конструкции машины кинематическая структура выражается кинематической схемой. Развитость ее зависит, в первую очередь, как от сложности воспроизводимой поверхности, так и от количества используемых источников энергии движения. Современная тенденция – использование не только в каждой кинематической группе, но и для каждого исполнительного органа отдельного электродвигателя, что обеспечивает сокращение количества передач в кинематических цепях и, как следствие, повышение кинематической точности и снижение шумовых характеристик технологического оборудования. Применение отдельных приводов обусловлено также развитием систем управления на базе электронной техники, в частности, систем ЧПУ и систем непосредственного компьютерного управления.

Среди многообразия технологических машин наиболее значительный класс, как по количеству, так и по разнообразию вариантов и развитости кинематической структуры составляют металлорежущие станки.

Одним из свойств способа формообразующей обработки является промышленное применение, под которым в НТЭ изобретений понимается реализация способа в соответствующей технологической машине, в частности, в металлорежущем станке. Поэтому ниже будет рассмотрена кинематическая структура ряда зубообрабатывающих станков, в основу которых положены соответствующие способы зубообработки, рассмотренные в предшествующих разделах.

7.1. Зубодолбежный станок для нарезания цилиндрических колес с наклонными по делительной окружности зубьями

Выше (рис. 5.11) рассмотрен способ долбления цилиндрических колес с наклонными по делительной окружности зубьями. На рис. 7.1 представлена частная структура зубодолбежного станка по патенту 3343 (ВУ), реализующего названный способ формообразующей обработки.

В суппорте 3 смонтирована с возможностью поступательно-возвратного движения гильза 4, в которой установлен шпиндель 1, несущий долбяк. Суппорт закреплен на стойке 20 с обеспечением качательного движения относительно оси червяка делительной передачи 10 шпинделя 1. Качательное движение шпинделя осуществляется кулачковым механизмом, включающим кулачок 14, толкатель 13, соединенный шарниром 12 с суппортом 3, и пружину, обеспечивающую силовое замыкание. Кулачок 14 кинематически связан посредством передач 15 и 16 с ведущим звеном 18 (приводной вал станка) кулисного механизма 2 привода поступательно-возвратного движения гильзы 4. Источником энергии для кулисного механизма является электродвигатель M_1 , соединенный посредством передач 19 и 17 с приводным валом. Червяк делительной передачи 10 шпинделя 1 посредством настраиваемой расчетной цепи обката (внутренняя связь группы обката), содержащей органа настройки i_x соединен с делительной передачей 8 делительного стола 6, на котором устанавливаются обрабатываемые заготовки 5. Привод круговых подач осуществляется электродвигателем M_2 , кинематически связанным через орган настройки i_s и передачу 11 с цепью обката. В приводе радиального врезания на высоту зуба, нарезаемого колеса, используется гидроцилиндр 9.

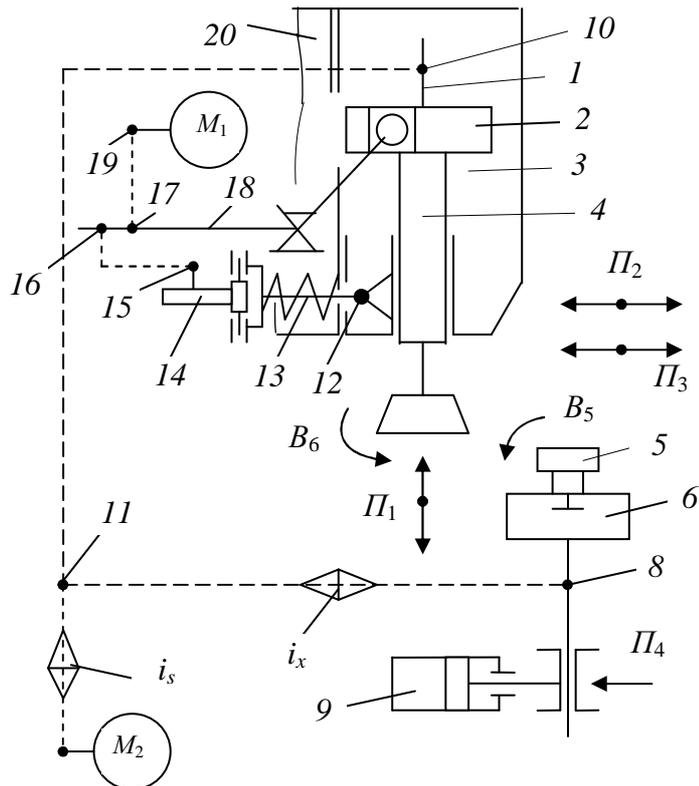


Рис. 7.1. Кинематико-компоновочная структура зубодолбежного станка

В приводе радиального врезания на высоту зуба, нарезаемого колеса, используется гидроцилиндр 9.

Кулачок (рис. 7.2) кулачкового механизма имеет форму диска с отверстием для его установки на станке. Рабочий профиль кулачка выполнен в виде двух дуг 1 и 3, разделенных переходными кривыми 2 и 4. Дуги 1 и 3 выполнены по архимедовой спирали. При указанном направлении вращения кулачка дуга 1 соответствует движению резания в поступательно-возвратном движении долбяка Π_1 , а дуга 3 – его возвратному движению. При этом конечный радиус R_2 дуги 1 больше ее начального радиуса R_1 , а конечный радиус R_4 дуги 3 меньше ее начального радиуса R_3 . Разности радиусов для обеих дуг одинаковы и равны пути l дополнительного движения Π_2 долбяка. Следовательно: $(R_2 - R_1) = (R_3 - R_4) = l$.

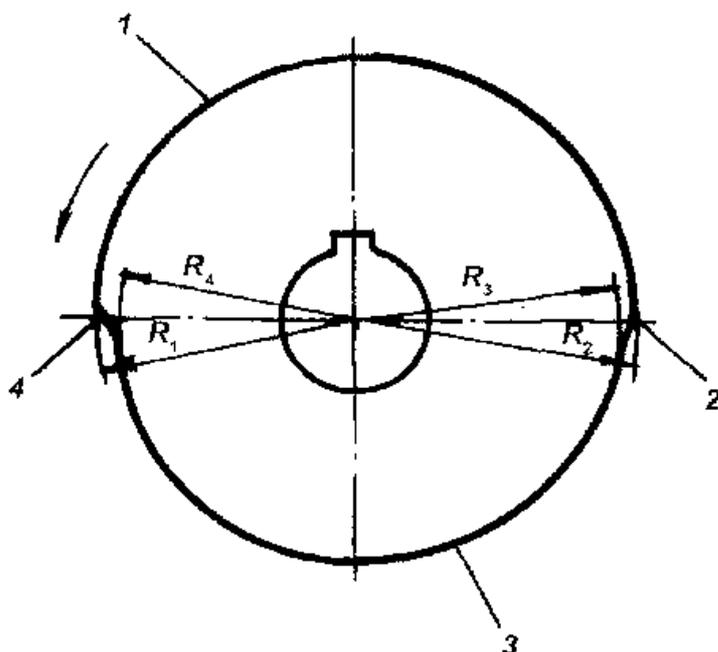


Рис. 7.2. Кулачок – орган настройки на траекторию движения $\Phi_v(\Pi_1\Pi_2)$

Таким образом, разности радиусов $(R_2 - R_1)$ и $(R_3 - R_4)$ равны пути дополнительного радиально-равномерного перемещения долбяка в движении Π_2 . Переходные кривые 2 и 4 выполнены в виде дуг окружности, радиус которой соответствует радиусу ролика толкателя кулачкового механизма. Разности радиусов $(R_1 - R_4)$ и $(R_2 - R_3)$ равны пути отвода («отскока») долбяка в движении Π_3 . Следовательно, при приведенном выполнении кулачка

его профиль, как жесткий, физический программноноситель несет информацию о двух элементарных движениях Π_2 и Π_3 , которые в соответствии с описанным ранее способом зубодолбления должны осуществляться синхронно и синфазно с движением Π_1 . Причем движение Π_2 совместно с движением Π_1 образует сложное формообразующее движение $\Phi_v(\Pi_1\Pi_2)$, воспроизводящее линию зуба нарезаемого колеса по делительному конусу.

Формообразующее движение $\Phi_v(\Pi_1\Pi_2)$ в кинематической структуре станка воспроизводится кинематической группой того же названия. Эта группа воспроизводит образующую зубчатого колеса – линию зуба.

Ее внутренняя связь: $П_1 \rightarrow$ гильза 4 \rightarrow кулисный механизм 2 \rightarrow приводной вал 18 \rightarrow передача 16 \rightarrow передача 15 \rightarrow кулачок (орган настройки i_x) \rightarrow толкатель 13 \rightarrow шарнир 12 \rightarrow суппорт 3 \rightarrow $П_2$.

Внешняя связь: $M_1 \rightarrow$ передача 19 \rightarrow передача 17 \rightarrow приводной вал 18 (звено соединения связей).

Группа настраивается на траекторию кулачком 14, на скорость, путь и исходную точку – органами настройки базового станка.

Группа обката $\Phi_s(B_5B_6)$ воспроизводит направляющую зубчатого колеса – профиль зубьев.

Ее внутренняя связь: $B_6 \rightarrow$ шпиндель 1 \rightarrow передача 10 \rightarrow передача 11 \rightarrow $i_y \rightarrow$ делительный стол 5 \rightarrow B_5 .

Внешняя связь: $M_2 \rightarrow i_s \rightarrow$ передача 11 (звено соединения связей).

Группа настраивается на траекторию и скорость так же, как аналогичная группа базового станка.

Группа врезания $Vp(П_4)$ долбяка на высоту зуба имеет простую структуру.

Ее внутренняя связь: направляющие станины \rightarrow продольный стол, несущий делительный стол б.

Внешняя связь: гидроцилиндр 9 \rightarrow продольный стол (звено соединения связей).

Группа настраивается на скорость, путь и исходную точку – органами настройки базового станка.

В структуре станка нет группы $Vc(П_3)$. Функцию движения $П_3$ отвода долбяка при его возвратном ходе в движении $П_1$ выполняет группа $\Phi_v(П_1П_2)$ за счет формы рабочего профиля кулачка кулачкового механизма.

Станок работает следующим образом. Заготовка 5 устанавливается на делительном столе б. Затем включается электродвигатель M_1 , сообщая вращательное движение приводному валу 18. От этого вала долбяк получает поступательно-возвратное движение $П_1$ и синхронно с ним посредством кулачкового механизма – поступательно-возвратное радиальное движение, представляющее собой геометрическую сумму дополнительного равномерного движения $П_2$ и поступательно-возвратного движения $П_3$ подвода – отвода долбяка на участках верхнего и нижнего перебегов. В итоге долбяк совершает поступательно-возвратное движение по траектории в виде прямой, наклоненной к оси заготовки на угол, равный углу наклона зубьев колеса. При включении электродвигателя M_2 долбяку и делительному столу с заготовкой сообщается движение обката со скоростью круговой подачи, состоящее из согласованных вращений B_5 делительного

стола и B_6 долбяка. Движение обката обеспечивает воспроизведение профиля зубьев колеса. Одновременно на этапе врезания на высоту зубьев делительному столу сообщается движение $П_4$ посредством гидроцилиндра 9. По окончании этапа врезания в течение полного оборота делительного стола выполняется профилирование цилиндрического зубчатого колеса с наклонными по делительному конусу зубьями.

При выполнении кулачкового механизма со сменным кулачком на станке можно обрабатывать цилиндрические зубчатые колеса с различными углами наклона зубьев при соответствующим профилировании сменных кулачков. В кулачковом механизме можно использовать также кулачек, у которого дуги 1 и 3 (рис. 7.2) рабочего профиля имеют иную форму. Это позволяет нарезать зубчатые колеса с бочкообразными зубьями. А при использовании кулачка, у которого рабочие профили выполнены в виде дуг окружностей, можно нарезать традиционные зубчатые колеса с линией на делительном цилиндре. В этом случае сложная формообразующая группа $\Phi_v(П_1П_2)$ преобразуется в простую $\Phi_v(П_1)$. Одновременно образуется группа отвода – подвода долбяка $Вс(П_3)$, обеспечивающая отвод долбяка при его возвратном ходе в движении $П_1$.

Рассмотренная схема может быть использована при модернизации современных зубодолбежных станков для расширения их универсальности. Ее можно также использовать при проектировании станков с ЧПУ, так как группа $\Phi_v(П_1П_2)$, воспроизводящая линию зуба колеса по делительному конусу, в этом случае не изменяется.

7.2. Зубофрезерные станки для нарезания цилиндрических колес с наклонными зубьями

На рис. 7.3 приведена структурная схема зубофрезерного станка по патенту 6134 (ВУ), реализующего описанный выше (рис. 4.12) способ фрезерования червячной фрезой цилиндрических колес с наклонными зубьями. Кинематическая структура станка с механическими связями включает двухэлементарные группы $\Phi_v(B_1B_2)$ и $\Phi_s(П_3П_4)$, связанные между собой общим электродвигателем.

Группа скорости резания воспроизводит образующую (профиль зубьев).

Ее внутренняя связь: $B_1 \rightarrow$ шпиндель 1 фрезы $2 \rightarrow 3 \rightarrow i_x \rightarrow 4 \rightarrow$ делительный стол 5, несущий заготовку $6 \rightarrow B_2$.

Внешняя связь: $M \rightarrow i_v \rightarrow 3$ (звено соединения связей).

Группа настраивается на траекторию и скорость (резания) – органами настройки i_x и i_v соответственно.

Группа подачи воспроизводит направляющую (линию зуба).

Ее внутренняя связь: $\Pi_3 \rightarrow$ суппорт 7 фрезы \rightarrow тяговый вал 12 \rightarrow муфта 11 \rightarrow 10 \rightarrow муфта 9 $\rightarrow i_y \rightarrow$ тяговый вал 8 $\rightarrow \Pi_4$.

Внешняя связь: $M \rightarrow i_v \rightarrow 3 \rightarrow i_x \rightarrow 4 \rightarrow i_s \rightarrow 10$ (звено соединения связей).

Группа настраивается на траекторию и скорость (подачи) – органами настройки i_y и i_s соответственно; на путь и исходное положение по упорам системы управления.

В станках с механическими связями органы настройки на траекторию обоих формообразующих движений и органы настройки на скорость резания и подачи, как правило, выполняют в виде гитар сменных зубчатых колес. Формулы настройки для органов настройки

на траектории формообразующих движений выводятся на основе расчетных перемещений, приведенных при обсуждении способа зубофрезерования, а формулы настройки для органов настройки на скорость резания и подачу выводятся на основе правил, принятых для зубофрезерных станков.

Станок работает следующим образом. По циклу обработки после установки заготовки на делительном столе включается электродвигатель M . Движение от электродвигателя по внешней связи группы скорости резания через звено соединения связей 3 сообщается во внутреннюю связь этой группы. В итоге шпиндель фрезы 2 получает вращательное движение B_1 скорости резания. Одновременно делительный стол 5, несущий заготовку 6 получает вращательное движение B_2 , согласованное с движением B_1 . Согласованные движения B_1 и B_2 воспроизводят профиль зубчатого венца. Затем после включения муфт 9 и 11 движение от электродвигателя M по внешней связи группы подачи через звено соединения связей 10 сообщается во внутреннюю связь этой группы. В итоге суппорт 7 фрезы получает два согласованных между собой движения: продольной подачи Π_3 и ради-

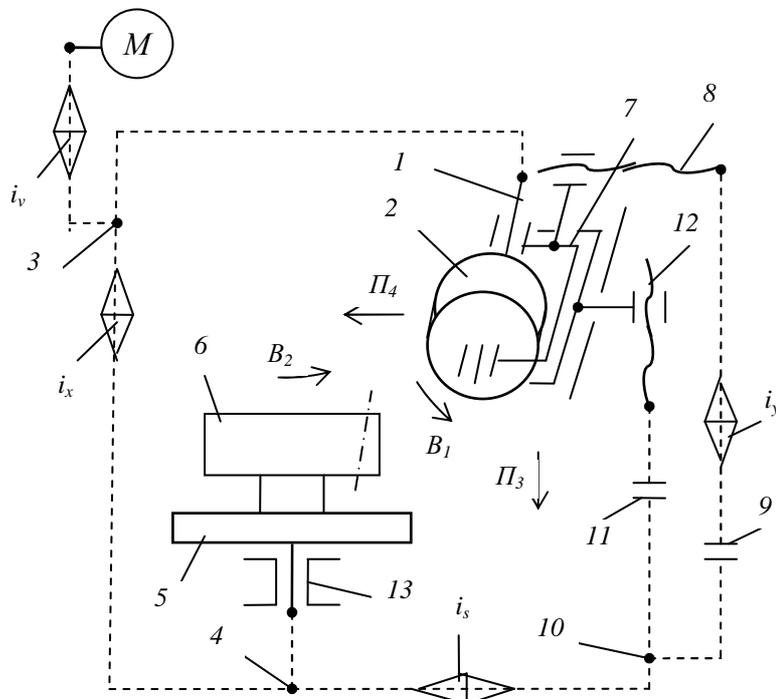


Рис. 7.3. Структурная схема зубофрезерного станка для обработки колес с наклонными зубьями

альной подачи P_4 . В результате профиль каждого зуба будет воспроизводиться по линии зуба, представляющей собой результирующую траекторию движений P_3 и P_4 , наклоненной к оси заготовки на заданный при настройке угол, т. е. по делительному конусу.

На станке можно обрабатывать также традиционные зубчатые колеса с линией зуба на делительном цилиндре. Для этого достаточно посредством муфты 9 отключить тяговый вал 8, обеспечивающий движение P_4 радиальной подачи суппорта фрезы. В итоге сложная группа $\Phi_s(P_3P_4)$ преобразуется в простую группу продольной подачи $\Phi_s(P_3)$, осуществляющей перемещение фрезы по траектории, параллельной оси нарезаемого колеса.

Кинематическая структура рассматриваемого станка может быть выполнена также по схеме с отдельными электродвигателями в формообразующих группах. Для этого достаточно орган настройки i_s отсоединить от кинематического звена 4, а его вход соединить с отдельным электродвигателем группы подач.

Такая модификация кинематической структуры обеспечивает возможность оснащения станка простейшей системой ЧПУ с использованием программируемого контроллера. В этом случае из схемы исключаются органы настройки на скорость резания i_y и подачу i_s , и в обеих группах устанавливаются регулируемые электродвигатели. При этом настройка на траекторию обоих формообразующих движений, как и в схеме с механическими связями, будет осуществляться органами настройки i_x и i_y . Такой вариант станка рационален в серийном производстве с установившейся номенклатурой зубчатых колес. При уменьшении серийности при одновременном увеличении номенклатуры обрабатываемых колес возрастают трудозатраты на переналадку органов настройки на траекторию, что ведет к снижению коэффициента мобильности станка. Поэтому для достижения высокого коэффициента мобильности в единичном и мелкосерийном производстве с неустановившейся номенклатурой необходима более сложная система ЧПУ, при которой механические органы настройки можно заменить электронными связями между исполнительными органами в обеих формообразующих группах. Обязательным условием при этом является использование в сложных формообразующих группах на каждом исполнительном органе отдельного регулируемого электродвигателя. Этим условиям отвечает структурная схема станка, приведенная на рис. 7.4. Кинематическая структура станка включает не связанные между собой формообразующие группы $\Phi_v(B_1B_2)$ и $\Phi_s(P_3P_4)$. В обеих группах функциональная связь между исполнительными органами осуществляется системой отсле-

живающей синхронизации (показана пунктирными стрелками), выполненными по схеме ведущая координата – ведомая координата. Связь механики с системой синхронизации в группе Φ_v обеспечивается посредством импульсных измерительных преобразователей 3 и 10, а в группе Φ_s – посредством таких же преобразователей 15 и 18.

В группе скорости резания $\Phi_v(B_1B_2)$ ведущей координатой является шпиндель 1 фрезы 2.

Внутренняя связь этой группы: $B_1 \rightarrow$ шпиндель 1 фрезы 2 \rightarrow 4 \rightarrow импульсный измерительный преобразователь 3 \rightarrow электрическая цепь (электрический вал) 5 \rightarrow блок автоматического управления 6 \rightarrow электрическая цепь 7 \rightarrow $M_2 \rightarrow$ делительный стол 8 с заготовкой 9 \rightarrow B_2 .

Внешняя связь: $M_1 \rightarrow$ звено соединения связей 4.

Таким образом, система синхронизации включает импульсный измерительный преобразователь 3, установленный на шпинделе и соединенный электрической цепью 5 с блоком автоматического управления 6 электродвигателя M_2 делительного стола. В систему синхронизации входит также цепь адаптации, включающая импульсный измерительный преобразователь 10, электрически соединенный с блоком 6. Эта цепь обеспечивает

повышение точности функционирования группы посредством устранения девиации механики ведомого исполнительного органа – делительного стола.

Группа настраивается на траекторию посредством делителя частоты системы синхронизации и на скорость (резания) – посредством делителя напряжения системы ЧПУ станка.

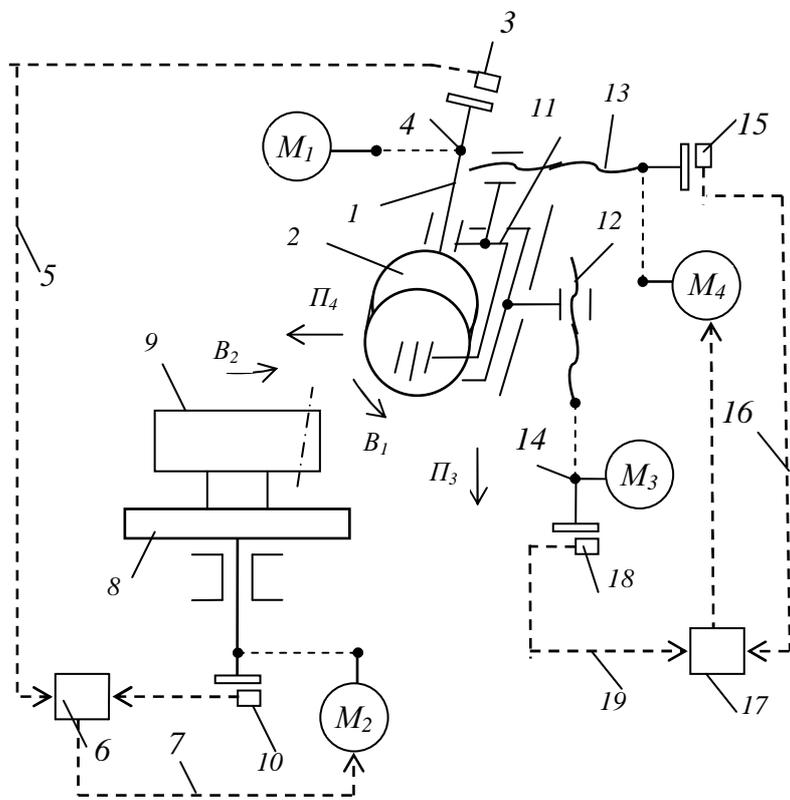


Рис. 7.4. Структура зубофрезерного станка с ЧПУ для обработки колес с наклонными зубьями

В группе подачи $\Phi_s(P_3P_4)$ ведущей координатой является фрезерный суппорт 11 в движении P_3 .

Внутренняя связь этой группы: $P_3 \rightarrow$ фрезерный суппорт $11 \rightarrow$ тяговый вал $12 \rightarrow 14 \rightarrow$ импульсный измерительный преобразователь $18 \rightarrow$ электрическая цепь $19 \rightarrow$ блок автоматического управления $17 \rightarrow$ электрическая цепь $16 \rightarrow M_4 \rightarrow$ тяговый вал $13 \rightarrow$ фрезерный суппорт $\rightarrow P_4$.

Внешняя связь: $M_3 \rightarrow$ звено соединения связей 14 .

В систему синхронизации входит также цепь адаптации, включающая импульсный измерительный преобразователь 15 , установленный на тяговом валу 13 и соединенный с блоком 17 . Эта цепь обеспечивает повышение точности функционирования группы посредством устранения девиации механики ведомого исполнительного органа – фрезерного суппорта 11 .

Группа настраивается на траекторию посредством делителя частоты системы синхронизации, на скорость (подачи) – посредством делителя напряжения устройства ЧПУ станка, на путь и исходное положение – цикловым автоматом устройства ЧПУ.

На станке можно обрабатывать также колеса с линией зуба на делительном цилиндре. Для этого необходимо отключить систему отслеживающей синхронизации $\Phi_s(P_3P_4)$. В итоге эта сложная группа преобразуется в простую группу продольной подачи $\Phi_s(P_3)$, осуществляющей перемещение фрезы по траектории, параллельной оси нарезаемого колеса.

Рассмотренные структурные схемы зубофрезерных станков могут быть использованы как при модернизации современных базовых моделей станков для расширения их универсальности, так и при проектировании новых универсальных станков с механическими и электронными связями.

7.3. Зубодолбежный станок с адаптивным управлением для многопроходной обработки зубчатых колес

При обсуждении особенностей процесса зубодолбления (комментарий к рис. 5.8) был рассмотрен способ многопроходного долбления, зубчатых колес, содержащий подсистему стабилизации силового параметра (момента силы резания) на всех проходах кроме первого. Это обеспечивает выравнивание толщин срезаемой стружки по обеим боковым режущим кромкам зубьев долбяка и, как следствие, обеспечивает повышение периода его размерной стойкости. Рассмотрим реализацию данного способа в кинематической структуре станка и системе его управления, защищенную патентом 2023551 (RU).

Кинематическая структура станка (рис. 7.5) содержит следующие кинематические группы: скорости резания $\Phi_v(\downarrow\Pi_1)$, обката (профилирования) $\Phi_s(B_2B_3)$, врезания $Vp(\Pi_4)$, «отскока» долбняка при холостом ходе $Vc(\downarrow\Pi_5)$. Исполнительным органом группы $\Phi_v(\downarrow\Pi_1)$ является шпиндель 1, несущий долбяк. Привод движения Π_1 шпинделя осуществляется от электродвигателя 2, круговая частота которого преобразуется в поступательно-возвратное движение кулисным механизмом 3. Исполнительными органами группы обката $\Phi_s(B_2B_3)$ являются шпиндель 1 и делительный стол 4. Функциональная связь (аналог цепи обката) между ними обеспечивается системой отслеживающей синхронизации, выполненной по схеме задающая – ведомая координаты. Задающей координатой является шпиндель. Привод его вращательного движения B_2 осуществляется от электродвигателя 5. Круговая частота этого электродвигателя задает круговую подачу долбняка. Делительный стол является ведомой координатой. Привод его вращательного движения B_3 осуществляется от электродвигателя 6, являющегося конечным звеном отслеживающей синхронизации. Исполнительным органом группы врезания $Vp(\Pi_4)$ является продольный стол 7. Привод его движения Π_4 осуществляется от электродвигателя 8 через тяговый вал 7 (безлюфтовую передачу винт – гайка). В качестве электродвигателей используются высокомоментные машины постоянного тока, позволяющие осуществлять бесступенчатое регулирование круговой частоты. Группа «отскока» $Vc(\downarrow\Pi_5)$ выполняется по традиционной для современных зубодолбежных станков схеме (не показана). В качестве источника энергии для электродвигателей используется силовая часть устройства управления 9.

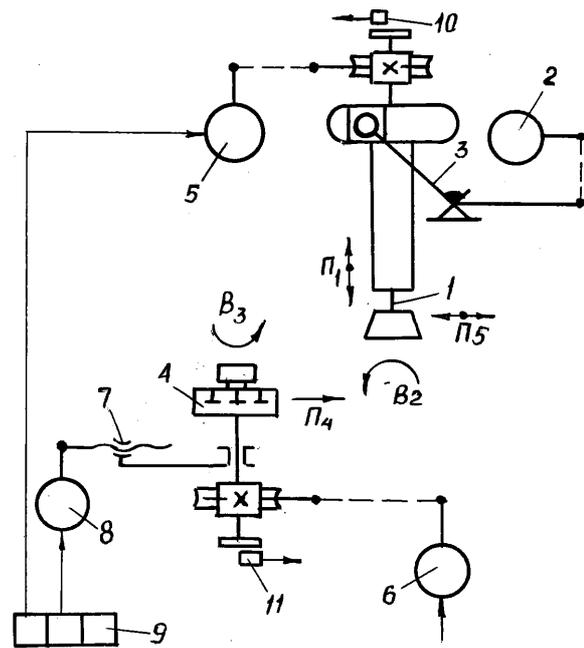


Рис. 7.5. Структурная схема станка

Связь механических исполнительных органов – шпинделя 1 и делительного стола 4 со схемой синхронизации обеспечивается импульсными измерительными преобразователями 10 и 11, установленными соответственно на шпинделе и делительном столе. Эти преобразователи соединены соответственно с входами ключа 1 и счетчика 2 схемы синхронизации

C – коэффициент, зависящий от передаточного отношения делительных передач;

z_d и z – числа зубьев соответственно долбяка и заготовки.

В практике зубообработки $z \geq cz_d \geq z$. Поэтому при $cz_d < z$ ключом 1 устанавливается связь импульсного измерительного преобразователя 10 с делителем частоты, при $cz_d > z$ – с умножителем частоты. При $cz_d = z$ эта связь может устанавливаться с любым из этих блоков.

Импульсно-аналоговый преобразователь 7 выполняет функцию датчика круговой подачи V_3 делительного стола, а импульсно-аналоговый преобразователь 9 – функцию датчика дополнительного углового смещения на этапах врезания. На входе этого преобразователя используется дополнительный делитель частоты.

Формирователь 14 сигнала управления угловым смещением делительного стола на этапах врезания содержит (рис. 7.7) тензометрический мост 1, тензорезисторы которого закреплены или на приспособлении для базирования заготовок, или на оправке для закрепления долбяков. Выходы тензометрического моста соединены с входами дифференциального усилителя 2, соединенного своим выходом с входом цепи, содержащей последовательно соединенные интегратор 3, усилитель-ограничитель 4, аналоговый ключ 5, блок задержки 6.

При наладке станка подача врезания и количество этапов врезания устанавливаются программно посредством задания на программируемом контроллере.

Станок работает следующим образом. При включении электродвигателя 2 (рис. 7.5) получает поступательно-возвратное движение Π_1 шпиндель 1 долбяка. Затем после ускоренного перемещения продольного стола 7 в исходную для обработки точку электродвигатель 8 переключается на подачу врезания в движении Π_4 на путь врезания на первом черновом проходе. Одновременно включается электродвигатель 5 задающей координаты, сообщающий шпинделю 1 вращательное движение V_2 круговой подачи, и схема отслеживающей синхронизации.

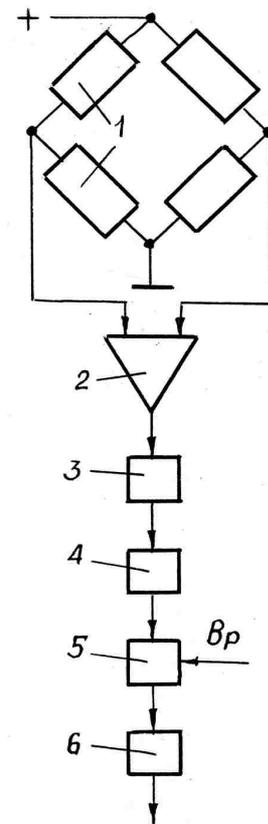


Рис. 7.7. Формирователь сигнала управления

Импульсный измерительный преобразователь 10 вырабатывает высокочастотный сигнал, пропорциональный круговой подаче долбяка. Этот сигнал через ключ 1 поступает (рис. 7.6) или в счетчик 3 делителя частоты, или в счетчик 5 умножителя частоты, где происходит или деление сигнала в соответствии с коэффициентом деления, установленном на блоке 4 или его умножение в соответствии с коэффициентом, установленном на блоке 6. На выходе счетчика 3 или счетчика 5 образуется импульсный сигнал – аналог круговой подачи делительного стола в движении B_3 . Этот сигнал преобразуется в аналоговую форму в импульсно-аналоговом преобразователе 7 и после прохождения суммирующего усилителя 16 и усилителя мощности 17 приводит во вращение электродвигатель 6 ведомой координаты (делительный стол 4 с заготовкой обрабатываемого колеса). В результате делительный стол будет отслеживать движение шпинделя. Причем отношение круговых частот вращения (круговых подач) шпинделя и делительного стола будет соответствовать отношению частот дискретного сигнала на входе ключа 1 и на выходе одного из счетчиков.

Одновременно с началом вращательного движения B_3 импульсный измерительный преобразователь 11 вырабатывает высокочастотный сигнал – аналог действительной круговой подачи делительного стола. Этот сигнал через счетчик 2 и открытый по управляющему входу ключ 12 поступает на второй вход фазового дискриминатора 11, на первом входе которого действует задающий сигнал, поступающий через открытый по управляющему входу ключ 10 с выхода счетчика 3 или счетчика 5.

В фазовом дискриминаторе происходит сравнение задающего и действительного сигналов-аналогов круговой подачи делительного стола. В итоге на выходе фазового дискриминатора 11 образуется корректирующий сигнал, поступающий через импульсно-аналоговый преобразователь 13 в суммирующий усилитель 16, где происходит коррекция сигнала управления электродвигателем 6.

После врезания на заданную часть высоты зуба по программе движение врезания прекращается и в течение полного оборота делительного стола осуществляется первый черновой проход обработки. После его завершения при продолжающемся движении обката включается движение врезания Π_4 на вторую часть припуска. Одновременно включается формирователь 14 сигнала управления угловым смещением делительного стола.

При рабочем ходе шпинделя в движении Π_1 тензометрический мост формирователя 14 регистрирует момент силы резания. Этот момент как физическое явление в зоне резания представляет собой сумму моментов резания обеими боковыми режущими кромками. Причем момент резания

на входной режущей кромке имеет большее значение. Следовательно, знак суммарного момента постоянен. Сигнал – аналог момента резания после усиления в дифференциальном усилителе 2 поступает в интегратор 3, где происходит его преобразование в непрерывный сигнал. После преобразования в управляющий потенциал в усилителе-ограничителе 4 этот сигнал после подачи на управляющий вход аналогового ключа 5 потенциала, соответствующего этапу врезания, через блок задержки 6 поступает на управляющий вход ключа 8 (рис. 7.6) и через элемент НЕ 15 на управляющие входы ключей 10 и 12. В результате цепь коррекции системы отслеживающей синхронизации на этапе врезания отключается. Одновременно через открытый по управляющему входу ключ 8 на вход суммирующего усилителя 16 поступает дополнительный сигнал от импульсно-аналогового преобразователя 9. В итоге при неизменной круговой подаче шпинделя долбяка круговая подача делительного стола увеличивается, т.е. происходит его угловое смещение относительно исходного положения. Это равнозначно постепенному перераспределению толщины срезаемой стружки в сторону ее увеличения на выходных режущих кромках. При выравнивании толщин стружки, срезаемой обеими боковыми режущими кромками, момент силы резания равен нулю, и формирование сигнала управления угловым смещением стола прекращается. Формирователь 14 сигнала управления этим смещением отключается, ключ 8 закрывается, а ключи 10 и 12 открываются. Движение врезания прекращается. Схема отслеживающей синхронизации перестраивается в исходное состояние и в течение полного оборота делительного стола осуществляется черновой проход. После его выполнения повторяется цикл врезания для следующего прохода и т. д.

В станке в качестве основы функциональной связи между исполнительными органами группы обката (шпинделем долбяка и делительным столом) принята схема, используемая в зубообрабатывающих станках KS300E фирмы Kaskifuji. Эта схема обеспечивает одностороннюю относительно номинального значения коррекцию девиации механических передач привода делительного стола. Возможно также использование других схем, например, по патенту 8621 (BY), обеспечивающей двухстороннюю коррекцию девиации.

Таким образом, в рассмотренном станке используется две схемы адаптивного управления. Одна схема обеспечивает повышение точности получаемых зубчатых колес за счет устранения девиации механики ведомой координаты группы обката; другая – обеспечивает повышение периода размерной стойкости долбяков за счет создания одинаковых условий резания обеими боковыми режущими кромками.

7.4. Зубодолбежный станок со спиральным врезанием для многопроходной обработки зубчатых колес

При обсуждении способов многопроходного зубодолбления с увеличенными круговыми подачами (комментарий к рис. 5.10) было показано, что уменьшить машинное время обработки при большом количестве проходов можно за счет врезания по спирали на предварительных (черновых и получистовых) проходах. Рассмотрим реализацию цикла многопроходного зубодолбления со спиральным врезанием в кинематической структуре станка по авторскому свидетельству 1835335 (SU).

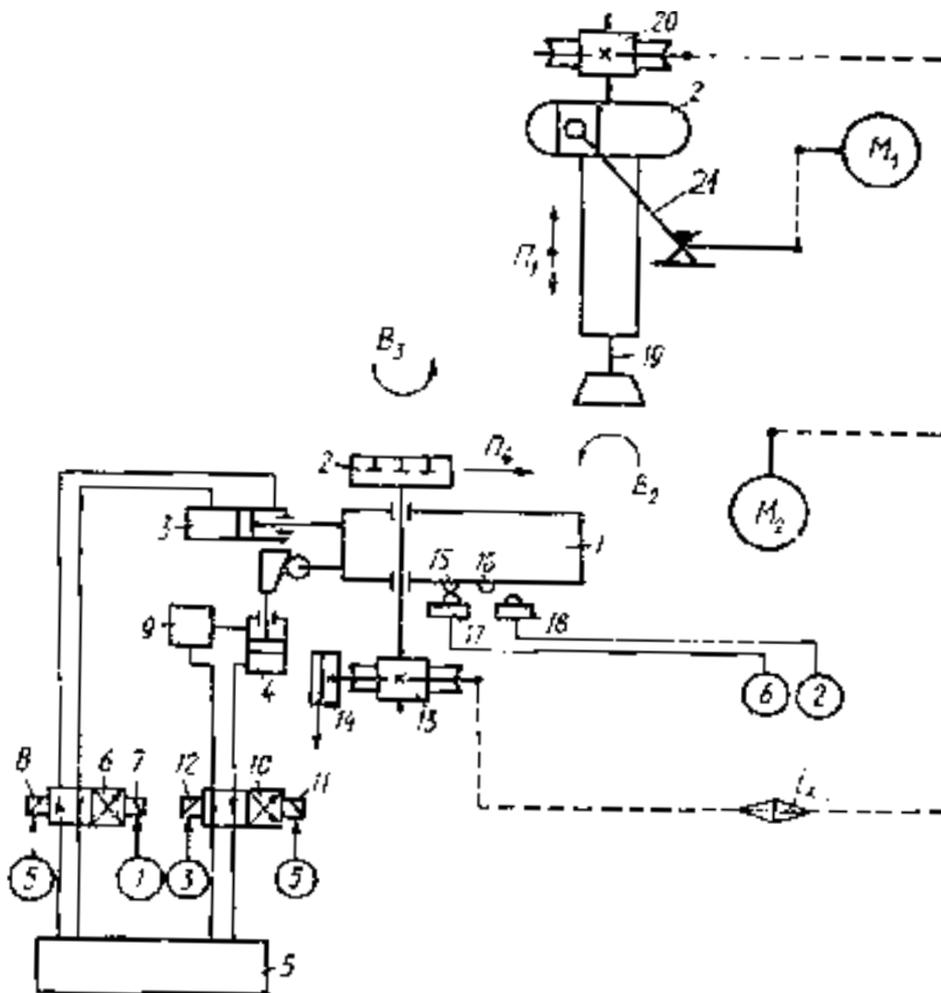


Рис. 7.8. Кинематическая структура станка

Кинематическая структура станка (рис. 7.8) унифицирована со структурой выпускаемых зубодолбежных станков с механическими связями. Продольный стол 1, несущий делительный стол 2, оснащен гидроцилиндрами ускоренного перемещения 3 и врезания 4. Гидроцилиндр ускоренного переме-

щения 3 соединен с гидростанцией 5 посредством реверсивного золотника 6, управляемого электромагнитами 7 и 8, а гидроцилиндр врезания 4 – посредством регулятора 9, предназначенного для задания подачи врезания, и реверсивного золотника 10, управляемого электромагнитами 11 и 12. На делительной паре 13 делительного стола установлен счетчик 14 числа зубьев, служащий для отсчета одного оборота делительного стола. На продольном столе установлены упоры 15 и 16, контактирующие с путевыми переключателями 17 и 18. Первый путевой переключатель соответствует исходному положению продольного стола, второй – началу движения врезания.

Станочное зацепление делительный стол 2 – шпиндель 19 долбяка воспроизводится группой обката, содержащей во внутренней связи делительную пару 13, гитару сменных зубчатых колес i_x и делительную пару 20. Источником энергии в этой группе является регулируемый электродвигатель M_2 . Привод поступательно-возвратного движения шпинделя 19 осуществляется кулисным механизмом 21, кинематически связанным с электродвигателем M_1 .

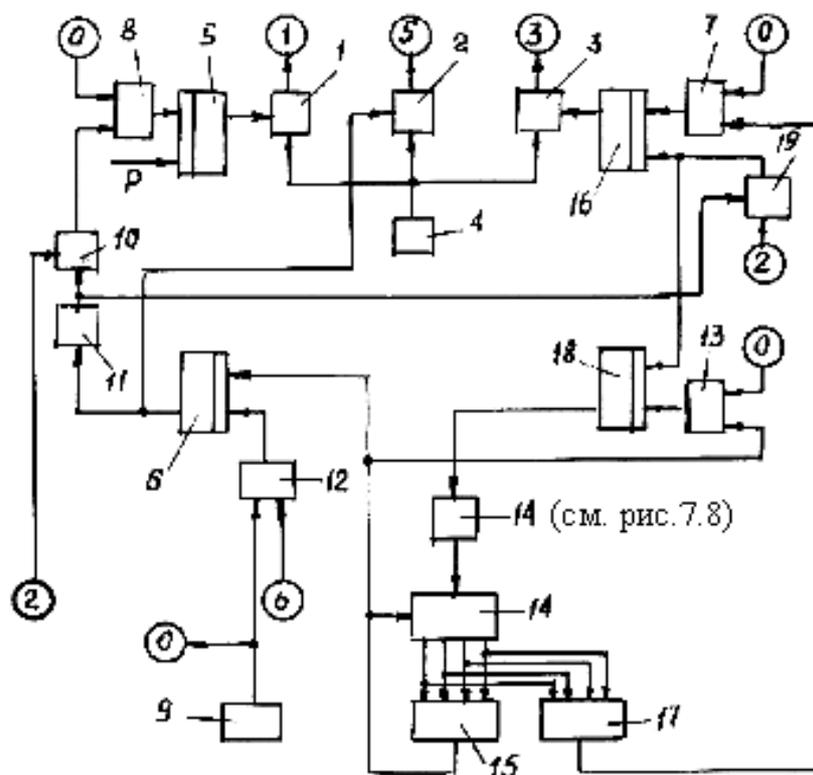


Рис. 7.9. Блок-схема системы управления циклом обработки

Электромагниты 7 и 8 реверсивного золотника 6 соединены с выходами ключей 1 и 2 (рис. 7.9), а электромагниты 11 и 12 реверсивного золотника 10 – с выходами ключей 2 и 3. Аналоговые входы ключей 1, 2, 3

объединены и соединены с источником питания 4, а управляющие входы – с выходами триггеров 5, 6, 16. Первый вход триггера 5 соединен с выходом элемента ИЛИ 8, соединенного первым входом с блоком 9 начальной установки триггеров, а вторым входом – с выходом элемента И 10, у которого первый вход соединен с путевым переключателем 18, а второй вход через элемент НЕ 11 – с выходом триггера 6. Второй вход триггера 5 используется для включения рабочего цикла. Первый вход триггера 6 соединен с выходом элемента ИЛИ 12, соединенного первым входом с блоком 9 начальной установки триггеров, а вторым входом – с путевым переключателем 17. Второй вход триггера 6 объединен с первым входом элемента ИЛИ 13, с входом «сброс» двоичного 4-разрядного счетчика 14 и соединен с выходом блока задания общего количества проходов 15. Первый вход триггера 16 соединен с выходом элемента ИЛИ 7, соединенного первым входом с блоком 9 начальной установки триггеров, а вторым входом – с выходом блока задания количества черновых проходов 17. Вторые входы триггеров 16 и 18 объединены и соединены с выходом элемента И 19, у которого первый вход соединен с путевым переключателем

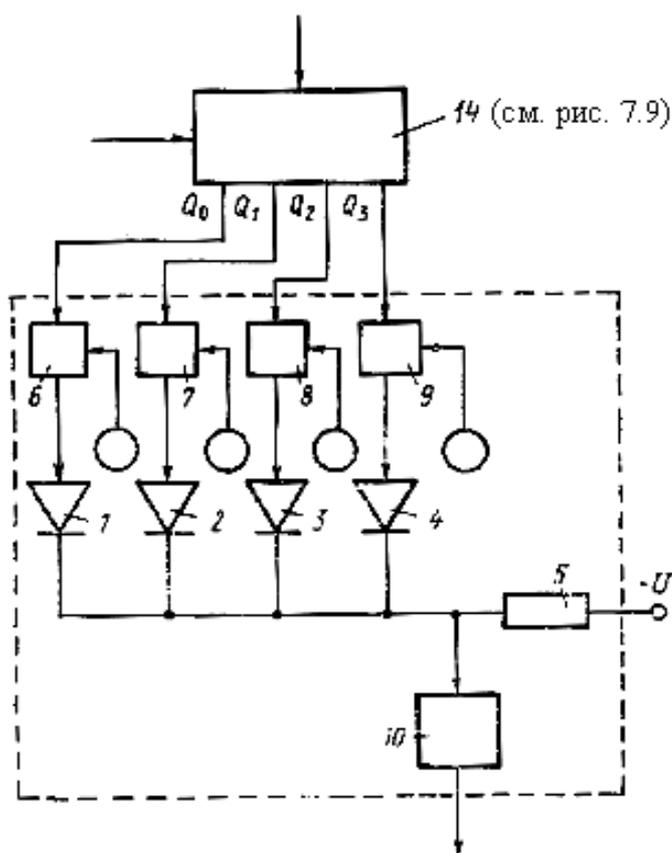


Рис. 7.10. Схема блока задания количества проходов

18, а второй вход – с выходом элемента НЕ 11. Первый вход триггера 18 соединен с выходом элемента ИЛИ 13, а выход этого триггера – с входом счетчика числа зубьев 14. Выход этого счетчика соединен с входом двоичного 4-разрядного счетчика, выходы которого соединены соответствующими входами блоков задания количества проходов 15 и 17. Блоки задания количества проходов 15 и 17 содержат диодно-резисторный 4-входовый конъюнктор на диодах 1, 2, 3, 4 (рис. 7.10), выходы которых объединены и соединены через резистор 5 с источником питания. Входы

конъюнктора через ключи 6, 7, 8, 9 соединены с соответствующими входами двоичного 4-разрядного счетчика 14. Управляющие входы ключей 6, 7, 8, 9 используются для набора кода количества проходов. К выходу 4-входового конъюнктора подключен вход одноустойчивого мультивибратора 10.

Выходы Q_0, Q_1, Q_2, Q_3 двоичного 4-разрядного счетчика имеют веса $2^0, 2^1, 2^2, 2^3$. Следовательно, на входах конъюнктора возможны состояния счетчика от 0000 до 1111, т. е. от 0 до 15. Первое состояние соответствует исходному положению схемы или отсутствию сигнала на входе счетчика, последнее – 15-му импульсу на входе. Таким образом, возможный максимальный цикл проходов равен 15. Каждый проход соответствует одному обороту делительного стола станка.

При наладке станка для получения на выходе 4-входового конъюнктура сигнала о конкретном числе проходов посредством ключей 6, 7, 8, 9 необходимо отключить от диодов 1, 2, 3, 4 те выходы двоичного 4-разрядного счетчика 14, состояние которых равно нулю в двоичной записи числа входных импульсов. В этом случае одноустойчивый мультивибратор 10 срабатывает и выдает на выходе импульс, соответствующий количеству выполненных проходов.

Цикл работы схемы осуществляется после подачи на второй вход триггера 5 управляющего сигнала P . На выходе триггера устанавливается сигнал, открывающий ключ 1, который посредством электромагнита 7 перемещает из нейтрального положения плунжер реверсивного золотника 6. Поток масла, поступающий из гидростанции 5 через золотник 6 в полость цилиндра 3, обеспечивает ускоренное перемещение $П_4$ продольного стола 1 в точку, соответствующую началу цикла. При набегании упора 16 на путевой переключатель 18, на выходе которого появляется сигнал, поступающий на первый вход элемента И 10, открытого по второму входу.

На выходе этого элемента появляется сигнал, который, поступая на первый вход триггера 5, сбрасывает с его выхода сигнал, и ключ 1 отключает электромагнит реверсивного золотника, управляющего ускоренным перемещением $П_4$ продольного стола 1. Сигнал с путевого переключателя 18 включает также привод поступательно-возвратного движения $П_1$ шпинделя 19 долбяка и электродвигатель M_2 группы обката, обеспечивающей согласованные движения B_2 долбяка и B_3 делительного стола с круговой подачей, соответствующей черновым проходам. Одновременно сигнал с путевого переключателя 18 через элемент И 19, открытый по второму входу, поступает на вторые входы триггеров 16 и 18. Сигнал, устанавливающийся на выходе триггера 16, открывает ключ 3, который посредством электромагнита 12 перемещает плунжер реверсивного золотника 10. Поток масла через золотник

поступает в полость гидроцилиндра 4 врезания, сообщающего продольному столу 1 подачу врезания в движении $П_4$. Сигнал, устанавливающийся на выходе триггера 18, включает счетчик 14 числа зубьев. В итоге указанного воздействия на схему сигнала с путевого переключателя 18 движениями $П_1$, $П_4$ и $В_2В_3$ осуществляются черновые проходы.

После каждого чернового прохода, соответствующего одному обороту делительного стола 2, на выходе счетчика 14 (рис. 7.8) числа зубьев появляется сигнал, поступающий на вход двоичного 4-разрядного счетчика 14. После выполнения заданного на блоке 17 количества черновых проходов на выходе последнего появляется сигнал, поступающий на первый вход триггера 16. Сигнал с выхода триггера сбрасывается, ключ 3 отключает электромагнит 12 золотника 10 и движение врезания прекращается. Одновременно электродвигатель M_2 переключается на другую круговую частоту, соответствующую круговой подаче чистового прохода.

После прекращения движения врезания в течение одного оборота делительного стола выполняется чистовой проход. Окончание его соответствует появлению на счетчике 14 очередного импульса, который поступает на вход двоичного 4-разрядного счетчика. В итоге на выходе блока 15 задания общего количества проходов появляется сигнал, который отключает приводы движений $П_1$ и $В_2В_3$ и одновременно поступает на вход «сброс» двоичного 4-разрядного счетчика 14, на первый вход триггера 18 и на второй вход триггера 6. На выходе триггера 18 сигнал сбрасывается, и счетчик 14 отключается. Одновременно на выходе триггера 6 устанавливается сигнал, включающий ключ 2. Электромагниты 8 и 11 реверсивных золотников 6 и 10 срабатывают, и изменяется направление потока масла в гидроцилиндрах 3 и 4. Продольный стол 1 под воздействием гидроцилиндра 3 ускоренно перемещается в исходное положение. Одновременно ползушка гидроцилиндра 4 также перемещается в исходное положение. В исходном положении продольного стола упор 15 набегают на путевого переключатель 17. Сигнал с его выхода поступает на первый вход триггера 6, сбрасывая сигнал с его выхода. Ключ 2 обесточивает электромагниты 8 и 11 реверсивных золотников 6 и 10, и продольный стол 1 фиксируется в исходном положении. После смены заготовки цикл обработки повторяется.

Если необходимо разделить общее количество проходов на черновые, получистовые и чистовые, в схему системы управления циклом вводится дополнительный блок задания количества проходов, ключами которого устанавливается количество получистовых проходов. Дополнительный блок присоединяется входами к соответствующим выходам двоичного 4-разрядного счетчика параллельно входам блоков 15 и 17, задающих количество прохо-

дов. Сигнал с выхода дополнительного блока используется для переключения электродвигателя группы обката на полустовую круговую подачу и соответствующего изменения подачи радиального врезания.

7.5. Двухстоловый полуавтомат для последовательной обработки зубчатых колес

Принципиальная особенность взаимной ориентации долбяка и заготовки при касательном движении врезания (комментарий к рис. 5.5) позволяет создать компоновку зубодолбежного станка по типу компоновки вертикально-фрезерного станка, у которого продольный стол перемещается в плоскости, перпендикулярной оси симметрии станка. При такой компоновке на продольном столе можно разместить два делительных стола и, таким образом, создать условия для последовательной обработки заготовок. В этом случае вспомогательное время, необходимое для замены нарезанного колеса очередной заготовкой, будет перекрываться машинным временем нарезания колеса на другом столе.

Кинематико-компоновочная схема станка по авторскому свидетельству 1641533 (SU), реализующая названный способ, приведена на рис. 7.11. Продольный стол 1 установлен с возможностью движения в плоскости врезания, перпендикулярной оси симметрии станка, проходящей через ось шпинделя 2. На продольном столе расположены делительные столы 3 и 4. Кинематическая связь продольного стола 1 с делительными столами 3 и 4 осуществляется через зубчатую рейку 5, закрепленную на продольном столе. Привод продольного стола осуществляется от симметричного гидроцилиндра двойного действия 6, установленного параллельно зубчатой рейки 5.

Кинематическая структура станка состоит из групп скорости резания $\Phi_V(\downarrow\Pi_1)$, обката $\Phi_S(B_2B_{31})$, врезания $Vp(\Pi_4B_{32})$, «отскока» $Vc(\downarrow\Pi_5)$. Группы $\Phi_V(\downarrow\Pi_1)$ и $Vc(\downarrow\Pi_5)$ аналогичны таким же группам в ранее рассмотренных схемах.

Делительные столы 3 и 4 являются исполнительными органами обеих сложных групп. Поэтому их движения B_3 суммируются из движений B_{31} и B_{32} , которые им сообщаются в соответствующих группах.

Группа обката $\Phi_S(B_2B_{31})$ обеспечивает профилирование зубьев заготовок.

Ее внутренняя связь представляет собой цепь обката, связывающую шпиндель 2 долбяка с обоими делительными столами 3 и 4:

$$\begin{array}{ccccccccccc}
 & & & & & & & & & & 12 \rightarrow 3 \rightarrow B_{31} \\
 & & & & & & & & & & \uparrow \\
 B_2 \rightarrow 2 \rightarrow 7 \rightarrow 8 \rightarrow i_x \rightarrow 9 \rightarrow \Sigma \rightarrow 10 \rightarrow 11 & & & & & & & & & & \\
 & & & & & & & & & & \downarrow \\
 & & & & & & & & & & 13 \rightarrow 4 \rightarrow B_{31}.
 \end{array}$$

Внешняя связь: $M \rightarrow i_s \rightarrow 14 \rightarrow 15 \rightarrow 16 \rightarrow 8$.

Сообщает энергию движения от электродвигателя M во внутреннюю связь через звено соединения связей 8.

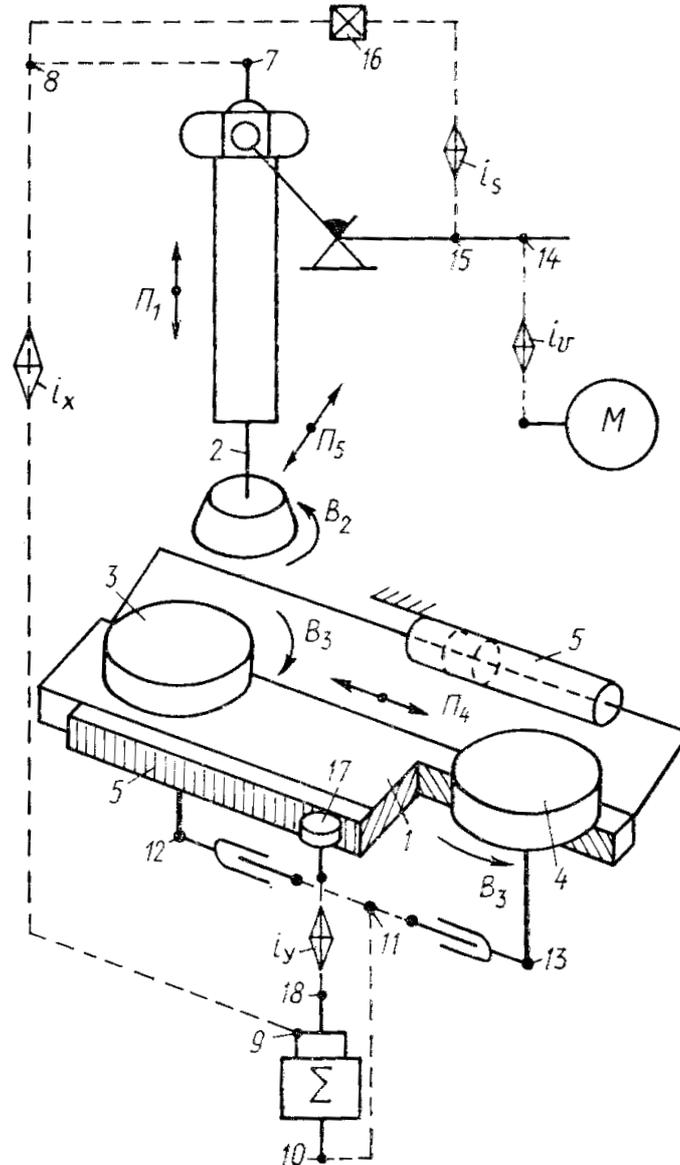


Рис. 7.11. Кинематико-компоновочная схема двухстолового станка

Движение обката настраивается на траекторию гитарой сменных зубчатых колес i_x , на круговую подачу – гитарой сменных зубчатых колес i_y , на направление – реверсивным механизмом 16, установленным во внешней связи. Наличие отдельного реверсивного механизма обязательно, так как по условиям компоновки станка обработка заготовок на обоих делительных столах осуществляется при противоположных направлениях их вращательного движения.

Группа врезания $Bp(\Pi_4 B_{32})$ воспроизводит зубчато-реечное зацепление. Ее внутренняя связь:

$$\begin{array}{ccccccccccc} & & & & & & & & & & 12 \rightarrow 3 \rightarrow B_{32} \\ & & & & & & & & & & \uparrow \\ \Pi_4 \rightarrow 1 \rightarrow 5 \rightarrow 17 \rightarrow i_y \rightarrow 18 \rightarrow \Sigma \rightarrow 10 \rightarrow & 11 & & & & & & & & & \\ & & & & & & & & & & \downarrow \\ & & & & & & & & & & 13 \rightarrow 4 \rightarrow B_{32}. \end{array}$$

Обеспечивает согласование вращательного движения делительных столов с движением касательного врезания Π_4 продольного стола 1 . Внешняя связь сообщает энергию движения от гидроцилиндра 6 во внутреннюю связь.

Движение касательного врезания настраивается на траекторию гитарой сменных зубчатых колес i_y , на скорость – регулируемым дросселем гидропривода.

Группы врезания и обката имеют общий участок, разветвляющийся после кинематического звена 11 : одна ветвь связывает это звено с делительным столом 3 , а другая – с делительным столом 4 .

Цикл обработки выполняется на обоих столах поочередно. При этом на каждом столе обеспечиваются одинаковые условия резания, а у долбяка попеременно от заготовки к заготовке меняются входные и выходные режущие кромки зубьев.

В соответствии с общей тенденцией в области станкостроения, заменим в рассмотренном станке механические связи электронными на базе интегральных схем, а гидравлический привод продольного стола унифицируем с приводом одной из выпускаемых базовых моделей. Соответствующая структурная схема станка представлена на рис. 7.12.

На продольном столе 1 в плоскости подачи врезания Π_4 установлены делительные столы 2 и 3 . Привод позиционирования продольного стола 1 осуществляется посредством симметричного гидроцилиндра двухстороннего действия 4 , соединенного с гидростанцией 5 через реверсивный золотник 6 , управляемый электромагнитами 7 и 8 , а привод касательного врезания – гидроцилиндрами 9 и 10 , расположенными с противоположных сторон продольного стола 1 . Гидроцилиндры соединены с гидростанцией 5 через реверсивные золотники 11 и 12 , управляемые электромагнитами соответственно 13 , 14 и 15 , 16 . В трубопроводах гидроцилиндров 9 и 10 установлены регуляторы (органы настройки) 17 и 18 подачи касательного врезания. Приводы круговых подач делительных столов 2 и 3 осуществляются от электродвигателей M_2 и M_3 через делительные передачи 20 и 21 . Привод поступательно-возвратного движения шпинделя 22 , несущего долбяк, осуществляется электродвигателем M_1 через кулисный механизм 23 , а привод круговых подач шпинделя – через делительную передачу 24 от электродвигателя M_4 .

На делительных передачах исполнительных органов – шпинделе, продольном и круговых столах установлены импульсные измерительные преобразователи 25, 26, 27, 28, предназначенные для преобразования прямолинейного перемещения продольного стола и круговых частот вращения шпинделя и делительных столов в последовательности импульсов, сообщаемые в электронную систему функциональных связей приводов исполнительных органов.

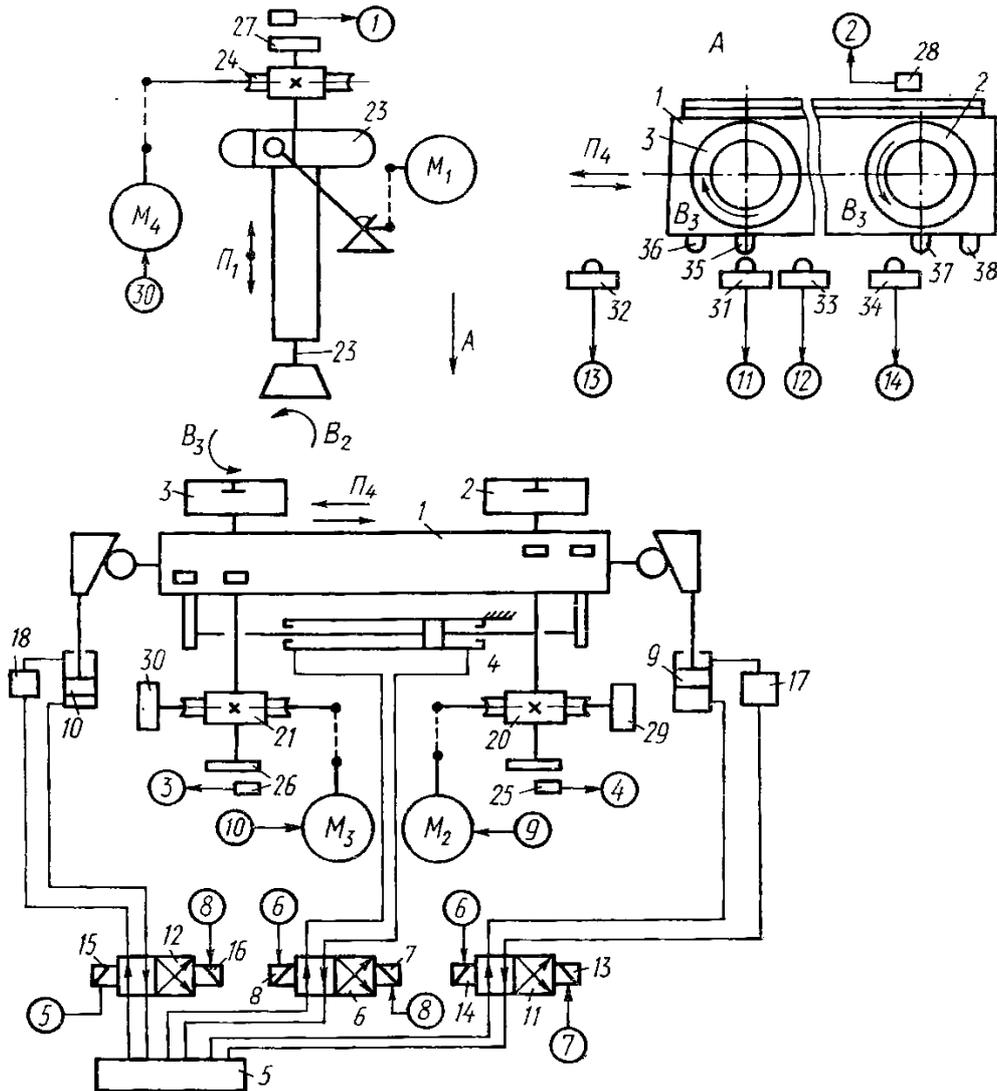


Рис. 7.12. Структурно-компоновочная схема станка

Для связи со схемой цикловой автоматики станок оснащен счетчиками числа зубьев 29 и 30, расположенными на делительных передачах 20 и 21, и конечными выключателями 31 – 34, которым соответствуют упоры 35 – 38, установленные на продольном столе 1.

Система управления состоит из устройства функциональных связей исполнительных органов и устройства цикловой автоматики. Коммутация связей осуществляется через центральный командоаппарат.

Устройство функциональных связей обеспечивает согласование движений исполнительных органов в сложных кинематических группах $\Phi_s(B_2B_3)$ и $Bp(П_4B^1_3)$, воспроизводящих зацепление двух зубчатых колес и рейки с колесом. Ведущими координатами в указанных группах являются шпиндель и продольный стол, а ведомыми координатами делительные столы. Сигнал управления продольным столом воспроизводится гидросхемой, обеспечивающей движение позиционирования с постоянной скоростью и настраиваемое движение подачи касательного врезания.

Сигнал управления шпинделем воспроизводится электронным формирователем на базе типовых интегральных элементов (рис. 7.13), выполненным по схеме равнозначных координат по патенту 8621 (ВУ) с автоматической двухсторонней коррекцией погрешности его привода. Эталонный генератор 1 соединен посредством элемента И 2, управляемого потенциальным сигналом с входом делителя частоты, состоящего из счетчика импульсов 3 и блока установки коэффициента деления 4, выполняющего функцию органа настройки круговой подачи шпинделя. Выход счетчика 3 соединен с первыми входами знакового 5 и фазового 6 дискриминаторов, а через импульсно-аналоговый преобразователь 7 – с первым положительным входом параллельного сумматора 8. Вторые входы дискриминаторов 5 и 6 соединены с импульсным

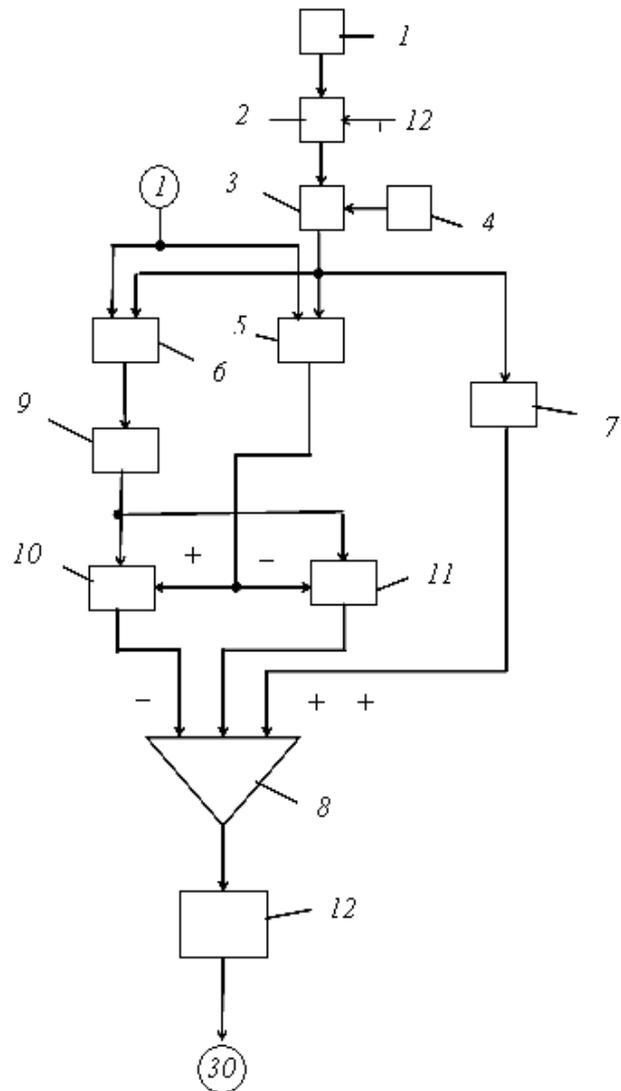


Рис. 7.13. Формирователь задающего сигнала шпинделя долбяка

измерительным преобразователем, установленным на шпинделе. Выход фазового дискриминатора 6 соединен через импульсно-аналоговый преобразователь 9 с аналоговыми входами элементов И 10 и 11, управляемых соответственно положительным и отрицательным потенциалами, а выход знакового дискриминатора 5 – с потенциальными входами этих элементов. Выходы элементов И 10 и 11 соединены соответственно с отрицательным и положительным входами параллельного сумматора 8, выход которого через усилитель мощности 12 соединен с электродвигателем привода круговой подачи шпинделя. При подаче потенциала на управляющий вход элемента И 2 импульсный сигнал с эталонного генератора 1 поступает на вход счетчика 3 делителя частоты, где происходит его деление в соответствии с заданным на блоке 4 коэффициентом деления. Сигнал с выхода счетчика 3 после преобразования его в импульсно-аналоговом преобразователе 7 в постоянное напряжение, пропорциональное частоте входного сигнала, поступает через параллельный сумматор 8 и усилитель мощности 12 на электродвигатель привода круговой подачи шпинделя. Одновременно для устранения девиации механики этого привода осуществляется коррекция управляющего сигнала. На первые входы дискриминаторов 5 и 6 непрерывно поступает задающий сигнал со счетчика 3, а на вторые входы этих дискриминаторов – импульсный сигнал с импульсного измерительного преобразователя, установленного на шпинделе, соответствующий мгновенному значению круговой подачи. В дискриминаторах непрерывно происходит сравнение обоих сигналов. В результате на выходе фазового дискриминатора 6 образуется сигнал абсолютной погрешности, который после преобразования в импульсно-аналоговом преобразователе 9 поступает на аналоговые входы элементов И 10 и 11. Одновременно на выходе знакового дискриминатора 5 непрерывно образуется отрицательный потенциал при отставании шпинделя от заданного значения и положительный потенциал при опережении. Этот потенциал поступает на потенциальные входы элементов И 10 и 11 и открывает один из них. При открывании элемента И 11, управляемого отрицательным потенциалом, сигнал с его выхода поступает на второй вход сложения параллельного сумматора 8, а при открывании элемента И 10, управляемого положительным потенциалом, сигнал с его выхода поступает на вход вычитания этого сумматора. В итоге в зависимости от знака погрешности в параллельном сумматоре происходит увеличение или уменьшение, задающего сигнала, действующего на его первом входе, т. е. происходит его двухсторонняя автоматическая коррекция относительно номинального значения, или двухстороннее адаптивное управление.

Формирователь сигнала управления ведомых координат – делительных столов (рис. 7.14) выполнен по схеме отслеживающей синхронизации.

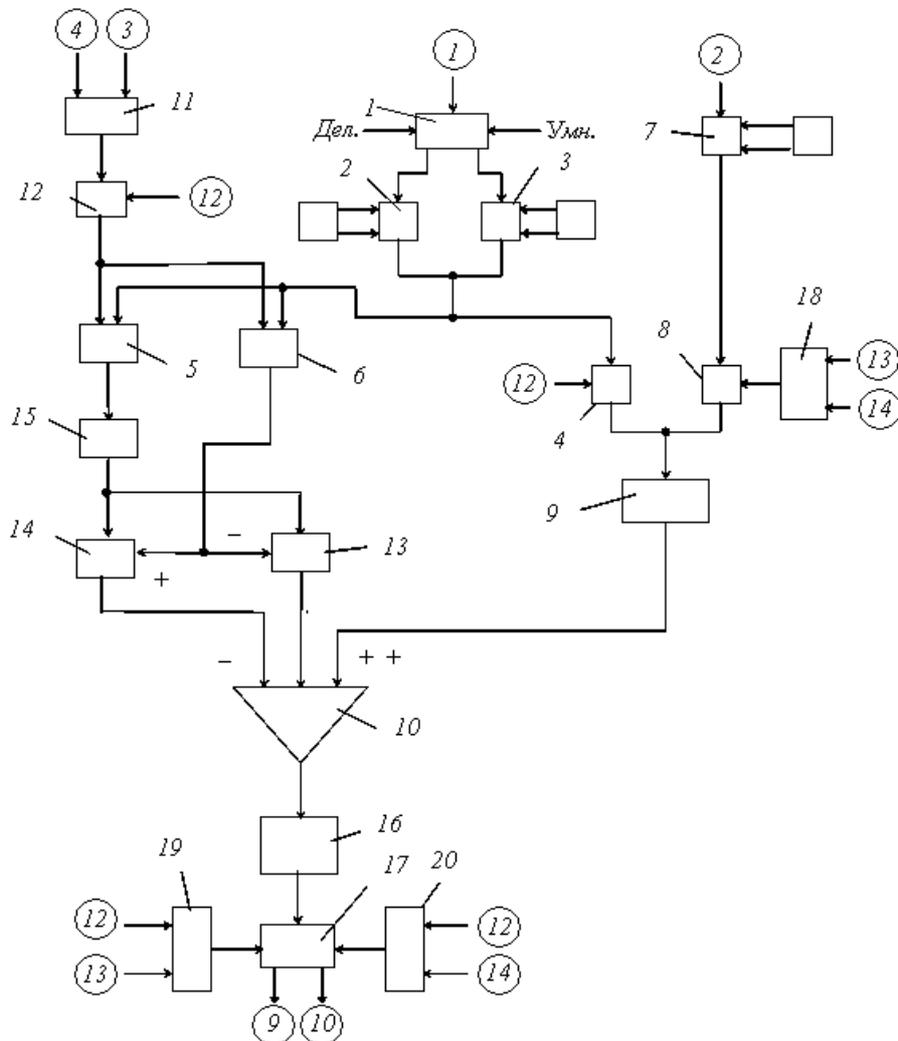


Рис. 7.14. Формирователь сигнала управления ведомых координат

Задатчиками для делительных столов являются импульсные измерительные преобразователи 27, и 28, установленные соответственно на делительных передачах шпинделя и продольного стола. Импульсный измерительный преобразователь 27 соединен с входом элемента 2И 1, имеющим два аналоговых управляющих входа и два выхода. Один выход этого элемента соединен с входом делителя частоты 2, а другой – с входом умножителя частоты 3. Выходы делителя частоты 2 и умножителя частоты 3 объединены и соединены с входом элемента И 4, управляемого аналоговым сигналом, и с первыми входами фазового 5 и знакового 6 дискриминаторов. Импульсный измерительный преобразователь 28 соединен с входом делителя частоты 7, у которого выход соединен с входом элемента И 8,

управляемого аналоговым сигналом. Выходы элементов И 4 и 8 объединены и соединены с входом импульсно-аналогового преобразователя 9, соединенного своим выходом с первым положительным входом параллельного сумматора 10. Импульсные измерительные преобразователи, установленные на делительных передачах ведомых координат (делительных столах) соединены через элемент ИЛИ 11 с входом элемента И 12, выход которого соединен с вторыми входами фазового 5 и знакового 6 дискриминаторов. Выход знакового дискриминатора 6 соединен с потенциальными входами элементов И 13, и 14, управляемых соответственно отрицательным и положительным потенциалами. Выход элемента И 13 соединен с вторым положительным входом параллельного сумматора 10, а выход элемента И 14 – с отрицательным входом этого сумматора. Выход фазового дискриминатора 5 через импульсно-аналоговый преобразователь 15 соединен с аналоговыми входами элементов И 13, 14. Выход параллельного сумматора 10 через усилитель мощности 16 и ключ 17, имеющий два управляющих входа и два выхода, соединен с электродвигателями ведомых координат (делительных столов).

Формирователь сигнала управления ведомых координат соединен с устройством цикловой автоматики посредством элементов ИЛИ 18, 19 и 20, через которые на управляющие входы элементов И 4, 8 и ключ 17 подаются по циклу обработки управляющие потенциалы на этапах врезания и профилирования.

Делители частоты 2 и 7 аналогичны делителю частоты, используемому в схеме формирования сигнала управления привода круговых подач шпинделя. Умножитель частоты 3 состоит из счетчика импульсов и блока установки коэффициента умножения. Выбор делителя частоты 2 или умножителя частоты 3 зависит от передаточного отношения функциональной связи долбяк – заготовка:

$$i_x = c \frac{z_d}{z},$$

где i_x – передаточное отношение станочного зацепления;

c – коэффициент, зависящий от передаточного отношения делительных передач;

z_d и z – числа зубьев соответственно долбяка и нарезаемого колеса.

В практике зубодолбления $z \geq cz_d \geq z$. Поэтому при $cz_d < z$ ключом 5 устанавливаем связь импульсного измерительного преобразователя 20 с делителем частоты 6, при $cz_d > z$ – с умножителем частоты 7. При $cz_d = z$ эта связь может устанавливаться с любым из этих блоков при условии установки коэффициента деления или умножения равным единице.

Таким образом, блоки установки коэффициента деления или умножения соответственно в делителе частоты 2 или в умножителе частоты 3 выполняют функцию органа настройки на круговую подачу делительных столов станочного зацепления долбяк – заготовка, а совместно с делителем частоты шпинделя – органа настройки на траекторию этого зацепления. А блок установки коэффициента деления делителя 7 выполняет функцию органа настройки на дополнительный поворот делительных столов на этапе врезания.

Устройство цикловой автоматики (рис. 7.15) состоит из ключей 1 – 4, аналоговые входы которых объединены и соединены с источником питания 5.

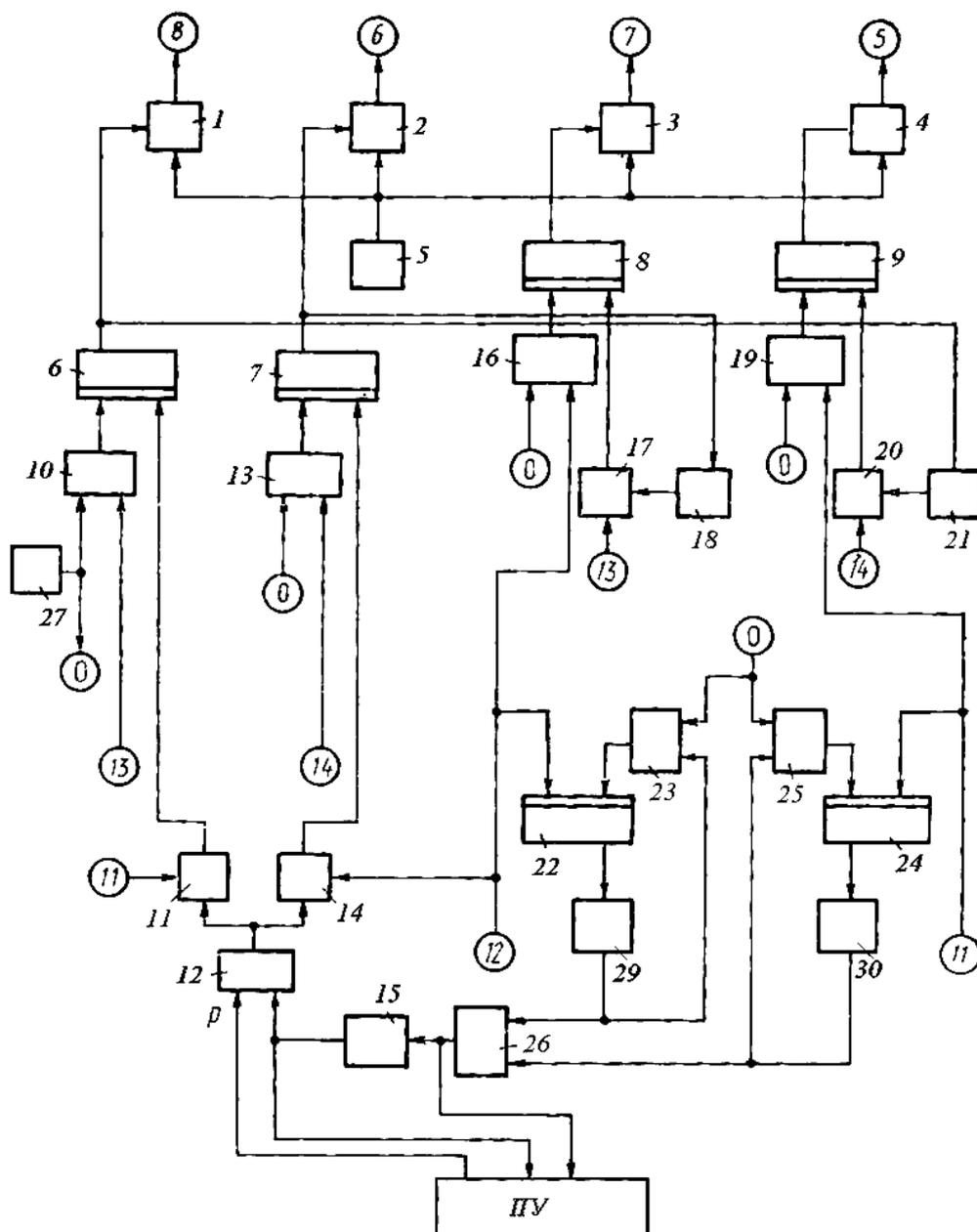


Рис. 7.15. Блок-схема циклового автомата

Выход ключа 1 соединен с электромагнитами 7 и 16 реверсивных золотников 6 и 12, выход ключа 2 – с электромагнитами 8 и 14 реверсивных золотников 6 и 11, выход ключа 3 – с электромагнитом 13 реверсивного золотника 11, выход ключа 4 – с электромагнитом 15 реверсивного золотника 12. Потенциальные (управляющие) входы ключей 1 – 4 соединены с выходами триггеров соответственно 6 – 9. Первый вход триггера 6 соединен с выходом элемента ИЛИ 10, у которого второй вход соединен с конечным выключателем 32 (рис. 7.12). Второй вход триггера 6 соединен с выходом элемента И 11, у которого первый вход соединен с конечным выключателем 31, а второй вход – с выходом элемента ИЛИ 12. Первый вход триггера 7 соединен с выходом элемента ИЛИ 13, соединенного вторым входом с конечным выключателем 34. Второй вход триггера 7 соединен с выходом элемента И 14, у которого первый вход соединен с конечным выключателем 33, а второй вход – с выходом элемента ИЛИ 12. Первый вход элемента ИЛИ 12 соединен с кнопкой «Пуск» пульта управления станка (ПУ), а второй – с выходом реле времени 15. Первый вход триггера 8 соединен с выходом элемента ИЛИ 16, у которого второй вход соединен с ВК 33. Вторым входом триггера 8 соединен с выходом элемента И 17, соединенного первым входом с ВК 32, а вторым входом через элемент НЕ – с выходом триггера 7. Первый вход триггера 9 соединен с выходом элемента ИЛИ 19, соединенного вторым входом с конечным выключателем 31. Вторым входом триггера 9 соединен с выходом элемента И 20, у которого первый вход соединен с ВК 34, а второй вход через элемент НЕ 21 – с выходом триггера 6. Первый вход триггера 22 соединен с выходом элемента ИЛИ 23, соединенного вторым входом с выходом счетчика зубьев 29. Вторым входом триггера 22 соединен с конечным выключателем 33. Выход триггера 22 соединен с счетчиком зубьев 29. Первый вход триггера 24 соединен с выходом элемента ИЛИ 25, соединенного вторым входом с выходом счетчика зубьев 30. Вторым входом триггера 24 соединен с конечным выключателем 31. Выход триггера 24 соединен с входом счетчика зубьев 30. Выходы счетчиков зубьев 29 и 30 соединены также с входами элемента ИЛИ 26, выход которого соединен с реле времени 15 и ПУ. Первые входы элементов ИЛИ 10, 13, 16, 19, 23, 25 соединены с блоком 27 начальной установки триггеров.

Схема управления работает следующим образом. После включения схемы триггеры 6 – 9, 22, 24 устанавливаются в исходное состояние сигналом с блока 27 начальной установки через соответствующие элементы ИЛИ. При нажатии кнопки «Пуск» на первый вход элемента ИЛИ 22 поступает управляющий сигнал «Р», который после прохождения через открытый

по первому входу сигналом от конечного выключателя 31 элемент И 11 поступает на второй вход триггера 6. На его выходе устанавливается сигнал, открывающий ключ 1, который соединяет с блоком питания 5 электромагниты 7 и 16 реверсивных золотников 6 и 12. Электромагниты перемещают плунжеры золотников, и поток масла из гидростанции 5 поступает в гидроцилиндры 4 и 10. Гидроцилиндр 4 сообщает движение Π_4 (на рис. 7.12 влево) позиционирования продольному столу 1, а гидроцилиндр 10 выводит свою ползушку в исходное положение. При набегании упора 36 на конечный выключатель 32 на последнем появляется сигнал, который поступает через элемент ИЛИ 10 на первый вход триггера 6 и на первый вход элемента И 17. Сигнал на выходе триггера 6 сбрасывается и ключ 1 отключает электромагниты 7 и 16. Одновременно сигнал, поступивший на первый вход элемента И 17, открытого по второму входу сигналом с выхода элемента НЕ 18, поступает на второй вход триггера 8, устанавливая на его выходе сигнал, открывающий ключ 3. Этот ключ соединяет с блоком питания электромагнит 13 реверсивного золотника 11, который обеспечивает поток масла из гидростанции 5 в рабочую полость гидроцилиндра 9 подачи врезания. В итоге продольный стол 1 в движении Π_4 переключается с позиционирования на врезание. Одновременно сигнал с конечного выключателя 32 через ПУ включает электродвигатель M_1 привода поступательно-возвратного движения Π_1 шпинделя долбяка и открывает через элемент ИЛИ 18 элемент И 8, а через элемент ИЛИ 19 – ключ 17 (рис. 7.14). В результате задающий сигнал с импульсного измерительного преобразователя 28 поступает на вход делителя частоты 7, где происходит его деление, в соответствии с заданным значением. С выхода этого делителя сигнал через открытый по управляющему входу элемент И 8 поступает в импульсно-аналоговый преобразователь 9, где происходит его преобразование в постоянное напряжение, пропорциональное частоте входного сигнала. С выхода этого преобразователя аналоговый сигнал через первый вход – выход параллельного сумматора 10, усилитель мощности 16 и открытый по одному из управляющих входов ключ 17 сообщается электродвигателю M_2 привода делительного стола 2. В итоге на этапе врезания этот стол получает вращательное движение B_3 , согласованное с движением Π_4 продольного стола 1.

Этап врезания продолжается до набегания упора 37 на конечный выключатель 33. Сигнал, появившийся на этом выключателе, поступает на первый вход элемента И 14 и через элемент ИЛИ 16 – на первый вход триггера 8. На выходе этого триггера сигнал сбрасывается, ключ 3 отключает электромагнит 13 реверсивного золотника 11 и продольный стол останавли-

вается. Одновременно снимается сигнал с управляющего входа элемента И 8 ведомой координаты. Сигнал с конечного выключателя 33 открывает элемент И 2 ведущей координаты (рис. 7.13), элементы И 4 и через элемент ИЛИ 19 – ключ 17 ведомой координаты. Одновременно этот сигнал поступает на второй вход триггера 22, устанавливая на его выходе сигнал, который включает счетчик зубьев 39. В результате перекоммутации схемы начинается этап профилирования колеса. Задающий сигнал с импульсного измерительного преобразователя 27, установленного на шпинделе, поступает через элемент И 1 на делитель или умножитель частоты формирователя сигнала управления ведомой координаты, где происходит его деление или умножение в соответствии с передаточным отношением станочного зацепления шпиндель – заготовка. Результирующий сигнал через открытый по управляющему входу элемент И 4 поступает на вход импульсно-аналогового преобразователя 9. Аналоговый сигнал, пропорциональный частоте входного сигнала, с выхода этого преобразователя через первый вход-выход параллельного сумматора 10, усилитель мощности 16 и открытый по управляющему входу ключ 17 поступает на вход электродвигателя M_2 делительного стола 2. Одновременно следующим образом происходит устранение девиации механики привода делительного стола посредством двухсторонней коррекции сигнала на выходе параллельного сумматора 10. На первые входы фазового 5 и знакового 6 дискриминаторов непрерывно поступает задающий сигнал с выхода делителя или умножителя частоты, а на вторые входы этих дискриминаторов через элементы ИЛИ 11 и И 12 поступает сигнал-аналог мгновенного значения действительной круговой подачи делительного стола. В дискриминаторах непрерывно происходит сравнение обоих сигналов. В результате на выходе фазового дискриминатор 5 образуется сигнал абсолютной погрешности, который после преобразования в импульсно-аналоговом преобразователе 15 поступает на аналоговые входы элементов И 13 и 14. Одновременно на выходе знакового дискриминатора 6 непрерывно образуется отрицательный потенциал при отставании делительного стола от заданного значения и положительный потенциал при опережении. Этот потенциал поступает на потенциальные входы элементов И 13 и 14 и открывает один из них. При открывании элемента И 13 сигнал с его выхода поступает на второй вход сложения параллельного сумматора 10, а при открывании элемента И 14 сигнал с его выхода поступает на вход вычитания этого сумматора. В итоге в зависимости от знака погрешности в параллельном сумматоре происходит увеличение или уменьшение, задающего сигнала, действующего на его первом входе, т. е. происходит его двухсторонняя автоматическая адаптация относительно заданного номинального значения.

Этап профилирования продолжается в течение одного оборота делительного стола 2 после прекращения врезания. За время выполнения этапа устанавливается очередная заготовка на делительном столе 3. По выполнению делительным столом одного оборота, что соответствует окончанию профилирования, на выходе счетчика зубьев 29 появляется сигнал, который через элемент ИЛИ 26 поступает в ПУ, обеспечивающий прекращение движения $П_1$ шпинделя и вывод его в крайнее верхнее положение, включает реле времени 15 и через элемент ИЛИ 23 поступает на первый вход триггера 22. На его выходе сигнал сбрасывается, и счетчик зубьев 29 отключается.

Реле времени 15 задерживает начало повторения цикла обработки на другом делительном столе из исходного положения, соответствующего наличию сигнала на конечном выключателе 33, на время необходимое для вывода шпинделя в верхнее положение.

По окончании паузы на выходе реле времени появляется сигнал, который поступает через элементы ИЛИ 12 и И 14 на второй вход триггера 7, устанавливая на его выходе сигнал, открывающий ключ 2. Этот ключ соединяет с блоком питания электромагниты 8 и 14 реверсивных золотников. Плунжеры этих золотников перемещаются, и поток масла поступает в гидроцилиндры 4 и 9. Гидроцилиндр 4 сообщает движение позиционирования $П_4$ (на рис. 7.12 вправо) продольному столу 1, а гидроцилиндр 9 выводит ползушку в исходное для врезания положение. При набегании упора 38 на конечный выключатель 34 на нем появляется сигнал, который через элемент ИЛИ 13 поступает на первый вход триггера 7 и на первый вход элемента И 20, открытого по второму входу сигналом с элемента НЕ 21. На выходе триггера 7 сигнал сбрасывается, ключ 2 отключает электромагниты 8 и 14 и поток масла в гидроцилиндры 4 и 9 перекрывается. С выхода элемента И 20 сигнал поступает на второй вход триггера 9, устанавливая на его выходе сигнал, включающий посредством ключа 4 реверсивный золотник 12, открывающий поток масла в гидроцилиндр 10 подачи врезания. В итоге продольный стол 1 переключается с позиционирования на подачу врезания. Одновременно сигнал с конечного выключателя 34 перестраивает структуру схемы управления, по командам которой через ПУ включаются привод движения $П_1$ шпинделя, электродвигатель M_3 движения B_3 делительного стола 3 и реверсируется электродвигатель M_4 круговой подачи шпинделя долбяка.

Последующая работа станка на этапах врезания и профилирования заготовки на делительном столе 3 осуществляется так же, как при обработке заготовки на делительном столе 2. Однако продолжительность этапа врезания будет ограничиваться набеганием упора 35 на конечный выключатель.

чатель 31, а один оборот делительного стола 3 будет отсчитываться счетчиком зубьев 30, включаемым сигналом с конечного выключателя 31 через триггер 24. После обработки заготовки на делительном столе 3 сигнал с выхода реле времени 15 перестраивает схему управления для обработки очередной заготовки на столе 2 и т. д.

Таким образом, последовательная обработка двух заготовок обеспечивает сокращение времени обработки за счет совмещения установки на рабочей позиции каждой последующей заготовки с обработкой предшествующей. По условиям взаимодействия долбяка и заготовок автоматически изменяется направление круговой подачи при обработке каждой последующей заготовки, что обеспечивает повышение периода размерной стойкости инструмента посредством обеспечения равномерного износа его входной и выходной режущих кромок.

7.6. Роторный зубодолбежный станок

По существу роторный станок можно рассматривать как совокупность нескольких одинаковых зубодолбежных станков с касательным врезанием по дуге, объединенных общим ротором. В станках такого типа не рационально использовать развитые кинематические цепи между исполнительными органами, так как это ведет к существенному усложнению его механики, увеличению металлоемкости и трудоемкости изготовления, снижению ремонтпригодности. Поэтому в соответствии с современной тенденцией в области станкостроения в станках роторного типа представляется целесообразной замена кинематических связей между исполнительными органами электронными связями между электродвигателями их приводов и использование программируемых контроллеров для управления.

На рис. 7.16 представлена кинематико-компоновочная схема одного из n -го количества одинаковых зубодолбежных станков с касательным врезанием, составляющих роторный зубодолбежный станок, у которого каждый исполнительный орган оснащен отдельным электродвигателем [10].

На станине 1 установлен с возможностью вращения относительно колонны 2 ротор 3. Привод вращения ротора осуществляется электродвигателем 4 через червячную передачу 5. В приводе ротора можно использовать как нерегулируемый, например асинхронный, так и регулируемый электродвигатель. На основании ротора 3 равномерно по окружности с возможностью движения по направляющим 6 размещены круговые столы 7. Привод каждого кругового стола 7 осуществляется от отдельного регулируемого,

высокомомментного электродвигателя 8 через зубчато-реечную передачу 9. На каждом круговом столе 7 смонтирован делительный стол 10, получающий круговую подачу от кинематически связанного с ним регулируемого высокомомментного электродвигателя 11. В верхней части ротора 3 установлены инструментальные суппорты 12 в количестве, равном количеству делительных столов. В каждом суппорте 12 смонтирован шпindelь 13, несущий стандартный долбляк. Привод поступательно-возвратного движения шпинделя осуществляется кулисным механизмом 14, кинематически связанным с электродвигателем 1. Приводы круговых подач шпинделей осуществляются от регулируемых высокомомментных электродвигателей 16. На делительных передачах исполнительных органов – роторе, круговых и делительных столах и шпинделях установлены импульсные измерительные преобразователи соответственно 17, 18, 19, 20, предназначенные для преобразования круговых частот вращения исполнительных органов в последовательности импульсов, сообщаемых в электронную систему отслеживающей синхронизации их приводов.

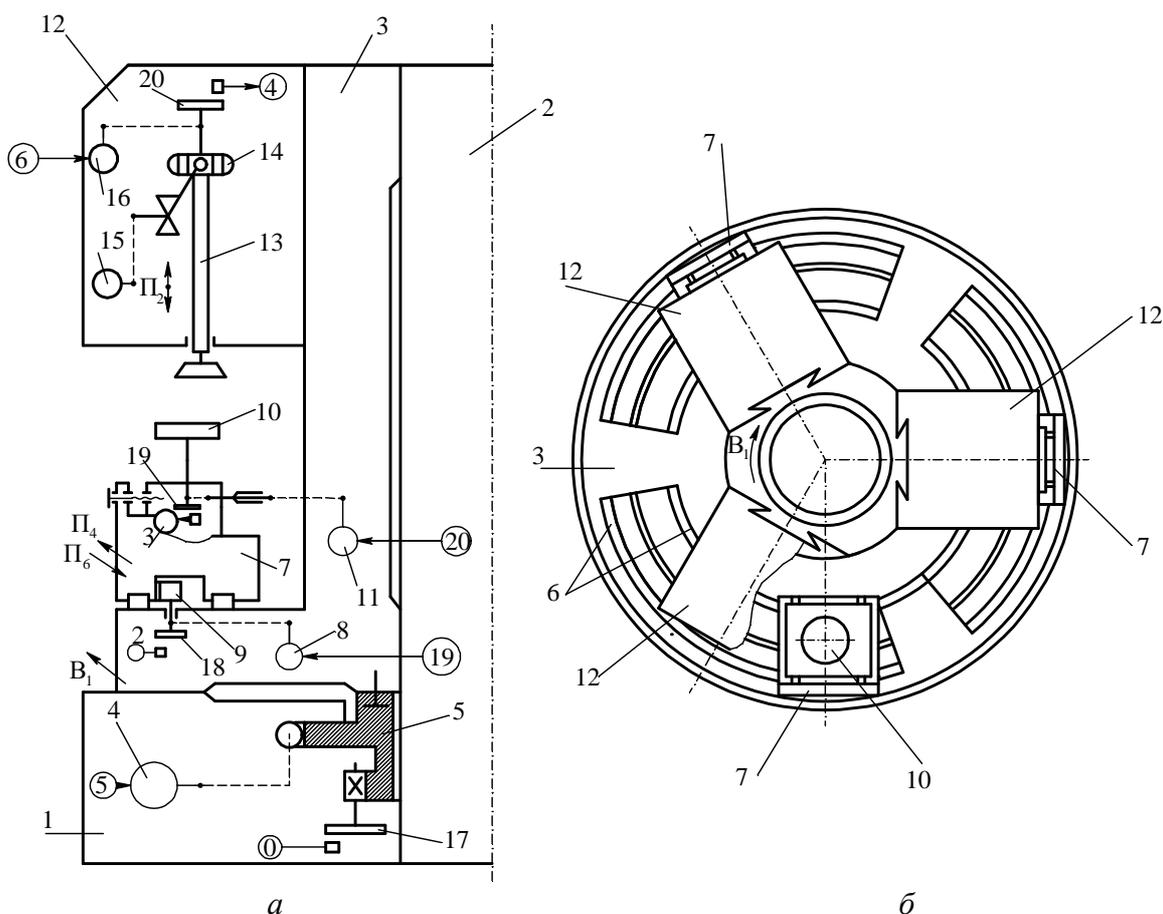


Рис. 7.16. Роторный зубодолбежный станок:
а – кинематическая структура; *б* – вид в плане при $n = 3$

Система отслеживающей синхронизации выполнена по схеме ведущая – ведомая координаты. Ведущими координатами являются шпиндели 13 и круговые столы 7.

На рис. 7.17 представлен один канал блок-схемы формирования сигналов управления круговыми подачами ротора и ведущих координат (круговых столов и шпинделей). Причем формирование сигнала управления круговой подачи шпинделя осуществляется по схеме с автоматической

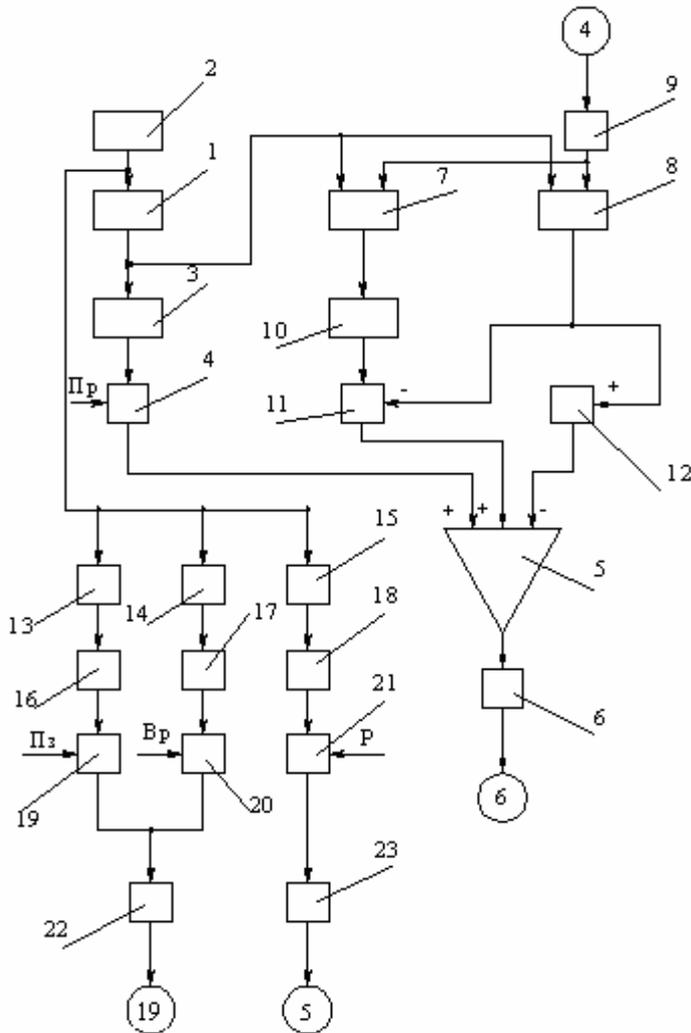


Рис. 7.17. Блок-схема формирователя сигналов управления ротора, круговых столов и шпинделей

двухсторонней коррекцией погрешностей его привода по сигналу эталонного генератора (патент 8621(ВУ)).

Задатчиком для электродвигателя привода круговой подачи шпинделя является делитель частоты 1, соединенный своим входом с эталонным генератором 2, а выходом через импульсно-аналоговый преобразователь 3, элемент И 4, первый положительный вход – выход параллельного сумматора 5, усилитель мощности 6 – с электродвигателем 16 привода вращения шпинделя 13 (рис. 7.16) и с первыми входами фазового 7 и знакового 8 дискриминаторов. Вторые входы дискриминаторов соединены с выходом счетчика импульсов 9, вход которого соединен с импульсным измерительным преобразователем 20, установленным на шпинделе.

Выход фазового дискриминатора 7 через импульсно-аналоговый преобразователь 10 соединен с аналоговыми входами ключей 11 и 12, управляемых соответственно отрицательным и положительным потенциалами. Выход знакового дискриминатора 8 соединен с потенциальными входами ключей 11 и 12, а выходы этих ключей соединены соответственно со вто-

рым положительным и отрицательным входами параллельного сумматора 5. Делитель частоты 1 состоит из счетчика импульсов и блока установки коэффициента деления. Импульсный сигнал с выхода этого делителя преобразуется в импульсно-аналоговом преобразователе 3 в постоянное напряжение, пропорциональное частоте входного сигнала. Это напряжение после усиления по мощности в усилителе мощности 6 запускает электродвигатель привода круговой подачи (вращения шпинделя). Одновременно следующим образом устраняется девиация механики этого привода. На первые входы дискриминаторов 7 и 8 непрерывно поступает задающий сигнал с делителя частоты 3, а на вторые входы этих дискриминаторов – импульсный сигнал с импульсного измерительного преобразователя 20, соответствующий мгновенному значению действительной круговой подачи. В дискриминаторах непрерывно происходит сравнение обоих сигналов. В результате на выходе фазового дискриминатора 7 образуется сигнал абсолютной погрешности, который после преобразования в импульсно-аналоговом преобразователе 10 поступает на аналоговые входы ключей 11 и 12. Одновременно на выходе знакового дискриминатора 8 непрерывно образуется отрицательный потенциал при отставании шпинделя от заданного значения и положительный потенциал при опережении. Этот потенциал поступает на потенциальные входы ключей 11 и 12 и открывает один из них. При открывании ключа 11, управляемого отрицательным потенциалом, сигнал с его выхода поступает на второй вход сложения параллельного сумматора 5, а при открывании ключа 12, управляемого положительным потенциалом, сигнал с его выхода поступает на вход вычитания параллельного сумматора 5. В итоге в зависимости от знака погрешности в параллельном сумматоре 5 происходит увеличение или уменьшение задающего сигнала, действующего на его первом входе, т. е. происходит его двухсторонняя автоматическая коррекция относительно номинального значения.

Формирование сигналов управления приводами круговых подач остальных $n - 1$ шпинделей происходит аналогично. При этом общим задатчиком для схем формирования является делитель частоты 1.

Задатчиками для приводов подач позиционирования и врезания круговых столов, а также для привода подачи ротора являются делители частоты соответственно 13, 14, 15, имеющие такую же структуру, что и делитель частоты 1. Входы этих делителей частоты объединены и соединены с выходом эталонного генератора 2, а их выходы соединены с импульсно-аналоговыми преобразователями 16, 17, 18 соответственно. Выходы этих преобразователей соединены с входами аналоговых элементов И 19, 20, 21 соответственно. Выходы элементов И 19, 20 объединены и соединены с

усилителем мощности 22, у которого выход соединен с электродвигателями круговых столов. Выход элемента И 21 соединен с усилителем мощности 23, соединенного своим выходом с электродвигателем ротора. Таким образом, на входах элементов И 19, 20, 21 при включенном эталонном генераторе 2 постоянно действуют сигналы управления приводами соответствующих круговых столов и ротора. Девиация приводов механики ротора и круговых столов, при необходимости ее устранения, осуществляется на основе сравнения задающих сигналов, постоянно действующих на выходах импульсно-аналоговых преобразователей 16, 17, 18 с сигналами-аналогами действительных подач, действующими на соответствующих импульсных измерительных преобразователях 17 и 18 (рис. 7.16). Схема сравнения и двухсторонней коррекции управляющих сигналов аналогична рассмотренной при описании решения такой же задачи при коррекции сигнала управления приводом круговой подачи шпинделя.

С точки зрения кинематической структуры блоки установки коэффициента деления в делителях частоты выполняют функцию органов настройки соответствующих подач.

Система формирования сигнала управления делительного стола на этапе врезания и на этапе профилирования нарезаемого колеса выполнена по схеме (рис. 7.18), где делительный стол является ведомой координатой. На этапе врезания шпиндель и круговой стол одновременно являются задающими координатами, а при профилировании задающей координатой является шпиндель. При этом на этапе профилирования осуществляется двухсторонняя коррекция сигнала управления привода делительного стола (на схеме представлен один канал) по сигналу задающей координаты.

Задатчиками для электродвигателя привода ведомой координаты (делительного стола) на этапе врезания являются импульсные измерительные преобразователи 18 и 20, установленные на делительных передачах соответственно кругового стола 7 и шпинделя 13 (рис. 7.16). Импульсный измерительный преобразователь 18 через соединенные последовательно делитель частоты 1, импульсно-аналоговый преобразователь 2 и элемент И 3, управляемый аналоговым сигналом, соединен с первым входом сумматора 4. А импульсный измерительный преобразователь 20 соединен с входом ключа 5 (например, элемент И 2), имеющего два аналоговых управляющих входа и два выхода. Один выход этого ключа соединен с входом делителя частоты 6, а другой выход – с входом умножителя частоты 7. Выходы делителя частоты 6 и умножителя частоты 7 объединены и соединены с входом элемента И 9, управляемого аналоговым сигналом, и с входом импульсно-

аналогового преобразователя 8, соединенного своим выходом со вторым входом сумматора 4. Выход этого сумматора соединен с первым входом сложения параллельного сумматора 10. Выход элемента И 9 соединен с первыми входами знакового 11 и фазового 12 дискриминаторов. Вторые входы этих дискриминаторов соединены с импульсным измерительным преобразователем 19, установленным на делительной передаче ведомой координаты. Выход знакового дискриминатора 11 соединен с потенциальными входами элементов И 13, 14, управляемых соответственно отрицательным и положительным потенциалами. Выход элемента И 13 соединен со вторым положительным входом параллельного сумматора 10, а выход элемента И 14 – с отрицательным входом этого сумматора. Выход фазового дискриминатора 12 через импульсно-аналоговый преобразователь 15 соединен с аналоговыми входами элементов И 13, 14. Выход параллельного сумматора 10 через усилитель мощности 16 соединен с электродвигателем 11 делительного стола (ведомая координата).

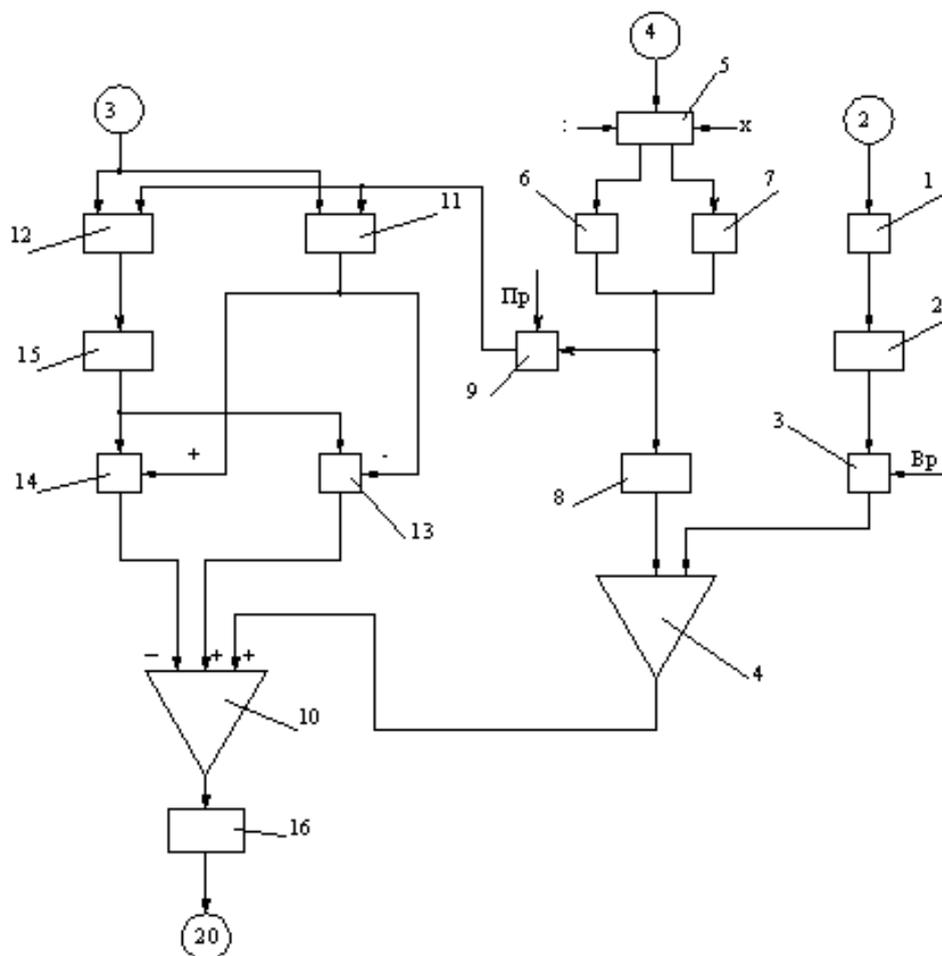


Рис. 7.18. Блок-схема формирователя сигнала управления ведомой координаты (делительного стола)

Делители частоты 1 и 6 аналогичны делителю частоты, используемому в схеме формирования сигнала управления приводами круговых подач шпинделя. Умножитель частоты 7 состоит из счетчика импульсов и блока установки коэффициента умножения. Выбор делителя частоты 6 или умножителя частоты 7 зависит от передаточного отношения функциональной связи долбяк – заготовка. Таким образом, блоки установки коэффициента деления или умножения соответственно в делителе частоты 6 или в умножителе частоты 7 выполняют функцию органа настройки на круговую подачу делительного стола станочного зацепления долбяк – заготовка, а совместно с делителем частоты 1 ведущей координаты (рис. 7.17) – органа настройки на траекторию этого зацепления. Блок установки коэффициента деления делителя частоты 1 выполняет функцию органа настройки на дополнительный поворот делительного стола на этапе врезания, а совместно с блоком установки коэффициента деления делителя частоты 14 (рис. 7.17) ведущей координаты на этапе врезания – органа настройки на траекторию станочного зацепления заготовка (касательное движение) – заготовка (дополнительный поворот).

Схемы формирователей сигналов управления приводами подач остальных $n - 1$ ведомых координат (делительных столов) аналогичны.

Связь системы синхронизации с центральным командоаппаратом или программируемым контроллером осуществляется посредством бесконтактных конечных переключателей, установленных на станине и роторе станка в точках, соответствующих позициям E, A, C, D (рис. 5.6).

Циклы обработки зубчатых колес на каждом из делительных столов одинаковы но смещены во времени на величину, равную времени поворота ротора в движении B_1 на угол $2\pi/n$, где n – количество однотипных зубодолбежных станков, составляющих структуру роторного станка.

На рисунке 7.16 показано исходное для обработки положение, при котором круговой стол 7 находится в положении относительно инструментального суппорта 12 на позиции загрузки – выгрузки. В следующем по направлению вращения ротора положении исполнительных органов 7 и 12 происходит профилирование зубчатого колеса. В третьем положении профилирование закончено, осуществляется вывод долбяка из зоны зацепления и начинается этап позиционирования кругового стола в зону загрузки-выгрузки. Рассмотрим взаимодействие исполнительных органов станка по циклу обработки одного зубчатого колеса.

При включении эталонного генератора 2 импульсный сигнал с его выхода (рис. 7.17) преобразуется в импульсно-измерительных преобразователях $3, 16, 17, 18$ в постоянное напряжение. Затем по программе на элементы $И 19$ и 21 подается управляющий потенциал (символы $Из$ и P). Напряжение с выхода импульсно-аналогового преобразователя 18 сообщает-

ся через элемент И 21 и усилитель мощности 23 электродвигателю ротора, а напряжение с выхода импульсно-аналогового преобразователя – через элемент И 19 и усилитель мощности 22 электродвигателю продольного стола. В результате ротору сообщается движение подачи B_1 , а круговому столу – B_3 . На участке позиционирования EA (рис. 1) круговой стол догоняет инструментальный суппорт. В конечной точке A участка позиционирования срабатывает конечный переключатель системы управления циклом, с элемента И 19 снимается управляющий потенциал $Пз$, а элементу И 20 сообщается управляющий потенциал (символ Bp). В результате круговому столу сообщается подача врезания B_5 . Одновременно включается привод поступательно-возвратного движения шпинделя долбяка.

На этапе врезания делительному столу сообщается движение B_6 , согласованное с движением B_5 . Осуществляется это следующим образом. Сигнал – аналог подачи B_5 кругового стола – поступает с импульсного измерительного преобразователя 18 на делитель частоты 1 канала отслеживающей синхронизации (рис. 4), где происходит его деление в соответствии с коэффициентом деления, определяющим передаточное отношение станочного зацепления сложного движения врезания. Импульсный сигнал с выхода делителя частоты после преобразования в аналоговую форму в импульсно-аналоговом преобразователе 2 через последовательно включенные элемент И 3, открытый по управляющему входу потенциалом Bp , сумматор 4, параллельный сумматор 10 и усилитель мощности 16, сообщается электродвигателю 11 привода делительного стола.

Этап врезания прекращается в конечной точке C участка врезания AC по команде конечного переключателя системы управления циклом. Управляющий потенциал Bp снимается с соответствующих элементов И. В результате сложное движение врезания B_5B_6 прекращается. Одновременно на входы элементов И 4 (рис. 3) и И 9 (рис. 4) поступает управляющий потенциал на профилирование колеса (символ $Пр$). Управляющий потенциал, действующий на управляющем входе элемента И 4, включает привод круговой подачи шпинделя, являющегося ведущей координатой движения обката (профилирования) B_2B_4 (работа схемы формирования сигнала управления этим приводом описана выше). Функциональная связь движений B_2 и B_4 осуществляется схемой отслеживающей синхронизации.

Сигнал – аналог круговой подачи шпинделя – поступает с импульсного измерительного преобразователя 20, установленного на шпинделе, на вход элемента И 22, один из управляющих входов которого при наладке открыт для прохождения задающего сигнала на вход делителя частоты 6 или умножителя частоты 7 (символы «:» или «×») в соответствии с передаточным отношением станочного зацепления долбяк – заготовка.

После умножения или деления задающий сигнал преобразуется в аналоговую форму в импульсно-аналоговом преобразователе 8 через сумматор 4, первый вход – выход параллельного сумматора 10, усилитель мощности 16 сообщается электродвигателю кругового стола. Одновременно устраняется девиация привода кругового стола. Сигнал с выхода делителя или умножителя частоты через открытый по управляющему входу потенциалом *Пр* элемент И 9 поступает на первые входы знакового 11 и фазового 12 дискриминаторов, на вторых входах которых одновременно поступает сигнал с импульсного измерительного преобразователя, установленного на делительной передаче делительного стола. При непрерывном мгновенном сравнении сигналов на выходе фазового дискриминатора образуется сигнал абсолютной погрешности, а на выходе знакового дискриминатора – ее погрешности по знаку. Сигнал с выхода знакового дискриминатора 11 открывает по управляющему входу элемент И 13, управляемый отрицательным потенциалом, или элемент 14, управляемый положительным потенциалом. С выхода фазового дискриминатора сигнал абсолютной погрешности преобразуется в аналоговую форму и поступает на входы элементов И 13 и 14. Этот сигнал в зависимости от его знака поступает через один из элементов И на второй положительный или на отрицательный входы параллельного сумматора 10, происходит двухсторонняя коррекция задающего сигнала ведомой координаты (делительного стола).

Профилирование прекращается по сигналу конечного переключателя после переноса ротором исполнительных органов (обоих столов и инструментального шпинделя) в конечное положение участка профилирования *СД*. В этом положении управляющий потенциал *Пр* снимается с соответствующих ключей, приводы шпинделя и делительного стола отключаются. Прекращается также поступательно-возвратное движение шпинделя, и он выводится в крайнее верхнее положение. Одновременно на элемент И 19 подается управляющий потенциал, и круговой стол на подаче врезания уходит из зоны профилирования по направляющим ротора по ходу его вращения. В положении загрузки-выгрузки конечным переключателем системы управления циклом электродвигатель кругового стола реверсируется и одновременно включается реле времени. Круговой стол, перемещаясь в направлении, противоположном направлению движения ротора, остается неподвижным в зоне загрузки-выгрузки в течение времени, определяемом циклом обработки. За это время снимается нарезанное колесо, устанавливается новая заготовка, а инструментальный суппорт перемещается на участок позиционирования. По окончании времени выдержки реле времени выключается, на управляющий вход соответствующего элемента И поступает потенциал *Пз* и цикл обработки повторяется.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Способ обработки как техническую охраноспособную идею можно рассматривать как первообразную качественную модель будущей технологической операции и соответствующей технологической машины. Повышается быстроходность технологических машин, совершенствуются системы управления и, как следствие, возрастает производительность обработки. Вместе с тем, как показывает практический опыт, способ обработки часто остается неизменным. Например, станкостроение в ряде поколений токарных станков оставляло неизменными пионерные способы токарной обработки (продольное точение, торцевое точение, нарезание резьбы), использующиеся на промышленной основе с 1800 года. В частности это можно объяснить исключительной простотой токарного резца, простотой пионерных способов токарной обработки и как, следствие, относительной простотой, универсальностью и мобильностью токарного станка. Последующее развитие токарной обработки связано главным образом с токарным резцом с круглой режущей кромкой и фрезой. Использование такого токарного резца привело к изобретению первообразных способов обработки круглыми принудительно вращающимся и самовращающимся резцами. А использование фрезы – к изобретению первообразного способа фрезоточения по физической сущности являющегося промежуточным методом обработки между точением и фрезерованием. В полной мере это относится также к другим многообразиям способов формообразующей обработки. Например, к обкатному зубодолблению цилиндрических колес, обработке сложных поверхностей и др. В частности развитие обкатного зубодолбления относительно подробно рассмотрено в данном пособии.

Высшая школа практически не имеет дисциплин, которые дают относительно полное представление о типологии способов обработки конкретной отрасли техники, соответствующей инженерной специальности. В какой-то мере этот пробел устраняется в данном пособии, посвященном системологии способов формообразующей обработки. В пособии на основе теории систем сведены в единый комплекс понятия, определения и положения, основанные на сущности и закономерностях структуры, функции, создания и использования искусственно создаваемых технических идей – способах обработки, выделенных автором в класс S-систем.

В пособии на основе анализа многочисленных примеров, преимущественно из патентных источников, дается однозначное определение способа формообразующей обработки, показывается его системный характер. Таким образом, доказывается, что любой способ обработки – есть вполне

определенный объект, структура и функция которого не сводятся к структуре и функции, составляющих его элементов. Всеобщей характеристикой S-систем является цель, рассматриваемая как критерий целесообразности развития многообразия этих систем. В пособии наиболее динамично этот критерий проявляется на примере системного анализа обкатного зубодолбления. На базе морфологического (структурного) описания S-систем сформулировано понятие о критерии сложности способа обработки. Показан его всеобщий характер. Еще одним общим критерием является понятие об относительной производительности по основному и по штучному времени функционирования способов обработки. Этот критерий устанавливает преимущественную качественную связь способа формообразующей обработки с технологической операцией. Названные критерии позволяют сравнивать различные S-системы при их относительной оценке.

В пособии на основе системной концепции показана возможность создания банка данных о непрерывно пополняющемся многообразии S-систем. Приведены фрагменты такого банка по результатам системного анализа способов, образующих конкретный вид обработки – обкатное зубодолбление.

В пособии рассматривается также реализация ряда рассмотренных способов зубообработки в частных кинематических структурах зубодолбежных и зубофрезерных станков, преимущественно, с электронными связями между их исполнительными органами. Примеры для этого раздела также заимствованы из патентных источников.

Специальная проблематика системологии способов формообразующей обработки излагается с относительно высокой степенью абстракции и обобщения и в то же время достаточной для понимания и возможного переноса ее на другие технические объекты. Представляется, что такой подход соответствует университетскому уровню образования.

ВОПРОСЫ К ЗАЧЕТУ

1. Сущность понятия общей теории систем (по Л. Берталанфи) и ее связь с экспериментальными исследованиями. Объективная необходимость создания теории систем. Виды систем.

2. Определение понятия системологии способов формообразующей обработки, т. е. технических идей, реализуемых в технологических операциях и соответствующих технологических машинах.

3. Определение понятия способа формообразующей обработки. Конкретные примеры способов.

4. Определение понятия система. Класс S-систем. Примеры способов формообразующей обработки, или S-систем.

5. Цель как критерий целесообразности непрерывного развития многообразия S-систем. Примеры S-систем, обеспечивающих достижение пионерной, первообразной и производной целей.

6. Целесообразность представления S-системы на первом уровне разбиения в виде объединения относительно выделенных подсистем. Конкретные примеры.

7. Примеры S-систем, функционирующих в условиях статической настройки. Структура и функция таких систем на первом уровне разбиения.

8. S-системы, функционирующие в условиях динамической настройки. Структура и функция таких систем на первом уровне разбиения. Пример способа формообразующей обработки.

9. Сравнение S-системы, функционирующей в условиях статической настройки с S-системой, функционирующей в условиях динамической и статической настроек. Предпочтительная целесообразность их использования в технологическом оборудовании.

10. Определение понятия поверхности. Принципиальное различие между геометрической (теоретической) и реальной поверхностью, получаемой при формообразующей обработке.

11. Определение понятия вспомогательного элемента. Примеры вспомогательных элементов различных инструментов, в том числе физических объектов, заменяющих традиционные инструменты.

12. Определение понятия характеристического образа инструмента. Примеры характеристических образов инструментов и заменяющих их физических объектов.

13. Понятие мощность характеристического образа инструмента. Примеры инструментов и физических объектов, выполняющих функцию инструмента, и формализованная мощность их характеристического образа.

14. Методика на языке теории множеств образования воспроизводящей линии посредством следа.

15. Методика на языке теории множеств образования воспроизводящей линии посредством касания.

16. Методика на языке теории множеств образования воспроизводящей линии посредством обката.

17. Методика на языке теории множеств образования воспроизводящей линии посредством копирования (зеркального отображения).

18. Методика получения геометрической поверхности посредством сочетания воспроизводящих линий. Конкретные примеры.

19. Классы образования реальных поверхностей. Примеры. Практическая невозможность реализации некоторых теоретических классов образования поверхностей.

20. Методика на языке теории множеств образования комбинированных подклассов воспроизведения реальных поверхностей. Примеры реализации комбинирования.

21. Класс образования поверхности при зуботочении обкатным инструментом типа долбяка, при продольном точении круглым резцом, при затыловании модульной фрезы, при затыловании червячной фрезы.

22. Методика описания кинематической подсистемы способов формообразующей обработки. Конкретные 2 – 3 примера.

23. Методика описания базирующей подсистемы способов формообразующей обработки. Системное описание стандартных баз.

24. Методика описания энергетической подсистемы способов формообразующей обработки. Примера 2 – 3 способов формообразующей обработки, в которых используется более одного энергетического воздействия на материал заготовки.

25. Методика описания подсистемы стабилизации силового воздействия на заготовку в способах формообразующей обработки на примере продольного точения.

26. Методика описания подсистемы стабилизации силового воздействия на заготовку на примере многопроходного зубодолбления.

27. Примеры способов формообразующей обработки, использующих различные виды энергетического воздействия. Математическая модель, каждого из них, отображающая структуру, определенную группу свойств и функцию.

28. Сущность принципа совмещения обработки одним инструментом нескольких заготовок на конкретном примере.

29. Сущность принципа совмещения обработки с транспортированием на конкретном примере.

30. Сущность принципа изменения правил выполнения приемов. Конкретный пример способа обработки.

31. Сущность принципа совмещения исполнительных движений при формообразующей обработке. Примеры использования этого принципа при зубообработке.

32. Сущность принципа согласования ритмов физического воздействия на заготовку. Примеры использования этого принципа.

33. Понятие коэффициента сложности кинематической подсистемы на примере 2 – 3 способов формообразующей обработки.

34. Понятие коэффициента сложности кинематической подсистемы на примере 2 – 3 способов формообразующей обработки.

35. Понятие коэффициента сложности базирующей подсистемы на примере 2 – 3 комплектов баз при формообразующей обработке.

36. Понятие коэффициента сложности энергетической подсистемы на примере 2 – 3 способов формообразующей обработки.

37. Понятие коэффициента сложности подсистемы стабилизации силового воздействия на примере способа точения цилиндрической поверхности.

38. Понятие коэффициента сложности способа формообразующей обработки. Определение этого коэффициента на примере описания произвольно выбранного способа обработки.

39. Методика сравнительного анализа способов формообразующей обработки по штучному времени и по производительности формообразования поверхности.

СЛОВАРЬ СПЕЦИФИЧЕСКИХ ТЕРМИНОВ

Многообразие терминов и определений, используемых в системологии, можно разделить на две группы:

- термины и определения, используемые в различных общепромышленных и специальных дисциплинах машиностроительного профиля;
- специфические термины и определения, характерные для системологии способов формообразующей обработки.

В данном словаре приводятся только специфические термины и их определения, используемые в системологии.

Общая теория систем – это логико-математическая область, задачей которой является формулирование и вывод общих положений, возможных при рассмотрении систем вообще (по Л. Бераланфи).

Система ($n + 1$ -е определение) – есть совокупность целесообразно организованных функционально связанных элементов, участвующих в процессе достижения определенной цели, выступающая по отношению к другим системам и окружающей среде как нечто единое. Качественная определенность системы обусловлена ее структурой и функцией.

Структура системы – это схема связей и отношений между ее элементами.

Функция системы – способность к целесообразной деятельности в рамках более сложной системы, в которую она входит.

Системология – анализ, синтез и систематизация объектов реальной действительности, объединенных общей пионерной (первообразной) целью.

Способ формообразующей обработки – это целенаправленное множество приемов воздействия посредством инструмента или объекта, выполняющего его функцию, на твердое тело, осуществляемых в заданной последовательности с соблюдением определенных правил, например, в течение некоторого времени, при определенном соотношении воздействий приемов, определенной температуре, определенном состоянии среды, в которой происходит процесс.

Вспомогательный элемент – точка, линия или поверхность на инструменте, перемещаемая по виртуальной воспроизводимой линии при формообразующей обработке.

Характеристический образ инструмента – объединение вспомогательных элементов, отображаемое в виде множества точек на (в) воспроизводимую линию.

Мощность характеристического образа – совокупность вспомогательных элементов инструмента, выраженная в виде вполне определенного класса множеств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bertalanffy L. Ogólna teoria systemów / L. Bertalanffy. – Warszawa: Polskie wydawnictwo narodowe, 1984.
2. Закон Республики Беларусь. О патентах на изобретения и полезные модели / Сборник «Промышленная собственность» (нормативно-методические материалы). Выпуск 4. – Минск: 1998, с. 7.
3. Большая Советская Энциклопедия. – 3-е изд. – М.: Советская энциклопедия, 1971. – Т 16. – с. 472 – 473.
4. Инструкция по государственной научно-технической экспертизе изобретений ЭЗ 2 – 74. Вопросы изобретательства. – № 8. – 1974, с. 29 – 65.
5. Голембиевский, А. И. Основы системологии способов формообразующей обработки в машиностроении / А. И. Голембиевский. – Минск: Наука и техника, 1986.
6. Национальный реестр правовых актов Республики Беларусь. – № 83. – 2003. – с. 39.
7. Федотенок, А. А. Кинематическая структура металлорежущих станков / А. А. Федотенок. – М.: Машиностроение, 1970.
8. Коновалов, Е. Г. Основы новых способов металлообработки / Е. Г. Коновалов. – Минск: Наука и техника, 1961.
9. Резников, А. Н. Развитие науки о резании металлов / А. Н. Резников. – М.: Машиностроение, 1976.
10. Ящерицын, П. И. Технологические основы высокоэффективных методов обработки / П. И. Ящерицын, М. Л. Хейфец и др. – Новополоцк: ПГУ, 1996.
11. Голембиевский, А. И. Синхронизация приводов функционально связанных исполнительных органов зубодолбежного станка роторного типа / А. И. Голембиевский // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Прикладные науки. – 2007. – № 2. – С. 93 – 99.

Учебное издание

ГОЛЕМБИЕВСКИЙ Анатолий Иосифович

**ОСНОВЫ СИСТЕМОЛОГИИ И СИНТЕЗА СПОСОБОВ
ФОРМООБРАЗУЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ РЕЗАНИЯ**

Учебно-методический комплекс
для студентов специальности 1-36 01 03 «Технологическое
оборудование машиностроительного производства»

Редактор Н. В. Байко

Дизайн обложки В. А. Виноградовой

Подписано в печать 08.04.10. Формат 60×84 1/16. Гарнитура Таймс. Бумага офсетная.
Ризография. Усл. печ. л. 11,83. Уч.-изд. л. 11,17. Тираж 45. Заказ № 649.

Издатель и полиграфическое исполнение:
учреждение образования «Полоцкий государственный университет»

ЛИ 02330/0548568 от 26.06.09 ЛП № 02330/0494256 от 27.05.09

211440 г. Новополоцк, ул. Блохина, 29