

А. И. ГОЛЕМБИЕВСКИЙ

# ОСНОВЫ СИСТЕМОЛОГИИ СПОСОБОВ ФОРМООБРАЗУЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Под редакцией  
кандидата технических наук  
В. А. ПЕТРОВА

МИНСК  
«НАУКА И ТЕХНИКА»  
1986

Голембиевский А. И. **Основы системологии способов формообразующей обработки в машиностроении** / Под ред. В. А. Петрова.— Мн.: Наука и техника, 1986.— 168 с.

В книге изложены теоретические основы систематизации способов формообразующей обработки с единых системных позиций. Способ обработки рассматривается как объединение энергетической, кинематической и базирующей подсистем, а все многообразие способов как большая развивающаяся система. Разработаны принципы представления способов обработки в виде формализованных моделей и с этих позиций проведен системно-структурный анализ некоторых множеств способов обработки и предложена их классификация. Изложена методика синтеза кинематической структуры технологических машин и на ее основе разработаны структурные схемы металлорежущих станков, реализующие ряд описанных способов обработки.

Рассчитана на научных и инженерно-технических работников машиностроительного профиля, будет полезна аспирантам и студентам соответствующих специальностей.

Табл. 9. Ил. 53. Библиогр.— 59 назв.

Рецензенты:

А. М. Долгих, канд. техн. наук,  
Р. А. Тихомиров, канд. техн. наук

2704010000—012

Г—77—86

М316—86

## ВВЕДЕНИЕ

В основу любой технологической машины, используемой для образования реальных поверхностей деталей машин, положен определенный способ 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 металлообработки, 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, методов и способов обработки и на этой основе к их систематизации. Известны работы [18, 28, 33, 35, 40, 53 и др.], в которых предлагаются различные частные классификационные системы, базирующиеся на анализе кинематических, технологических, экономических, энергетических и конструктивных факторов. Они имеют важное методологическое значение для разработки научных основ единой классификации, охватывающей все известные и возможные новые способы получения реальных поверхностей в машиностроении независимо от вида используемой энергии. Однако рассмотренные в них вопросы не охва-

тывают с единых позиций всего многообразия способов обработки и, следовательно, не составляют единой теории анализа, синтеза и классификации способов получения поверхностей деталей машин. Таким образом, в теоретической технологии недостаточно исследовано направление, касающееся систематизации способов образования реальных поверхностей. Это направление можно было бы назвать системологией способов обработки в машиностроении.

Отставание теории системологии способов обработки имеет свои преимущественно методологические причины. Первая заключается в известной неопределенности самого понятия способа обработки. В технической литературе не раскрывается содержание этого понятия, нет однозначного определения и в общеметодологической литературе. Часто способ формообразующей обработки рассматривается как аксиоматическое понятие или ассоциируется с другими понятиями: схемой резания или в общем случае схемой формообразования, технологией проведения операции и, наконец, методом обработки. Нетрудно видеть, что каждое понятие определяет различные по содержанию и функции объекты. Следовательно, понятие способа формообразующей обработки не может совмещаться с приведенными понятиями, а их смешение приводит к терминологической путанице.

Вторая причина — отсутствие единого языка исследований, на котором можно было бы описать любой способ обработки независимо от вида энергии. Это объясняется определенной односторонностью известных теоретических концепций, базирующихся в первую очередь на частных технологических направлениях. Выделение тех или иных характеристик в качестве доминирующих при анализе процессов обработки связано с конкретной целью решаемой задачи. Такой подход основан на традициях.

Третья причина заключается в сложности выявления наиболее общих объективно существующих признаков, свойственных всем известным и возможным новым способам обработки, в многогранности вопросов, возникающих при формализации интуитивных представлений, сложившихся в технологической науке.

Теория системологии способов формообразующей обработки в машиностроении позволила бы объективно решать не только частные вопросы выбора наиболее эф-

фективных способов обработки для отдельных конкретных случаев, но и построить систему, определяющую сущность и место каждого способа в общем комплексе известных и возможных новых способов, и выявлять рациональную область их применения. Теория могла бы оказать помощь исследователям и разработчикам на начальных стадиях проектирования технологического оборудования и разработки технологических процессов и содействовать повышению качества промышленной продукции. Она позволила бы, вероятно, отказаться от принципа поиска, базирующегося на интуиции, опыте и известных аналогичных ситуациях при создании новых способов обработки. Заметим, что названный принцип несет отдельные элементы консерватизма сложившихся традиций и психологической инерции, и, следовательно, поиск новых решений только на его основе не всегда приводит к коренной смене ведущих представлений в той или иной области знаний. Одной из конечных целей теории системологии может стать автоматизация выбора способов формообразующей обработки с помощью ЭВМ при решении конкретных технологических задач.

Создание теории системологии способов формообразующей обработки, как показывает опыт, требует усилий многих исследователей. Первоочередной задачей при разработке этой теории является, по-видимому, разработка методологических основ данного научного направления. Предусматривается определение основных понятий, наиболее адекватно раскрывающих физическую сущность основного объекта исследований — способа формообразующей обработки, разработку языка исследований и на его основе принципов составления математической модели, отображающей некоторую группу свойств и закономерностей функционирования способа формообразующей обработки, установление обобщенных теоретических закономерностей систематизации уже существующих и возможных новых способов обработки.

Необходимым условием успешной работы и залогом осязаемого успеха является, по нашему мнению, фундаментальный системный анализ всего комплекса понятий в данном научном направлении. Частный пересмотр отдельных положений, замена одних неугодных понятий другими, механическое введение новых понятий без переосмысливания всей системы существующих воззрений не может дать объективно правильных результатов. Такой

подход к проблеме хорошо согласуется с известным опытом кибернетизации технологии машиностроения [26, 51 и др.]. Руководствуясь именно этими соображениями, в настоящей работе предпринята попытка решения указанной задачи. В работе дано определение понятия способа формообразующей обработки, показан системный характер способов формообразующей обработки, разработан язык системно-структурного анализа способов формообразующей обработки, сформулированы принципы представления способов формообразующей обработки в виде математических моделей (системное описание) с выделением факторов сложности и с этих позиций проведен анализ некоторых множеств способов обработки и выполнена их классификация.

В работе рассмотрены преимущественно способы, основанные на механическом воздействии на твердое тело. Однако разработанные методологические основы системологии способов формообразующей обработки, по мнению автора, носят всеобщий характер. Поэтому результаты анализа могут быть распространены также и на способы, основанные на других физических явлениях.

Вследствие определенной новизны подхода к решению поставленной задачи работа не претендует на исчерпывающие полноту и завершенность, но, как представляется автору, может способствовать формированию целенаправленности исследований в рассматриваемом научном направлении.

# ГЛАВА 1

## СИСТЕМНЫЙ ХАРАКТЕР СПОСОБОВ ФОРМООБРАЗУЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ В МАШИНОСТРОЕНИИ

### 1.1. 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 формообразующей обработки часто смешивается с понятием метода обработки. Причем содержание этих понятий в технической литературе не раскрывается, а предполагается как аксиома.

В общеметодологической литературе 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...» [3]. Из этого следует, что метод обработки как система операций, выполняемых на технологической машине, может включать не только приемы, связанные с формообразованием поверхностей обрабатываемых деталей, но и приемы, непосредственно не связанные с формообразованием, например, управления, обслуживания, уборки стружки, операционного контроля и т. п. Вместе с тем в специальной литературе способ определяется как процесс выполнения взаимосвязанных

действий, необходимых для достижения поставленной цели [25]. Согласно определению, в практике патентования способ не содержит несколько несвязанных между собой совокупностей взаимосвязанных действий, имеющих различное отношение к решаемой задаче. Это позволяет различать способы формообразования, управления технологическими машинами, обслуживания их, способы уборки стружки, охлаждения зоны обработки

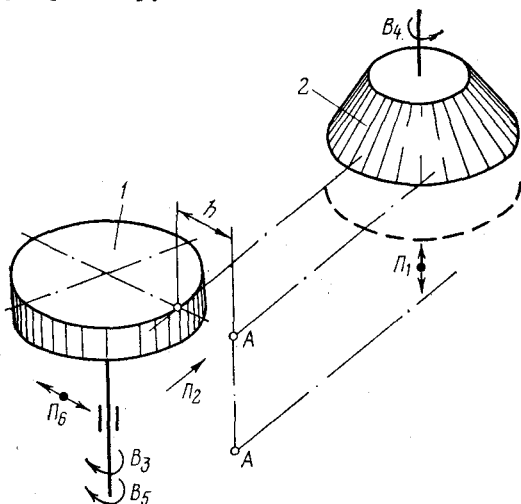


Рис. 1. 1. Способ долбления цилиндрических зубчатых колес при касательном движении врезания

и т. п. Таким образом, можно утверждать, что метод есть более широкое понятие, чем способ. Следовательно, способ — одна из частных конкретных совокупностей приемов или операций метода, наделенных собственной целевой функцией.

Конкретизируем приведенное нормативное определение способа применительно к формообразующей обработке. Предварительно рассмотрим несколько способов формообразующей обработки.

Известен способ долбления цилиндрических зубчатых колес с тангенциальным врезанием [46]. По этому способу (рис. 1.1) заготовку 1 устанавливают на расстоянии  $h$  от плоскости движения врезания, равном половине диаметра делительной окружности долбяка 2. Затем долбяку 2 сообщают поступательно-возвратное движение  $\Pi_1$



скорости резания, и процесс долбления выполняют в два этапа. На первом этапе заготовке 1 сообщают движение врезания  $\Pi_2$ , согласованное с ее вращением  $B_3$ , а долбяку 2 и заготовке 1 — движение обката (профилирования зубьев), состоящее из согласованных вращений  $B_4$  долбяка и  $B_5$  заготовки. Этот этап продолжают до тех пор, пока ось долбяка не переместится на линию  $A-A$ , соответствующую врезанию на высоту зуба нарезаемого колеса. Затем движение врезания  $\Pi_2 \equiv B_3$  прекращают и на втором этапе в течение полного оборота заготовки профилируют нарезаемое колесо движением обката  $B_4 \equiv B_5$ . На обоих этапах обработки заготовке 1 сообщают также движение  $\Pi_6$  отскока, синхронизированное с движением  $\Pi_1$  для устранения скольжения зубьев долбяка по заготовке при холостом ходе.

В приведенном примере способ формообразующей обработки характеризуется некоторой совокупностью приемов, т. е. целенаправленных действий, совершаемых над материальными объектами — заготовкой и режущим инструментом для достижения конкретной цели — получения зубчатого колеса. Наряду с приемами целенаправленных действий и их последовательностью в качестве еще одного признака рассматриваемого способа выступают 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 правила выполнения отдельных приемов не имеют 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.

При изготовлении деталей с износостойким поверхностным слоем (рис. 1.2) [54] заготовку 1 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 резуль-

тате 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.

Данный способ формообразующей обработки, основанный на прибавлении вещества к твердому телу, также

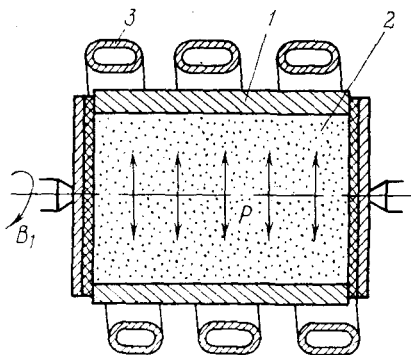


Рис. 1.2. Способ получения внутренних поверхностей с износостойким поверхностным слоем

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

При чистовой упрочняющей обработке конических

поверхностей (рис. 1.3) деталь 1 закрепляют в патроне или в центрах токарного станка и сообщают ей вращательное движение  $B_1$ . Затем движением  $\Pi_3$  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 этого ему сообщают движение подачи  $\Pi_4$  вдоль направляющей обкатываемой поверхности. В результате такого

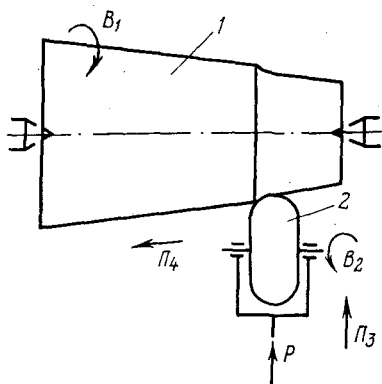


рис. 1.3. Способ обкатки конической поверхности

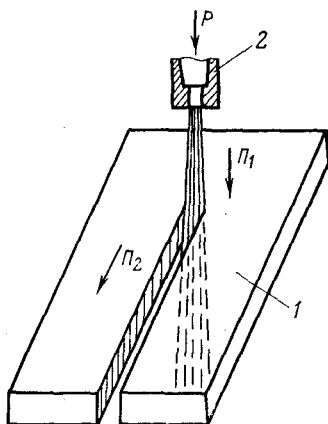


рис. 1.4. Способ резания струей жидкости

целенаправленного воздействия накатным роликом на деталь происходит обработка ее конической поверхности.

Приведенный способ основан на пластическом деформировании поверхностного слоя детали. Целесообразно организованная совокупность приемов воздействия на обкатываемую поверхность характеризует его как целенаправленный технический объект.

На рис. 1.4 приведена схема способа резания струей жидкости [47]. При его осуществлении заготовку 1 устанавливают под соплом 2. Затем через него в направлении резания  $\Pi_1$  подают струю жидкости диаметром 0,12—0,29 мм под давлением свыше 100 МПа со скоростью около 1500 м/с, а заготовке — движение  $\Pi_2$  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 этого класса в нем в качестве инструмента используется струя жидкости. Вместе с тем способ резания струей жидкости, как и другие способы, представляет собой 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 функции объекту, основанному на каком-либо физическом эффекте. 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, по мнению автора, позволяет рассматривать и анализировать различные на первый взгляд способы формообразующей обработки совместно с единых позиций.

В заключение определим понятие способа формообразующей обработки.

Способ формообразующей обработки — это целенаправленная совокупность приемов воздействия посредством объекта, выполняющего функцию инструмента, на твердое тело, выполняемых 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, и т. д.

## 1.2. СПОСОБ ФОРМООБРАЗУЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ КАК ЦЕЛЕНАПРАВЛЕННАЯ ТЕХНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

Известны многочисленные попытки дать четкое определение системы. Как правило, они не альтернативны, а взаимодополняют 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 группу входят определения, характеризующие систему как некоторый фрагмент объективной реально 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, по мнению автора, 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 [18] и возникновения поверхности в пространстве и времени [28]. Первое характеризует основную сущность процесса резания — процесс образования стружки [40], 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 в предлагаемом научном исследовании не обязательно 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 металлов резанием используется множество различных способов токарной обработки. Простейший из них, ставший уже классическим, осуществляется в следующей последовательности. Заготовке 1 (рис. 1.5), определенным образом ориентированной относительно резца 2, сообщают вращение  $V_1$  вокруг ее оси, а резцу 2 — поступательное перемещение  $W_2$  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 способа.

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 элементов: приемов (установка заготовки 1, сообще-

ние ей вращения  $B_1$ , сообщение резцу поступательного перемещения  $\Pi_2$ ); 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

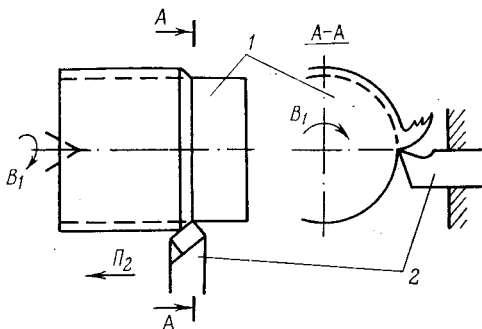


Рис. 1.5. Способ токарной обработки

вращения заготовки). Отметим, что последних два элемента (правила выполнения отдельных приемов) в практике металлообработки подразумеваются как сами собой разумеющиеся. Поэтому при описании способов формообразующей обработки 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 одновременно является системой. Можно целенаправленно изменять структуру и функцию исходных способов и тем самым полу-

чать 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. 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 целевой функцией; 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 технологических задач. Следовательно, они могут быть отнесены к категории технических систем, обозначаемых в дальнейшем как *S*-системы.

### 1.3. СПОСОБ ФОРМООБРАЗУЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ КАК ОБЪЕДИНЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ, КИНЕМАТИЧЕСКОЙ И БАЗИРУЮЩЕЙ ПОДСИСТЕМ

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 пространственных 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. Производную цель появления любой



новой S-системы в каждом конкретном случае по существу можно рассматривать как целевую функцию S-системы. Как показывает анализ патентных источников, целевыми функциями могут быть повышение точности или производительности 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 целевая функция 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 целевая функция, 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.

Прототипом способа зубодолбления с касательным врезанием (см. рис. 1.1) является способ с радиальным врезанием, ставший в настоящее время классическим. Цель (целевая функция) нового способа автором определена в виде улучшения условий резания и повышения стойкости долбяка. По-видимому, в данном случае было бы более корректно задание цели в виде повышения стойкости долбяка за счет улучшения условий резания.

В анализируемом примере целевая функция имеет качественную меру. Поэтому ее параметрическая оптимизация, например, максимизация периода 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 [17], что ставит под сомнение возможность использования способа при проектировании зубодолбежных станков.

Сохраняя преимущество рассматриваемого способа по отношению к его прототипу, заданное качественной целевой функцией, предпримем попытку устранить выявленный недостаток, т. е. найти 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 осуществляем только врезание, а на втором — только обкат (профилирование зубьев). Подачу врезания назначим из условия предельных прочностных возможностей, т. е. равной 1,1—1,3 круговой подачи. Как показывают расчеты [17], 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 целевой функции (повышение производительности), например, при задании максимально допустимой величины огранки зубьев нарезаемого колеса.

Рассматривая различные  $S$ -системы, 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.

Прообразом любой  $S$ -системы служит конкретная технологическая операция, характеризующаяся 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 по-

лучаемых результатов. Можно утверждать, что эта характеристика присуща и  $S$ -системам.

Как известно, 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 [16]. Схема формообразования характеризует общую составляющую  $S$ -систем — кинематическую. Она относительно выделена, наделена определенной структурой и функцией. Назовем ее кинематической подсистемой  $S$ -системы.

Другой 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 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, обуславливающими изменение исходного состояния твердого тела, являются пластическая деформация, вязкое или хрупкое разрушение, плавление, припекание, 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 любой способ формообразующей обработки, определенный как  $S$ -система, можно представить в виде объединения относительно обособленных подсистем (кинематической, базирующей и энергетической), каждая из которых наделена определенной структурой и функцией. Причем, как следует из изложенного выше, структура и функция  $S$ -систем не сводятся непосредственно к структуре и функции составляющих ее подсистем.

#### 1.4. 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 энергии 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 ро-

лика 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.

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. п.

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 тепловую, механическую, химическую, происходит непосредственно в обрабатываемом веществе. При электромеханических способах применяют преимущественно тепловое действие электрического тока, электроэрозионных — эрозионное, электрохимических — химическое.

Незначительную малоисследованную группу составляют способы, основанные на использовании энергии магнитного поля для непосредственного формообразования изделий из расплавленного металла.

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 сфокуси-

рованного 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 последние годы в практике металлообработки развиваются способы, использующие химическую энергию, которая обычно применяется для удаления части вещества твердого тела. Процесс основан на размерном губком травлении, например, химическое фрезерование.

В связи с резким 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 финишной обработки и т. п. Комбинированные S-системы могут различаться по двум признакам [16]: 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 воздействия 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.

Технологические аспекты различных способов формообразующей обработки как традиционных, так и относительно новых подробно рассмотрены в литературе [2, 28, 30, 34, 36, 37, 41, 47, 56 и др.].

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 электроэрозионного явления способствовало созданию нового 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 формообра-

зующей 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.



## ГЛАВА 2

### ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ РЕАЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

#### 2.1. ПОНЯТИЕ О ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОМ ОБРАЗЕ ИНСТРУМЕНТА

Как известно, образование реальной поверхности в металлообработке любым технологическим способом представляет собой по существу процесс образования соответствующей геометрической поверхности, под которой 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, материализованных на рабочей части инструмента [48]. Вспомогательным элементом могут быть материальная точка, линия или некоторая поверхность. Например, при строгании плоскости (рис. 2.1, а) вспомогательным элементом является точка  $1$  — вершина резца. Обе воспроизводящие линии (образующая  $2$  и направляющая  $3$ ) в этом случае воспроизводятся соответственно движением  $\Pi_1$  резца и движением  $\Pi_2$  заготовки.

Вспомогательный элемент — линия по форме и протяженности может соответствовать форме и протяженности образуемой линии. Например, при точении фасонной поверхности (рис. 2.1, б) режущая кромка  $1$  резца является копией образующей  $2$  получаемой поверхности. В этом случае воспроизведение образующей происходит без движения формообразования. Необходимо только установочное движение  $\Pi_2$  для перемещения вспомогательного элемента в исходное положение. Направляющая  $3$  воспроизводится движением  $V_1$  заготовки.

Вспомогательный элемент — линия по форме и протяженности может не соответствовать форме и протяженности образуемой линии. Например, при долблении зубчатой рейки (рис. 2.1, 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  $\Pi_2$  заготовки. Образующая 3 воспроизводится движением  $\Pi_3$  долбяка.

Вспомогательный элемент — поверхность по форме и протяженности соответствует образуемой поверхности.

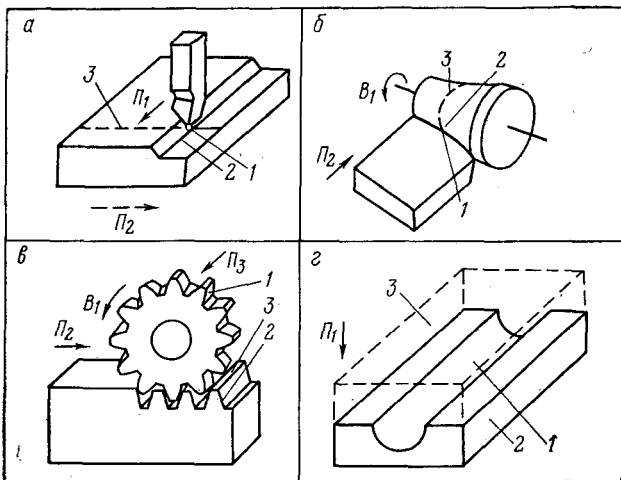


Рис. 2.1. Виды вспомогательных элементов, материализованные на рабочей части инструмента

Например, при штамповке (рис. 2.1, г) рабочая поверхность 1 инструмента (матрицы 2 и пуансона 3) является копией получаемой поверхности. В этом случае образование поверхности происходит без движений формообразования. Необходимо только установочное движение  $\Pi_1$  для перемещения вспомогательного элемента в конечном положении.

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, напри-

мер 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  $M_3$ :

$$P = \{M_3\}_i, \quad (i = 1, 2, 3, \dots, k). \quad (2.1)$$

Назовем класс  $P$  характеристическим образом инструмента, так как именно этот класс определяет поведение производящих линий в процессе формообразования реальных поверхностей [28].

Характеристический образ резца содержит одно множество  $M_3$  материальных точек, мощность которого у острозаточенного резца (рис. 2.1, 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. 2.1, б) равна мощности образующей обрабатываемой поверхности. Характеристический образ зуборезного долбяка (рис. 2.1, в) есть  $K$ -элементный класс равномошных множеств  $M_3$ . Характеристический образ штампа для объемной штамповки — декартово произведение

$$P_{\text{шт}} = \{M_{30} \times M_{3н}\},$$

где  $M_{30}$  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 напоминающего 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 (см. рис. 1.2) 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 строчки на другую равносителен прерывистому воспроизведению направляющей. Следовательно, характеристический образ потока дроби можно представить в виде  $K$ -элементного класса множеств  $M_{\alpha}$ , мощность каждого из которых равна единице.

При лазерном сверлении отверстий 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  $M_{\alpha}$ , мощность которого равна образующей получаемой поверхности.

При получении цилиндрических поверхностей с износостойким слоем поле центробежных сил, воздействуя на расплавленное вещество, напрессовывает его по всей поверхности заготовки одновременно. Процесс в какой-то мере формально напоминает объемную штамповку. При этом цилиндрическое отверстие заготовки выполняет 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.

Мощность характеристического образа некоторых инструментов

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

В табл. 2.1 приведен ряд инструментов 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,  $M_\Theta$  — мощность характеристического образа больше единицы, но меньше воспроизводимой линии,  $K$  — целое число. 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 из разных областей формообразующей обработки позволяют утверждать, что понятие о характеристическом образе 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 как  $S$ -системы.

## 2.2. ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ КЛАССЫ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Будем рассматривать образующую и направляющую как вполне определенные множества точек  $M_0$  и  $M_H$ . 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  $M_0$  и  $M_H$  при относительном перемещении характеристического образа по производящим линиям

$$f: P \rightarrow M_0; \quad \bar{f}: P \rightarrow M_H.$$

В качестве способа, посредством которого каждому  $X \in P$  ставится в соответствие некоторый элемент из  $M_0$  и  $M_H$ , укажем операцию пересечения множеств  $M_0$  и  $M_H$  с характеристическим образом  $P$  [23].

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, отсчитываемое от некоторой фиксированной точки  $0$  на этой кривой как однопараметрическое семейство точек, зависящих от времени  $t$ .

В выражении (2.1)  $i=1$ . Тогда характеристический образ содержит единственное множество

$$M_0 = \{x\}.$$

Пусть характеристический образ  $P$  непрерывно скользит вдоль кривой  $L$ . Тогда единственному элементу  $X \in M_0$  при его отображении в  $M$  будет непрерывно и однозначно соответствовать образ  $f(x)$  в множестве  $M$ , фиксиру-

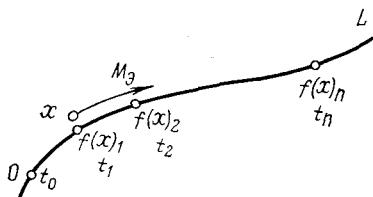


Рис. 2.2. Класс образования производящей линии вида  $H_{11}^0$

ясь на отрезке  $OL$  (рис. 2.2) как возрастающая во времени последовательность

$$A_1 = \{f(x)_1, f(x)_2, \dots, f(x)_n\}. \quad (2.2)$$

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. 2.3). Тогда элемент  $x \in M_3$  будет отображаться в множество  $M$  через некоторые промежутки времени, определяемые круговой частотой вращения  $P$  относительно точки  $O_1$ . На отрезке  $OL$  будет непрерывно фиксироваться возрастающая во времени последовательность

$$A_2 = \{f(x)_1, f(x)_2, \dots, f(x)_n\}. \quad (2.3)$$

Назовем такой вид образования производящей линии прерывистым ( $\Pi_{11}$ )

$$M_3 = \{x\}_j, \quad (j = 2, 3, \dots, n).$$

Пусть характеристический образ  $P$  обкатывается по кривой  $L$  (рис. 2.4). Тогда произвольному элементу

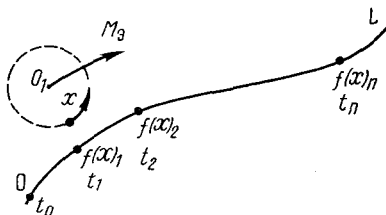


Рис. 2.3. Класс образования производящей линии вида  $\Pi_{11}$

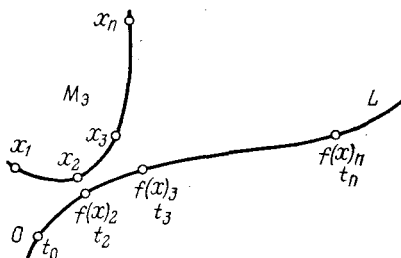


Рис. 2.4. Класс образования производящей линии вида  $H^k_{11}$

$x \in M_3$  при отображении в  $M$  будет однозначно соответствовать образ  $f(x)_j$  в множестве  $M$ . На отрезке  $OL$  образы  $f(x)_j$  будут фиксироваться в виде возрастающей во времени последовательности

$$A_3 = \{f(x)_2, f(x)_3, \dots, f(x)_n\}. \quad (2.4)$$

Назовем такой вид образования производящей линии непрерывным при качении ( $H^{k,1}_j$ ).

При отображении характеристического образа  $P$  одновременно каждому  $x_j \in M_3$  ставится в соответствие

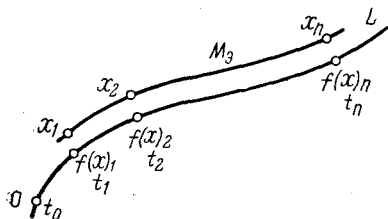


Рис. 2.5. Класс образования производящей линии вида Е

$f(x)_j \in M$ . Следовательно, на отрезке  $OL$  (рис. 2.5) одновременно фиксируется множество

$$A_4 = \{f(x)_j\}, \quad (j = 2, 3, \dots, n). \quad (2.5)$$

Таким образом получим схему одновременного ( $E$ ) образования производящей линии.

В выражении (2.1)  $i = 2, \dots, k$ . Тогда характеристический образ  $P$  представляет собой последовательность равномошных множеств  $M_{3i}$ :

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

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. 2.6) через промежутки времени, определяемые частотой вращения  $P$  относительно  $O_1$ , будет фиксироваться возрастающая во времени последовательность семейства одноэлементных образов

$$A_5 = \{f(x)\}_i, \quad (i = 2, \dots, k). \quad (2.6)$$

Назовем такой вид образования производящей линии прерывистым [ $\Pi_{i1}$ ]

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



Пусть характеристический образ  $P$  обкатывается по кривой  $L$  так, что каждому  $x_j \in M_3$  при отображении в  $M$  взаимно однозначно соответствует образ  $f(x)_{ij}$ . Тогда на отрезке  $OL$  (рис. 2.7) будет фиксироваться непрерывно возрастающая во времени последовательность

$$A_6 = \{ \{f(x)_{22}, f(x)_{23}, \dots, f(x)_{2n}\} \{f(x)_{32}, f(x)_{33}, \dots, \dots, f(x)_{3n}\} \dots \{f(x)_{k2}, f(x)_{k3}, \dots, f(x)_{kn}\} \}. \quad (2.7)$$

Назовем такой вид образования производящей линии непрерывным ( $H_{ij}^k$ ).

Сравнивая схемы образования производящих линий  $H_{1j}^k$  и  $H_{ij}^k$ , отметим, что они имеют сходную физическую

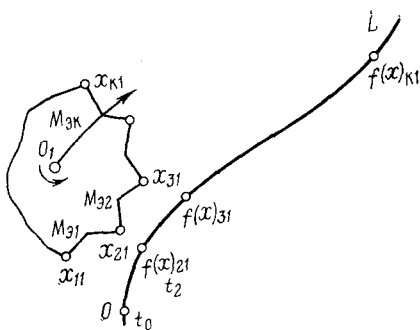


Рис. 2.6. Класс образования производящей линии вида  $\Pi_{ii}$

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  $H_{1j}^k$  и  $H_{ij}^k$  можно считать частными случаями класса  $H^k$ . То же можно отметить и для схем  $\Pi_{11}$  и  $\Pi_{ii}$ , объединяя их в класс  $\Pi$ .

При сравнении схем  $H_{11}^c$  и  $H^k$  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, по второй — катится без скольжения.

Будем считать, исходя из условий образования реаль-

ных поверхностей, множества (2.2) — (2.7) равномошными, если они рассматриваются на отрезках  $OL$  одинаковой протяженности. Тогда в порядке возрастания теоретической производительности классы образования производящих линий располагаются следующим образом:  $\Pi$ ,  $H^c$ ,  $H^k$ ,  $E$ .

Сочетая каждый из четырех классов возникновения образующей с каждым из тех же классов возникновения

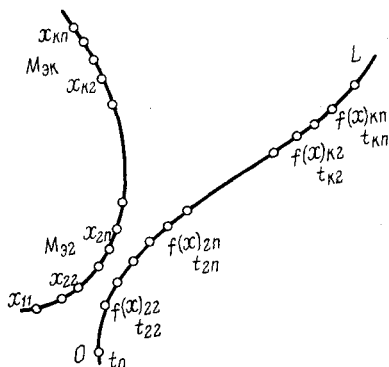


Рис. 2.7. Класс образования производящей линии вида  $H_{ij}^k$

направляющей, получаем 16 теоретически возможных классов образования поверхностей в пространстве и времени. В порядке возрастания производительности они располагаются так:  $\Pi$ — $\Pi$ ,  $\Pi$ — $H^c$ ,  $\Pi$ — $H^k$ ,  $\Pi$ — $E$ ,  $H^c$ — $\Pi$ ,  $H^c$ — $H^c$ ,  $H^c$ — $H^k$ ,  $H^c$ — $E$ ,  $H^k$ — $\Pi$ ,  $H^k$ — $H^c$ ,  $H^k$ — $H^k$ ,  $H^k$ — $E$ ,  $E$ — $\Pi$ ,  $E$ — $H^c$ ,  $E$ — $H^k$ ,  $E$ — $E$ .

### 2.3. 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 выполняет роль образующей, так как имеет наиболее высокий темп воспроизведения. Направляющая производящая линия может быть создана зеркальным отображением характеристического образа в том случае, когда образующая про-

изводящая линия создается также зеркальным отображением, т. е. данный случай соответствует классу  $E—E$  двойного зеркального отображения характеристического образа. Следовательно, в практике формообразующей обработки осуществимы лишь 13 из 16 теоретически возможных геометрических классов образования поверхностей.

На рис. 2.8 приведены примеры, иллюстрирующие осуществимые классы геометрического образования поверхностей. На рис. 2.8,  $a—в$  показаны классы образования поверхностей, когда образующая геометрическая линия воспроизводится прерывисто ( $\Pi$ ).

		Классы воспроизведения образующей			
		$\Pi$	$H^C$	$H^K$	$E$
Классы воспроизведения направляющей	$\Pi$	$a$ 	$\partial$ 	$\zeta$ 	$H$ 
	$H^C$	$b$ 	$e$ 	$\kappa$ 	$o$ 
	$H^K$	$в$ 	$ж$ 	$л$ 	$\Pi$ 
	$E$	$z$ Неосуществим	$з$ Неосуществим	$м$ Неосуществим	$p$ 

Рис. 2.8. Классы геометрического образования поверхностей

Так, при планетарном фрезоточении цилиндрической поверхности (рис. 2.8, а) образующая окружность этой поверхности воспроизводится двумя движениями: вращением  $B_1$  заготовки вокруг собственной оси и ее вращением  $B_2$  вокруг оси, параллельной оси заготовки. Направляющая — прямая линия, параллельная оси заготовки, также воспроизводится прерывисто: вращением  $B_3$  резца и его перемещением  $P_4$ . Класс образования поверхности ( $P-P$ ).

При планетарном точении цилиндрической поверхности (рис. 2.8, б) образующая, как и в предыдущем примере, воспроизводится двумя вращениями  $B_1$  и  $B_2$ , а направляющая — скольжением  $P_3$  резца вдоль оси заготовки. Класс образования поверхности ( $P-H^c$ ).

При шлифовании дисковым однониточным кругом с прямолинейным профилем цилиндрического прямозубого колеса (рис. 2.8, в) образующая (прямая линия) воспроизводится вращением  $B_1$  шлифовального круга и его поступательным перемещением  $P_2$  вдоль образующей, а направляющая (эвольвента) — непрерывно при качении двумя согласованными движениями: вращением  $B_3$  заготовки и ее поступательным перемещением  $P_4$ . Класс образования поверхности ( $P-H^k$ ).

На рис. 2.8, д—ж показаны классы образования поверхностей, когда образующая геометрическая линия воспроизводится непрерывно при скольжении ( $H^c$ ).

Так, при строгании плоскости (рис. 2.8, д) образующая — прямая линия — воспроизводится поступательным перемещением  $P_1$  резца, а направляющая — также прямая линия — периодическим перемещением  $P_2$  заготовки. Класс образования поверхности ( $H^c-P$ ).

При точении цилиндрической детали (рис. 2.8, е) образующая—окружность—воспроизводится вращением  $B_1$  заготовки, а направляющая — прямая линия, параллельная оси заготовки,— непрерывно скольжением  $P_2$  резца вдоль оси заготовки. Класс образования поверхности ( $H^c-H^c$ ).

При точении цилиндрической поверхности детали чашечным вращающимся резцом (рис. 2.8, 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  $P_3$ . Класс образования поверхности ( $H^c-H^k$ ).

На рис. 2.8, *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. 2.8, *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  $\Pi_3$ . Класс образования поверхности ( $H^k—\Pi$ ).

При зуботочении цилиндрического зубчатого колеса (рис. 2.8, *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  $\Pi_3$  инструмента вдоль оси заготовки. Класс образования поверхности ( $H^k—H^c$ ).

При обкатывании фасонной детали шариком (рис. 2.8, *л*) образующая—окружность—воспроизводится качением шарика по этой окружности движениями  $B_1$  заготовки и  $B_2$  шарика, а направляющая—кривая линия—качением шарика движениями  $B_3$  вращения шарика и  $\Pi_4$  его перемещения вдоль кривой, эквидистантной к направляющей. Класс образования поверхности ( $H^k—H^k$ ).

Последняя группа примеров (рис. 2.8, *н—р*) иллюстрирует классы образования поверхностей, когда образующая геометрическая линия воспроизводится одновременно ( $E$ ) как зеркальное отображение характеристического образа. В этой группе образования поверхностей воспроизведение образующей движений не требует.

При фрезеровании плоскости цилиндрической фрезой (рис. 2.8, *н*) направляющая—прямая линия—воспроизводится прерывисто вращением  $B_1$  фрезы и поступательным перемещением  $\Pi_2$  заготовки. Класс образования поверхности ( $E—\Pi$ ).

При точении фасонным резцом (рис. 2.8, *о*) направляющая—окружность—воспроизводится непрерывно при скольжении вращением  $B_1$  заготовки. Класс образования поверхности ( $E—H^c$ ).

При обкатывании полноконтактным роликом фасонной поверхности (рис. 2.8, *n*) 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. 2.8, *p*) 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.

#### 2.4. 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  $\Pi$ ,  $H^c$ ,  $H^k$ ,  $E$  между собой.

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

$$A = \{f(M)_1, f(M)_2, \dots, f(M)_r\}. \quad (2.8)$$

Рассмотрим возможные варианты.

Образ  $f(M)_i$  семейства (2.8) 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.

Образ  $f(M)_i$  семейства (2.8) 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 клас-

са  $E$  посредством разбиения характеристического образа  $P$  на непересекающиеся множества  $M_{\alpha}$ , каждое из которых отображается в множество  $M$  непрерывно ( $H$ ) или прерывисто ( $\Pi$ ).

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  $\Pi$  к классу  $E$ .

Пусть в классах  $H$  и  $\Pi$  мгновенное значение  $M_{\alpha} \cap M$  состоит из конечного значения точек, т. е. является линейчатом. Тогда производящая линия будет возникать во времени в виде последовательного фиксирования объединения

$$\bigcup_{2 \leq x \leq n} f(x).$$

Таким образом, получим два других комбинированных подкласса: непрерывно единовременный ( $H \wedge E$ ) и прерывисто единовременный ( $\Pi \wedge E$ ). Эти подклассы характеризуются более высокой производительностью, чем исходные классы  $H$  и  $\Pi$ . Назовем полученное комбинирование повышающим ( $K_{\Pi}$ ). При  $K_{\Pi}$  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, получаем ряд теоретически возможных подклассов образования поверхностей в формообразующей обработке. В табл. 2.2 приведены результаты, упорядоченные по производительности исходных классов образования поверхностей. Максимальное и минимальное количество движений формообразования дано в скобках.

Рассмотрим примеры некоторых комбинированных подклассов воспроизведения реальных поверхностей.

При точении широким резцом цилиндрической поверхности (рис. 2.9) характеристический образ  $I$  инструмента состоит из одного множества материальных точек

Таблица 2.2

## Классы и подклассы образования реальных поверхностей

Исходный класс образования поверхности	Количество движений формообразования	Вид комбинирования	Комбинированные подклассы	Количество движений формообразования
$P-P$	$2(1)+2(1)$	$K_{II}$	$P \wedge E - P$ $P - P \wedge E$	$2(1)+2(1)$ $2(1)+2(1)$
$P-H^c$	$2(1)+1$	$K_{II}$	$H \wedge E - P \wedge E$ $P \wedge E - H^c$ $P - H^c \wedge E$	$2(1)+2(1)$ $2(1)+1$ $2(1)+1$
$P-H^k$	$2(1)+2$	$K_{II}$	$P \wedge E - H^c \wedge E$ $P \wedge E - H^k$ $P - H^k \wedge E$ $P \wedge E - H^k \wedge E$	$2(1)+1$ $2(1)+2$ $2(1)+2$ $2(1)+2$
$H^c - P$	$1+2(1)$	$K_{II}$	$H^c \wedge E - P$ $H^c - P \wedge E$	$1+2(1)$ $1+2(1)$
$H^c - H^c$	$1+1$	$K_{II}$	$H^c \wedge E - P \wedge E$ $H^c \wedge E - H^c$ $H^c - H^c \wedge E$	$1+2(1)$ $1+1$ $1+1$
$H^c - H^k$	$1+2$	$K_{II}$	$H^c \wedge E - H^c \wedge E$ $H^c \wedge E - H^k$ $H^c - H^k \wedge E$	$1+1$ $1+1$ $1+2$
$H^k - P$	$2+2(1)$	$K_{II}$	$H^c \wedge E - H^k \wedge E$ $H^k \wedge E - P$ $H^k - P \wedge E$	$1+2$ $1+2$ $2+2(1)$ $2+2(1)$
$H^k - H^c$	$2+1$	$K_{II}$	$H^k \wedge E - P \wedge E$ $H^k \wedge E - H^c$ $H^k - H^c \wedge E$	$2+2(1)$ $2+1$ $2+1$
$H^k - H^k$	$2+2$	$K_{II}$	$H^k \wedge E - H^c \wedge E$ $H^k \wedge E - H^k$ $H^k - H^k \wedge E$	$2+1$ $2+1$ $2+2$
$E - P$	$0+2(1)$	$K_{y+K_{II}}$	$H^k \wedge E - H^k \wedge E$ $E \wedge P - P$ $E - P \wedge E$	$2+2$ $2+2$ $2+2$ $2(1)+2(1)$ $0+2(1)$



Исходный класс образования поверхности	Количество движений формования	Вид комбинирования	Комбинированные подклассы	Количество движений формования			
$E-H^c$	0+1	$K_y+K_\Pi$	$E \wedge \Pi - \Pi \wedge E$	2(1)+2(1)			
			$E \wedge H^c - \Pi$	1+2(1)			
			$E \wedge H^c - \Pi \wedge E$	1+2(1)			
			$E \wedge H^k - \Pi$	2+2(1)			
			$E \wedge H^k - \Pi \wedge E$	2+2(1)			
			$E \wedge \Pi - H^c$	2(1)+1			
			$E - H^c \wedge E$	0+1			
			$E \wedge \Pi - H^c \wedge E$	2(1)+1			
			$E \wedge H^c - H^c$	1+1			
			$E \wedge H^c - H^c \wedge E$	1+1			
			$E \wedge H^k - H^c$	2+1			
$E-H^k$	0+2	$K_y+K_\Pi$	$E \wedge \Pi - H^k$	2(1)+2			
			$E - H^k \wedge E$	0+2			
			$E \wedge \Pi - H^k \wedge E$	2(1)+2			
			$E \wedge H^c - H^k$	1+2			
			$E \wedge H^c - H^k \wedge E$	1+2			
			$E \wedge H^k - H^k$	2+2			
			$E \wedge H^k - H^k \wedge E$	2+2			
			$E-E$	0-0	$K_y$	$E \wedge \Pi - E$	2(1)+0
						$E - E \wedge \Pi$	0+2(1)
						$E \wedge \Pi - E \wedge \Pi$	2(1)+2(1)
						$E \wedge H^c - E$	1+0
$E - E \wedge H^c$	0+1						
$E \wedge H^c - E \wedge H^c$	1+1						
$E \wedge \Pi - E \wedge H^c$	2(1)+1						
$E \wedge H^c - E \wedge \Pi$	1+2(1)						
$E \wedge H^k - E$	2+0						
$E - E \wedge H^k$	0+2						
$E \wedge H^k - E \wedge H^k$	2+2						
$E \wedge \Pi - E \wedge H^k$	2(1)+2						

Исходный класс образования поверхности	Количество движений формования	Вид комбинирования	Комбинированные подклассы	Количество движений формования
			$E \wedge H^K - E \wedge \Pi$	2+2(1)
			$E \wedge H^c - E \wedge H^K$	1+2
			$E \wedge H^K - E \wedge H^c$	2+1

$M_2$ , мощность которого соответствует части направляющей 2 получаемой поверхности. Образующая 3 — окружность получаемой цилиндрической поверхности — воспроизводится непрерывно вращением  $B_1$  заготовки, а направляющая 2 — непрерывно одновременно поступательным движением  $\Pi_2$  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.

На рис. 2.10 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, равнорасположенных вдоль направляющей.

При обработке заготовке 1 сообщают движение  $B_1$ , а инструмент 2 подводят установочным движением  $\Pi_2$  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  $Z$  воспроизводится непрерывно при скольжении, т. е. подкласс образования образующей есть  $E \wedge H^c$ . 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

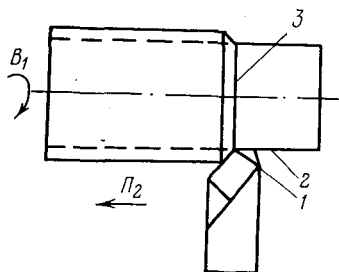


Рис. 2.9. Комбинированный подкласс  $H^c—H^c \wedge E$  образования поверхности

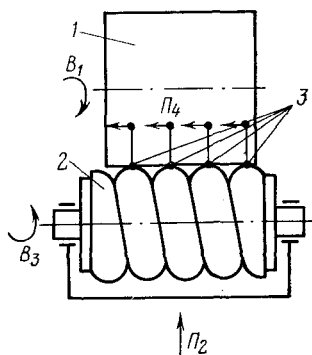


Рис. 2.10. Комбинированный подкласс  $E \wedge H^c—H^k$  образования поверхности

получения этой линии. Управляющее комбинирование данного класса и получение одновременно непрерывного подкласса снижают усилие механического воздействия при достижении того же эффекта, но одновременно требуют введения дополнительного формообразующего движения  $\Pi_4$ . В рассматриваемом случае такое движение получено за счет взаимодействия заготовки и инструмента.

## 2.5. 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 копирую-

## Уравнения для расчета высоты остаточных микронеровностей [43]

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

щие форму режущей кромки инструмента. Высота и форма обработанной поверхности зависят от многих факторов.

Микрогеометрия поверхности может рассматриваться в двух ее сечениях. Одно принимается в направлении воспроизведения образующей, т. е. в направлении резания по главной ее поверхности. 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 [43]. 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. 2.3 [43].

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 таблице уравнения можно использовать для приближенных расчетов, например, при сравнительном анализе различных способов обработки резанием.

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  $\{M_э\}_1$  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 СПИД. В случае мощности характеристического образа  $\{E\}_K$  или  $\{M_э\}_K$  расчетная высота остаточных микронеровностей может быть рассчитана по уравнению

$$R_z = \frac{S_z^2 \pi^2 R}{2(ZS_z \pm 2\pi R)^2}, \quad (2.9)$$

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.

При некотором снижении точности расчета уравнение (2.9) можно упростить, исключив из знаменателя величину  $ZS_z$ , которая мала по сравнению с величиной  $2\pi R$ . Тогда

$$R_z = S_z^2 / 8R. \quad (2.10)$$

Для обкатных зубообрабатывающих инструментов, у которых вспомогательные элементы выполнены в виде отрезков эвольвенты, несовпадающей по форме и протяженности с воспроизводимой линией, высота микрогре-

бешков приблизительно может быть определена по уравнению [4]

$$R_z = \frac{(Z_1 + Z_2) \sin \alpha S_k^2 \sqrt{(Z_1 + 2)^2 - Z_1^2 \cos^2 \alpha}}{4mZ_1^2 [(Z_1 + Z_2) \sin \alpha - \sqrt{(Z_1 + 2)^2 - Z_1^2 \cos^2 \alpha}} , \quad (2.11)$$

где  $Z_1$  и  $Z_2$  — число зубьев соответственно нарезаемого колеса и долбяка;  $m$  — модуль;  $\alpha$  — угол профиля исходного контура.

При использовании обкатных инструментов с телами качения (роликами и шариками), у которых вспомогательный элемент также не совпадает с образуемой поверхностью, высота микронеровностей находится или по уравнениям, приведенным в табл. 2.3, или по уравнению (2.10).

Геометрический образ инструмента вида  $\{E \times E\}$ , исходя из геометрических соображений, зеркально отображает микрогеометрию вспомогательного элемента на воспроизводимую поверхность. Однако фактически 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, магнитного формирующего поля 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.

# ГЛАВА 3

## МЕТОДИКА СИСТЕМНОГО ОПИСАНИЯ СПОСОБОВ ФОРМООБРАЗУЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ

### 3.1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В основе любой теоретической концепции лежит модель изучаемой действительности, наделенная структурой, некоторым числом свойств и функций. 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 в гл. 1, характеризуется их разбиением на три взаимосвязанные общей первообразной целью подсистемы: кинематическую, базирующую и энергетическую. Дальнейшая конкретизация структуры должна даваться на стольких уровнях, сколько их требуется для полного представления об основных свойствах системы [24]. 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 (свойства) 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, инфор-

мационные 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

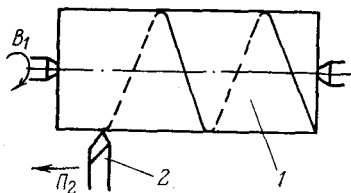


Рис. 3.1. Способ нарезания резьбы фасонным резцом

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 некоторые конкретные способы формообразующей обработки.

Наиболее распространенный способ нарезания резьбы (рис. 3.1) характеризуется тем, что заготовке 1, определенным образом ориентированной в пространстве, сообщают вращательное движение  $B_1$ , согласованное с поступательным движением  $P_2$  резца, профиль которого соответствует профилю нарезаемой резьбы. Таким образом, резьбовая поверхность воспроизводится одним сложным исполнительным движением  $B_1 \equiv P_2$ , состоящим из двух согласованных между собой элементарных движений: вращательного  $B_1$  и поступательного  $P_2$ .

Приведенный способ нарезания резьбы есть  $S$ -система. На первом уровне описания в соответствии с изложенным в гл. 1 будем рассматривать ее как объединение трех подсистем: энергетической, кинематической и базисной, каждая из которых наделена конкретной функцией. Функция энергетической подсистемы — механическое воздействие на твердое тело (заготовку) посредством резца; функция кинематической подсистемы — обеспечение таких условий механического воздействия, при которых резец удаляет вещество твердого тела по вин-



товой линии; функция базирующей подсистемы — обеспечение определенности и повторяемости механического воздействия по винтовой линии. 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 получаемой 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 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.

Рассмотренный в гл. 1 способ получения внутренних цилиндрических поверхностей с износостойким покрытием (см. рис. 1.2) 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, между составляющими энергетической подсистемы на начальном этапе воздействия — информационный характер (подвод механического воздействия только после разогрева вещества в течение оп-

ределенного 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

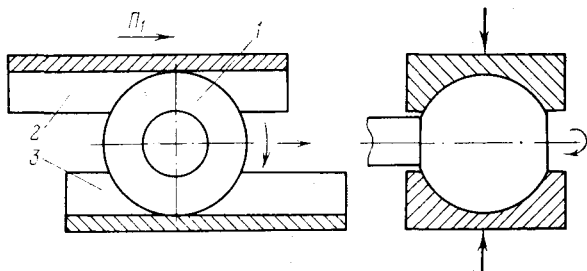


Рис. 3.2. Способ полноконтактной обкатки сферической поверхности

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 связей 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 (рис. 3.2) осуществляют механическим воздействием посредством плашек 2 и 3, профиль которых соответствует образующей обрабатываемой поверхности. Причем плашка 3 неподвижна, а плашка 2 получает движение  $\Pi_1$ . 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 рассматриваемой системы является то, что заготовка входит в

кинематическую подсистему в качестве ее конечного элемента, а определенность базирования обеспечивается инструментом — обкатными плашками. Отсюда информационный характер связи между кинематической и базирующей подсистемами. Последний вид связи характерен для  $S$ -систем, в которых функции базирования перенесены на инструмент.

Рассмотренные связи предназначены для переноса или изменения состояния вещества твердого тела, энергии, 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.

$S$ -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  $\{Q_i\}$  — конечное множество элементов и их свойств;  $\{V_i\}$ ,  $\{F_i\}$  — соответственно конечное множество связей и функций.

Системное описание строится по многоуровневому принципу путем последовательной декомпозиции подсистем. В общем случае системное описание любой  $S$ -системы 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.

В дальнейшем будут изложены основные принципы системного описания кинематической, базирующей и энергетической 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 аппарат теории множеств.

Основу принципов описания кинематической, базирующей и энергетической подсистем  $S$ -системы составляют положения, приведенные в работах [5, 8, 9, 14], которые наиболее последовательно могут быть использованы для раскрытия сущности поставленной задачи.

### 3.2. МЕТОДИКА СИСТЕМНОГО ОПИСАНИЯ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ ПОДСИСТЕМЫ

Среди известных  $S$ -систем — способов формообразующей обработки значительную группу составляют такие, для осуществления которых требуются только формообразующие движения. Однако известны также  $S$ -системы, целенаправленное функционирование которых невозможно без осуществления вспомогательных движений, непосредственно подготавливающих формообразующие перемещения характеристического образа по воспроизводящим линиям. К вспомогательным относятся движения деления (Д), врезания ( $V_p$ ) и отвода ( $V_c$ ) инструмента от заготовки (или наоборот) при холостом обратном ходе.

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 дисковым однониточным кругом (см. рис. 2.8, *в*) движением деления  $V_5$  переносят траекторию движения круга в следующую впадину зубчатого колеса.

Движение врезания служит для введения инструмента в зону движения формообразования. Оно обычно предшествует движению формообразования. Например, при точении фасонным резцом (см. рис. 2.8, *о*) этап срезания припуска до совпадения лезвия резца с образующей получаемой поверхности выполняется движением  $P_2$  врезания. Таким же по функциональному назначению дви-

жением  $P_2$  осуществляется подвод полноконтактного ролика к обкатываемой поверхности (см. рис. 2.8,  $n$ ) и закрытие штампа при объемной штамповке (см. рис. 2.8,  $p$ ).

Движение отвода («отскока») используется при механическом резании и предназначено для устранения явления 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 вспомогательные движения и перемещения характеристического образа по воспроизводящим линиям исполнительными движениями. Для их выполнения любая  $S$ -система должна обладать вполне определенной механикой, обеспечивающей взаимодействие объектов информацией о закономерностях этих перемещений. Такая механика является основой кинематической подсистемы. Будем рассматривать кинематическую подсистему в виде объединения механик отдельных вспомогательных и формообразующих движений

$${}^kM = \bigcup_{i=1}^n {}^kM_i,$$

где  ${}^kM$  — кинематическая подсистема;  ${}^kM_i$  — механика отдельного движения;  $n$  — количество отдельных движений.

Тогда функция кинематической подсистемы есть объединение функций механик отдельных движений

$${}^kF = \bigcup_{i=1}^n {}^kF_i,$$

где  ${}^kF$ ,  ${}^kF_i$  — соответственно функция кинематической подсистемы и механики отдельного движения.

Функцию кинематической подсистемы представим как множество параметров

$${}^kF = \{P, \Theta, \{\Phi_i\}, \{G_j\}\}.$$

Здесь  $P$  и  $\Theta$  — 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, механику отдельного движения можно рассматривать как объединение информационного и энергетического комплексов

$${}^k M_i = J_i \cup F_i,$$

где  $J_i, E_i$  — соответственно информационный и энергетический комплексы.

Функцию механики отдельного движения представим как множество параметров

$${}^k F_i = \{P, \Theta_L, \Phi, g\},$$

где  $P$  и  $\Theta_L$  — соответственно характеристический образ и подкласс образования воспроизводящей линии;  $\Phi$  — формообразующее или вспомогательное движение;  $g$  — отношение между элементарными движениями, составляющими формообразующее или вспомогательное движение.

В станковедении каждое движение характеризуется следующими пятью параметрами [48]: 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 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 между собой элементарных движений. Заметим, что элементарными и составными движениями образуется траектория простой формы — окружность или прямая линия. Элементарные движения используются преимущественно в классах  $H^c$  и  $H^k$  образования воспроизводящих линий. Составное движение наиболее характерно для класса  $\Pi$ . 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 в классе  $H^k$  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 звеном соединения связей [48], 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 использо-

ваться 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 механика 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 механики кинематической подсистемы и ее функции отдельные элементарные движения, воспроизводящие составное движение, будем соединять знаком конъюнкции ( $\wedge$ ), а образующие сложное движение — знаком эквиваленции ( $\equiv$ ). Возвратно-поступательное элементарное движение будем отмечать знаком ( $-$ ), переменное элементарное движение — знаком ( $\sim$ ) и периодическое элементарное движение — знаком ( $\wedge$ ), указывая их над соответствующим информационным комплексом. Вспомогательные движения, выполняемые одновременно с формообразующими, будем отмечать знаком ( $\parallel$ ), выполняемые последовательно — ( $\perp$ ) и выполняемые синхронно — ( $\perp\perp$ ).

Схема, приведенная на рис. 3.3, иллюстрирует способ строгания прямозубых конических колес, положенный в основу зубострогальных станков. При строгании процесс получения конического колеса осуществляется в результате сообщения заготовке 1 и резцам 2 и 3 нескольких формообразующих и вспомогательных движений. Образующая зубчатого колеса — прямая линия, пересекающая ось заготовки, — воспроизводится элементарными формообразующими поступательно-возвратными движениями  $P_1$  резцов 2 и 3. Строгание производится при поступательном движении резцов, а при возвратном движении — холостой ход. Оба резца строгают противоположные стороны зуба в противофазе, т. е. в то время, когда один резец срезает припуск, другой совершает холостой ход. Направляющая, имеющая форму профиля поперечного сечения нарезаемого колеса, воспроизводит-



ся сложным движением обката  $B_2 \equiv B_3$ , состоящим из двух согласованных элементарных движений: вращения  $B_2$  заготовки и вращения  $B_3$  резцов 2 и 3. При строгании резцы, образующие впадину сопряженного колеса, в движении обката профилируют один зуб нарезаемого колеса. По окончании этого цикла при сохранении направления движения  $B_2$  резцы движением  $B_4$  возвраща-

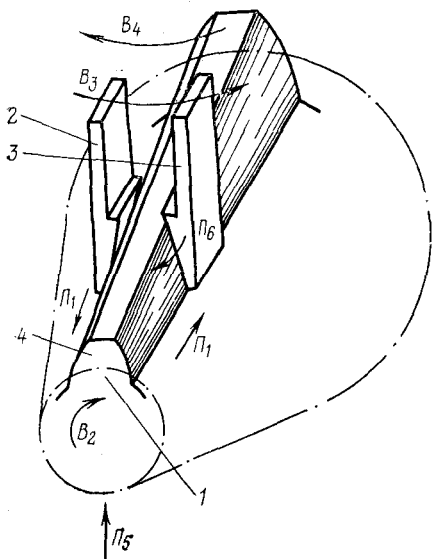


Рис. 3.3. Способ строгания прямозубых конических колес

ются в исходное положение, происходит деление на зуб и цикл строгания очередного зуба повторяется. На начальном этапе движения обката заготовке 1 сообщают движение  $P_5$  на высоту зуба нарезаемого колеса. В течение всего цикла обработки в периоды холостых ходов резцам 2 и 3 сообщают также движение «отскока»  $P_6$  для устранения их затирания о профилируемые зубья нарезаемого колеса.

В рассматриваемом способе формообразующей обработки воздействие на твердое тело (заготовку) осуществляют парой зубострогальных резцов, образующих впадину сопряженного конического зубчатого колеса—инструмента. Характеристический образ такого инструмента  $\{M_3\}_1$ . Класс образования зубчатой поверхности  $(H^c - H^k)$ .

Для данного способа кинематическая механика, воспроизводящая образующую, записывается следующей структурной формулой:

$${}^k M_o = (\bar{J} \cup E)_{Hc}.$$

Функция механики, воспроизводящей образующую, есть множество

$${}^k F_o = \{\{M_o\}_1, H^c, \Phi(\bar{\Pi}_1)\}.$$

Механика, воспроизводящая направляющую, записывается по структурной формуле

$${}^k M_H = (J \equiv J \cup E)_{Hk}.$$

Функция этой механики есть множество

$${}^k F = \{\{M_o\}_1, H^k, \Phi(B_2 \equiv B_3)\}.$$

Механика, воспроизводящая вспомогательные движения деления, врезания и «отскока», записывается соответственно формулами

$${}^k M_d = J \cup E, \quad {}^k M_{Bp} = \hat{J} \cup E, \quad {}^k M_{Bc} = \bar{J} \cup E.$$

Функция вспомогательных механик есть множества

$${}^k F_d = D(\hat{B}_4), \quad {}^k F_{Bp} = Bp(\hat{\Pi}_5), \quad {}^k F_{Bc} = Bc(\bar{\Pi}_6).$$

Следовательно, полная механика кинетической подсистемы описывается формулой

$${}^k M = (\bar{J} \cup E)_{Hc} \cup (J \equiv J \cup E)_{Hk} \cup (\hat{J} \cup E)_d \cup \\ \cup (\hat{J} \cup E)_{Bp} \cup (\bar{J} \cup E)_{Bc}.$$

Функция кинематической подсистемы рассмотренного способа есть множество

$${}^k F = \{\{M_o\}_1, H^c - H^k, \{\Phi_1(\bar{\Pi}_1), \Phi_2(B_2 \equiv B_3), \\ \perp D(\hat{B}_4), \parallel Bp(\hat{\Pi}_5), \underline{\underline{Bc}}(\bar{\Pi}_6)\}\}.$$

В табл. 3.1 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. 2.8.

## Структура кинематической подсистемы некоторых S-систем

Номер рисунка	Модель кинематической подсистемы и ее функция	Критерий сложности $C_J + C_E =$ $= C_K$
2.8, а	${}^K M = ((J \cup E) \wedge (J \cup E))_{\Pi} \cup ((J \cup E) \wedge (J \cup E))_{\Pi},$ ${}^K F = \{\{1\}_1, \Pi - \Pi, \{\Phi, (B_1 \wedge B_2), \Phi_2 (B_3 \wedge B_4)\}\}$	4+4=8
2.8, б	${}^K M = ((J \cup E) \wedge (J \cup E))_{\Pi} \cup (J \cup E)_{H^c},$ ${}^K F = \{\{1\}_1, \Pi - H^c, \{\Phi_1 (B_1 \wedge B_2), \Phi_2 (\Pi_3)\}\}$	3+3=6
2.8, в	${}^K M = ((J \cup E) \wedge (J \cup E))_{\Pi} \cup (J \equiv J \cup E)_{H^k} \cup (J \cup E)_{\Delta},$ ${}^K F = \{\{M_{\Theta}\}_1, \Pi - H^k, \{\Phi_1 (B_1 \wedge \Pi_2), \Phi_2 (B_3 \equiv \Pi_4), \perp D (B_5)\}\}$	5+4=9
2.8, д	${}^K M = (J \cup E)_{H^c} \cup (J \cup E)_{\Pi},$ ${}^K F = \{\{1\}_1, H^c - \Pi, \{\Phi_1 (\Pi_1), \Phi_2 (\Pi_2)\}\}$	2+2=4
2.8, е	${}^K M = (J \cup E)_{H^c} \cup (J \cup E)_{H^c},$ ${}^K F = \{\{1\}_1, H^c - H^c, \{\Phi_1 (B_1), \Phi_2 (\Pi_2)\}\}$	2+2=4
2.8, ж	${}^K M = (J \cup E)_{H^c} \cup ((J \cup E) \wedge (J \cup E))_{H^k},$ ${}^K F = \{\{M_{\Theta}\}_1, H^c - H^k, \{\Phi_1 (B_1), \Phi_2 (B_2 \wedge \Pi_3)\}\}$	3+3=6
2.8, и	${}^K M = (J \equiv J \cup E)_{H^k} \cup ((J \cup E) \wedge (J \cup E))_{\Pi},$ ${}^K F = \{\{M_{\Theta}\}_K, H^k - \Pi, \{\Phi_1 (B_1 \equiv B_2), \Phi_2 (B_1 \wedge \Pi_3)\}\}$	4+3=7
2.8, к	${}^K M = (J \equiv J \cup E)_{H^k} \cup (J \cup E)_{H^c},$ ${}^K F = \{\{M_{\Theta}\}_K, H^k - H^c, \{\Phi_1 (B_1 \equiv B_2), \Phi_2 (\Pi_3)\}\}$	3+2=5
2.8, л	${}^K M = (J \wedge J \cup E)_{H^k} \cup (J \wedge J \cup E)_{H^k},$ ${}^K F = \{\{M_{\Theta}\}_1, H^k - H^k, \{\Phi_1 (B_1 \wedge B_2), \Phi_2 (B_3 \wedge B_4)\}\}$	4+2=6
2.8, н	${}^K M = ((J \cup E) \wedge (J \cup E))_{\Pi},$ ${}^K F = \{\{E\}_K, E - \Pi_1, \{\Phi_2 (B_1 \wedge \Pi_2)\}\}$	2+2=4
2.8, о	${}^K M = (J \cup E)_{H^c} \cup (J \cup E)_{B_p},$ ${}^K F = \{\{E\}_1, E - H^c, \{\Phi_2 (B_2), \perp B_p (\Pi)\}\}$	2+2=4
2.8, п	${}^K M = (J \wedge J \cup E)_{H^k} \cup (J \cup E)_{B_p},$ ${}^K F = \{\{E\}_1, E - H^k, \{\Phi_2 (B_1 \wedge B_3), \perp B_p (\Pi_2)\}\}$	3+2=5
2.8, р	${}^K M = (J \cup E)_{B_p},$ ${}^K F = \{\{E \times E\}_1, E - E, \{B_p (\Pi_1)\}\}$	1+1=2

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 кинематику  $S$ -системы. Из рис. 2.8 и таблицы следует, что простейшую кинематику имеют  $S$ -системы, функционирование которых осуществляется по классу  $E$ — $E$  образования поверхностей. Далее по мере усложнения следуют  $S$ -системы, воспроизводящие образующую по классу  $E$ .

Оценивая различные кинематические подсистемы критерием  $C_k$ , 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 в последнее время таких процессов, как литье по выплавляемым моделям, 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. 3.1.

### 3.3. МЕТОДИКА СИСТЕМНОГО ОПИСАНИЯ БАЗИРУЮЩЕЙ ПОДСИСТЕМЫ

Любой способ формообразующей обработки предусматривает определенную исходную ориентацию заготовки относительно характеристического образа инструмента. Для этого в технологических машинах используются раз-

личные установочные приспособления, материализующие технологический комплект баз. Как известно [57], 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 степе-

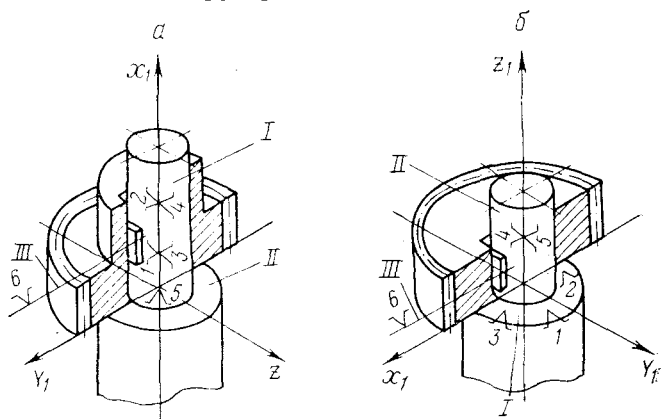


Рис. 3.4. Схемы базирования зубчатого колеса

ням свободы различают установочную, направляющую, опорную, двойную направляющую и двойную опорную базы, а по характеру проявления — явную и скрытую.

На рис. 3.4 приведены примеры базирования цилиндрического зубчатого колеса при качественно различной длине его ступицы. Комплект баз при базировании зубчатого колеса с длинной ступицей (рис. 3.4, а) 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. 3.4, 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 устанавливаем, 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

Таблица 3.2

Математические модели стандартных баз

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

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:

$${}^6M = \bigcup_{i=1}^3 {}^6M_i,$$

где  ${}^6M$  — базирующая подсистема;  ${}^6M_i$  — отдельная база.

В сформулированном определении базирующая под-

система является аналогом технологического комплекта баз.

Базы характеризуются числом отнимаемых степеней свободы. Эту характеристику положим в основу формализации баз. Для этого в моделях различных баз (табл. 3.2) будем указывать отнимаемые степени свободы.

В приведенных примерах базирование рассмотрено применительно к материализации комплекта баз с по-

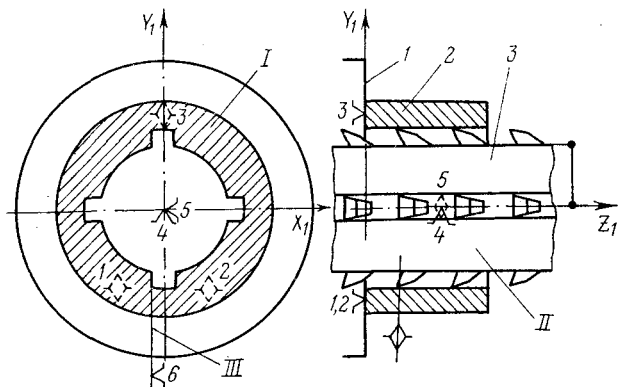


Рис. 3.5. Схема базирования шлицевой втулки при протягивании

мощью установочных приспособлений, не имеющих непосредственных функциональных связей с характеристическим 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 анализировалось. Поэтому рассмотрим некоторые возможные варианты совмещения функций и его влияние на базирующую подсистему.

На рис. 3.5 приведена схема базирования втулки при протягивании шлицевого отверстия. Для обработки втулка *1* прижимается к подкладной плите *2* 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 технологи-

ческой 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. 3.6 приведена схема способа обработки поверхностным пластическим деформированием конической поверхности. Для обработки заготовка 1 размещается между неподвижной 2 и подвижной 3 плашкой и поддер-

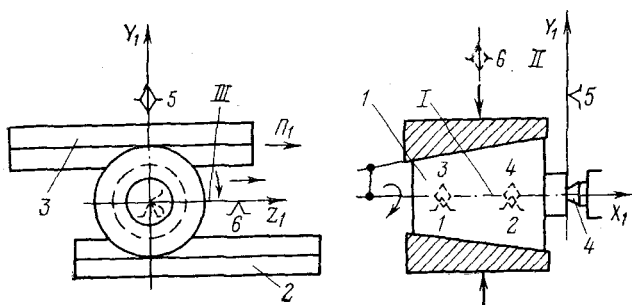


Рис. 3.6. Схема базирования конической детали при обкатке

живается упором 4. При сообщении подвижной плашке 3 движения формообразования  $\Pi_1$  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 с помощью электромагнитного поля функцию базирующей подсистемы выполняет поле, т. е. характеристический образ инструмента. Аналогично функцию базирующей подсистемы выполняет характеристический образ инструмента при полноконтактной обкатке сферы (см.



рис. 3.2), при объемной штамповке (см. рис. 2.8, *p*) и во многих других способах формообразующей обработки.

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 ос-

Таблица 3.3

**Структура базирующей подсистемы некоторых *S*-систем**

Номер рисунка	Математическая модель базирующей подсистемы и ее функция	Критерий сложности
3.2	${}^bM = {}^bM^{1-4} \cup {}^bM^5 \cup {}^bM^6$ ${}^bF = \{1, \{{}^bM \cap P\}\}$	0
3.4, а	${}^bM = {}^bM^{1-4} \cup {}^bM^5 \cup {}^bM^6$ ${}^bF = \{1_2 \ 0\}$	3
3.4, б	${}^bM = {}^bM^{1-3} \cup {}^bM^{4-5} \cup {}^bM^6$ ${}^bF = \{1, 0\}$	3
3.5	${}^bM = {}^bM^{1-3} \cup {}^bM^{4-5} \cup {}^bM^6$ ${}^bF = \{1, \{{}^bM^{4-5} \cup {}^bM^6 \cap P\}\}$	1
3.6	${}^bM = {}^bM^{1-4} \cup {}^bM^5 \cup {}^bM^6$ ${}^bF = \{1, \{{}^bM^{1-4} \cup {}^bM^6 \cap P\}\}$	1

новании этого функцию базирующей подсистемы будем рассматривать как множество параметров

$${}^bF = \{\{W_i\}, \{Q_j\}\},$$

где  ${}^bF$  — функция базирующей подсистемы;  $\{W_i\}$  — конечное множество вариантов базирования заготовки для конкретной *S*-системы;  $\{Q_j\}$  — конечное множество отношений между базами и характеристическим образом.

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

$$C_6 = \bigcup_q {}^6M_q,$$

где  $C_6$  — критерий сложности базирующей подсистемы;  ${}^6M_q$  — база, материализуемая установочным приспособлением.

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.

В табл. 3.3 приведены математические модели базирующих подсистем некоторых способов формообразующей обработки, а также их функции и коэффициенты сложности.

#### 3.4. 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 гл. 1 было 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

ние новых материалов: высокопрочных, нержавеющих, 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 базирующая 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 механикой. При разработке различных по конструкции технологических машин, реализующих один и тот же способ формообразующей обработки, в механике, воспроизводящей конкретную компоненту внутренней среды, возможны как качественные, так и количественные различия. Однако в соответствии с решаемыми в данном исследовании вопросами они несущественны при анализе структуры и функции  $S$ -систем. В данном случае существен сам факт энергетического воздействия на твердое тело и, следовательно, необходимость в энергетической подсистеме. Это позволяет рассматривать энергетическую подсистему, воспроизводящую внутреннюю среду  $S$ -системы, в виде объединения отдельных механик (подсистем второго уровня), каждая из которых воспроизводит одну компоненту данной среды

$${}^{\circ}M = \bigcup_{i=1}^m {}^{\circ}M_i,$$

где  ${}^{\circ}M$  — энергетическая подсистема;  ${}^{\circ}M_i$  — механика отдельной энергетической компоненты;  $m$  — количество энергетических компонент.

Энергетическая подсистема  $S$ -систем (см. рис. 2.8)

воспроизводит только одну компоненту внутренней среды — механическую и, следовательно, содержит только одну энергетическую механику, воспроизводящую эту компоненту.

Рассмотрим примеры некоторых известных *S*-систем, энергетическая подсистема которых содержит более одной составляющих ее энергетических механик.

На рис. 3.7 показана схема способа точения в электростатическом поле. Этот способ отличается от способа то-

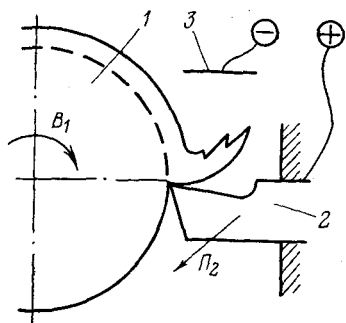


Рис. 3.7. Способ точения с наложением электростатического поля

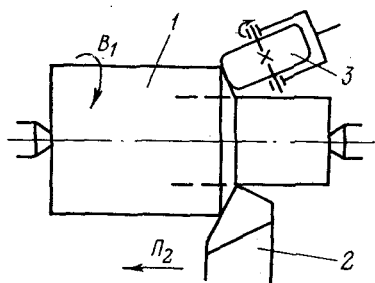


Рис. 3.8. Способ точения с опережающим пластическим деформированием

карной обработки, рассмотренного в гл. 1 (см. рис. 1.5), 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 механиками энергетической подсистемы. Отметим также, что одна из компонент внутренней среды (механическое воздействие) воспроизводится энергетической механикой, совпадающей с механикой 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 механикой энергетической подсистемы.

На рис. 3.8 приведена схема способа точения с опережающим пластическим деформированием [55]. 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 образование требуемой поверхности. Вторая — дополнительная механическая — обеспечивает дополнительную функцию — пластическое деформирование роликом 3 материала заготовки на некотором расстоянии от зоны срезания припуска. Как утверждают авторы 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 в данной *S*-системе обеспечивается также ее кинематической подсистемой. Действительно, глубина проникновения опережающей пластической деформации 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 1 и роликом 3.

Рассмотренный способ точения с опережающим пластическим деформированием можно изменить таким образом, чтобы вторая компонента внутренней среды воспроизводилась отдельной составляющей энергетической подсистемы, независимой от составляющей кинематической подсистемы, воспроизводящей образующую получаемой поверхности. Такое видоизменение позволит управлять характеристиками процесса обработки в более широких

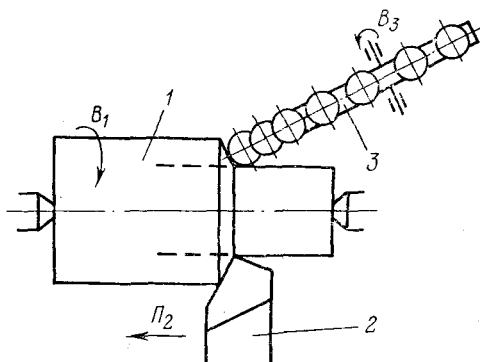


Рис. 3.9. Способ точения с пульсирующим пластическим деформированием

пределах, чем при использовании исходного способа. Решение данной задачи иллюстрируется схемой, приведенной на рис. 3.9. 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  $V_3$ , которое 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 усиления прижатия шариков к заготовке в статическом состоянии, но и от скорости движения  $V_3$  инструмента 3. В свою очередь это позволит уменьшить поток энергии, подводимой к зоне обработки, через ки-

нематическую подсистему, воспроизводящую геометрическую форму обрабатываемой поверхности.

Отметим также, что вращения ролика 3 (см. рис. 3.8) и деформирующего инструмента 3 (см. рис. 3.9) не являются формообразующими или вспомогательными движениями, подготавливающими формообразующие. Следовательно, воспроизводящая их механика входит в энергетическую подсистему соответствующих *S*-систем.

На рис. 3.10 показана схема способа алмазно-электролитического кольцевого сверления, используемого для обработки отверстий в твердых сплавах, закаленных сталях, магнитных сплавах и других токопроводящих труднообрабатываемых материалах [20]. По этому способу обработку ведут алмазным сверлом 1, закрепленным в шпинделе станка с помощью специальной головки, которая, кроме передачи движения вращения  $B_1$  и подачи  $\Pi_2$ , обеспечивает также подачу электролита под давлением  $P_3$  во внут-

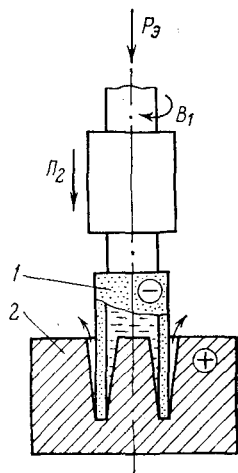


Рис. 3.10. Способ алмазно-электролитического сверления

реннюю 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 заготовки.

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 алмазно-электролитического сверления 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 механику.

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 механики которых переданы отдельным механикам 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 количе-



ство составляющих энергетической подсистемы, функции которых не переданы другим подсистемам

$$C_s = \sum_{v=1}^p {}^sM_v,$$

где  $C_s$  — критерий сложности энергетической подсистемы;  ${}^sM_v$  — 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 формообразующей обработки, схемы которых приведены на рис. 2.8, характеризуются нулевым коэффициентом сложности энергетической подсистемы. Коэффициент сложности энергетической подсистемы способов обработки, схемы которых приведены на рис. 3.8—3.10, соответственно равен нулю, единице и двум. 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 функции других подсистем. Поясним это на примере способа получения изделий из расплава в электромагнитном поле. В данной  $S$ -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 и двух других подсистем: базирующей и кинематической. Такой способ имеет простейшую структуру. Можно предположить, что  $S$ -системы, подобные данной, в будущем будут широко применяться 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 [21]

$$\Gamma_q = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_q),$$

составляющие которого — мощность, интенсивность, форма, длительность воздействия на твердое тело и другие частные параметры компоненты, задаваемые формулой способа формообразующей обработки.

### 3.5. СИСТЕМНОЕ ОПИСАНИЕ НЕКОТОРЫХ СПОСОБОВ ФОРМООБРАЗУЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ

Представление способов формообразующей обработки в виде объединенных общей первообразной целевой функцией трех подсистем — кинематической, базирующей и энергетической, каждая из которых наделена собственной функцией, носит всеобщий характер, так как базируется на наиболее общих принципах организации и развития  $S$ -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 приме-

нением материалов, относительно легко поддающихся резанию без дополнительных воздействий. Однако в последние годы 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 обработки. Однако для способов, в которых подобные отношения в явном виде неочевидны, такие пропуски недопустимы, так как существенно снижается ценность описания. Для подтверждения данного положения рассмотрим конкретные примеры.

На рис. 3.11 приведена схема способа точения поверхностей синусоидального профиля. Процесс получения за-

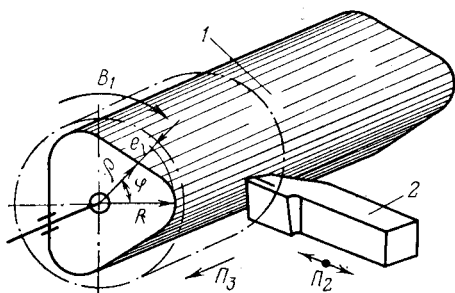


Рис 3.11. Способ точения поверхностей синусоидального профиля

данной поверхности по этому способу основан на механическом резании и осуществляется двумя формообразующими движениями: сложным  $\Phi_1$  ( $B_1 \equiv P_2$ ), состоящим из двух элементарных (вращения  $B_1$  заготовки 1 и поступательно-возвратного движения  $P_2$  резца 2) и элементарного движения  $\Phi_2$  ( $P_3$ ) резца 2 параллельно оси заготовки. Первое из этих движений воспроизводит образующую, второе — направляющую.

Радиус-вектор образующей обрабатываемой поверхности описывается выражением

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

где  $\rho$  — радиус-вектор образующей;  $R$  — радиус выступов;  $\varphi$  — угловой параметр.

Следовательно, сложное движение, воспроизводящее образующую, должно быть задано функцией  $F_1 = f(\sin n\varphi)$ . Это отношение необходимо учитывать при функциональном описании кинематической подсистемы. Тогда функциональное описание кинематической подсистемы рассматриваемого способа есть множество

$${}^kF = \{\{1\}_1, H^c - H^c, \{\Phi_1 (B_1 \equiv \bar{P}_2), \Phi_2 (P_3)\}, F_1\}.$$

На рис. 2.8, б показана схема способа планетарного точения [22]. 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.

Класс образования поверхности по данному способу ( $P-H^c$ ). Причем образующая воспроизводится слож-

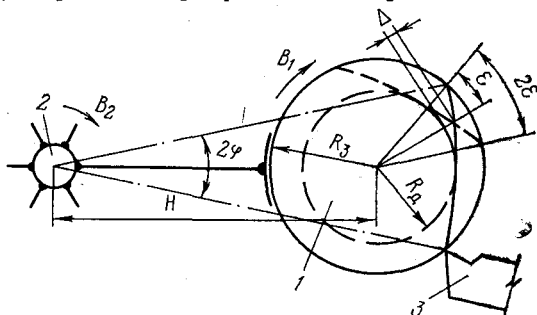


Рис. 3.12. Схема воспроизведения образующей при планетарном точении

ным движением  $B_1 \wedge B_2$ . Исходя из условия достижения предельно допустимой огранки получаемой поверхности, скорости движения  $B_1$  и  $B_2$  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 срез будет перекрывать предыдущий на некоторый угол  $2\epsilon$  (рис. 3.12). 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  $2k\pi - 2\epsilon$ , где  $k$  — целое число. Тогда уравнение кинематического баланса можно записать в виде

$$2k\pi - 2\epsilon = (2\pi - 2\varphi) i_{B_1 B_2},$$

где  $i_{B_1 B_2}$  — искомое отношение.

Из этого уравнения получим

$$i_{B_1 B_2} = \frac{k\pi - \epsilon}{\pi - \varphi}.$$

## Структура некоторых S-систем на первом уровне разбиения

Номер рисунка	Модель S-системы на первом уровне разбиения	Критерий сложности $C_K + C_6 + C_8 = C_s$
1.1	$S_s = \{\{^k M \cap {}^3 M, {}^6 M\}, \{F\}_3\}$	$8+0+3=11$
1.2	$S_s = \{\{^k M \cap {}^1 M, {}^2 M, {}^6 M\}, \{F\}_4\}$	$2+1+3=6$
2.8, p	$S_s = \{\{^k M \cap {}^3 M, {}^6 M \cap P\}, \{F\}_3\}$	$2+0+0=2$
3.1	$S_s = \{\{^k M \cap {}^3 M, {}^6 M\}, \{F\}_3\}$	$3+0+3=6$
3.2	$S_s = \{\{^k M \cap {}^3 M, {}^6 M \cap P\}, \{F\}_3\}$	$3+0+0=3$
3.5	$S_s = \{\{^k M \cap {}^3 M, {}^6 M^{1-4}, {}^6 M^5 \cap {}^6 M^6 \cap P\}, \{F\}_3\}$	$2+0+1=3$
3.6	$S_s = \{\{^k M \cap {}^3 M, {}^6 M^{1-4} \cap {}^6 M^6 \cap P\}, \{F\}_3\}$	$2+0+1=3$
3.7	$S_s = \{\{^k M \cap {}^1 M, {}^2 M, {}^6 M\}, \{F\}_4\}$	$4+1+3=8$
1.10	$S_s = \{\{^k M \cap {}^1 M, {}^2 M, {}^3 M, {}^6 M^6\}, \{F\}_4\}$	$4+2+3=9$

При точении высота получаемой огранки определяется выражением

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

где  $\Delta$  — высота огранки;  $R_3$  — радиус заготовки;  $t$  — припуск, снимаемый за проход;  $H$  — расстояние между осями вращения заготовки и шпинделя.

Объединяя выражения для  $i_{B_1 B_2}$  и  $\Delta$ , окончательно получаем

$$i_{B_1 B_2} = \frac{k\pi - (t - \Delta) \sqrt{\frac{1}{H^2 \sin^2 \varphi} - \frac{1}{R_3^2}}}{\pi - \varphi}.$$

Функциональное описание кинематической подсистемы должно включать полученное соотношение. Это описание есть множество

$${}^k F = \{\{1\}_1, \Pi - H^c, \Phi_1(B_1 \wedge B_2), \Phi_2(\Pi_3)\}, i_{B_1 B_2}\}.$$

Рассмотренные S-системы основаны на использовании механического воздействия на заготовку. Это воздей-

ствие от источника энергии передается по кинематической подсистеме, т. е. энергетическая подсистема способов совмещена с кинематической. Поэтому сложность энергетической подсистемы в обеих  $S$ -системах равна нулю. Базирующая подсистема для таких способов относительно выделена, материализация ее составляющих не зависит от характеристического образа инструмента.

В табл. 3.4 приведены модели некоторых рассмотренных  $S$ -систем на первом уровне разбиения. Здесь же указаны обобщенные критерии их сложности.

# ГЛАВА 4

## ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ПОИСКА НОВЫХ СПОСОБОВ ФОРМООБРАЗУЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ

### 4.1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Из определения  $S$ -системы выводится следующее следствие. Целенаправленное изменение совокупности приемов или последовательности их выполнения, изменение правил выполнения приемов приводит к качественно новому способу с новой структурой и функцией.

Структура описанного в гл. 1 способа токарной обработки (см. рис. 1.5) включает следующие целесообразно организованные элементы: приемы — установка заготовки, сообщение ей вращения  $B_1$ , сообщение резцу поступательного движения  $P_2$  подачи; последовательность приемов — установка (базирование) заготовки, затем сообщение ей и резцу формообразующих движений; правила выполнения приемов — определенность базирования заготовки, назначение существенно меньшей скорости подачи по сравнению со скоростью вращения заготовки. Возможно целенаправленное изменение структуры рассматриваемого способа. Например, можно дополнительно сообщить резцу 2 вращательное движение  $B_3$  вокруг вертикальной оси 3 (рис. 4.1). В этом случае при неизменном характеристическом образе инструмента структура способа дополняется следующими элементами: приемами — вращение  $B_3$  резца 2; последовательностью приемов — сообщение резцу вращения, затем движения подачи; правилами выполнения приемов — назначение круговой частоты вращения резца большей круговой частоты вращения заготовки 1. Такое изменение структуры позволяет срезать слой металла за каждый оборот резца в виде фигуры  $EAO$ . Тем самым обеспечивается надежное стружкодробление. Причем этот эффект является следствием целенаправленного изменения структуры способа. Существенность качественной новизны способа, полученного в результате изменения структуры



исходного способа, подтверждается признанием его изобретением [39]. Одновременно изменяется функция способа, в частности, класс образования поверхности и характер движения, воспроизводящего направляющую.

В данном примере для достижения целевой функции (обеспечение надежного стружкодробления) была изменена структура кинематической подсистемы исходного способа токарной обработки. Возможно также изменение структуры других подсистем. Например, одновременно с сообщением резцу вра-

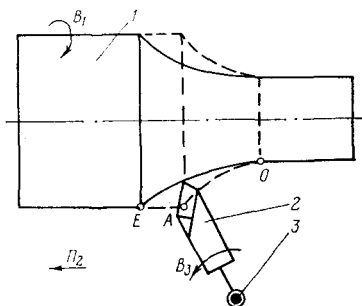


Рис. 4.1. Способ фрезоточения

щательного движения на зону обработки можно воздействовать импульсным электростатическим полем, противоположенным электродвижущей силой 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 поиска новых способов формообразующей обработки основаны на целенаправленном усложнении структуры и функции исходных способов-прототипов. Возможно и целенаправленное упрощение исходного способа, в результате которого могут быть получены новые способы обработки. 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 последние годы значительное развитие получают комбинированные способы формообразующей обработки, создаваемые вследствие комбинирования различных видов механического, физического и химического воздействия на твердое тело. Некоторые из них были описаны ранее. В теории и практике формообразующей обработки возможны также и другие пути, основанные на иных принципах. Например, принцип поиска, основанный на согласовании ритмов физических воздействий, и принцип поиска на основе совмещения обработки нескольких заготовок одним инструментом. Они использованы автором при модернизации традиционного способа долбления цилиндрических зубчатых колес.

Рассмотренные принципы поиска новых способов формообразующей обработки носят всеобщий характер. Например, принцип целенаправленного изменения совокупности приемов способа широко применяется исследователями на интуитивном уровне. Такой принцип, как комбинирование на основе использования дополнительных физических полей 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 еще не нашли 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.

Рассмотрим более подробное использование некоторых общих принципов на конкретных примерах поиска новых способов формообразующей обработки.

#### 4.2. ПРИНЦИП ИЗМЕНЕНИЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ПРИЕМОВ

В основу конструкций многшпиндельных полуавтоматов и автоматов последовательного действия положен способ токарной обработки, при котором (рис. 4.2) несколько заготовок устанавливают в патроны шпинделей 2, расположенных в шпиндельном блоке 3. При точении заготовкам 1 сообщают вращательное движение  $B_1$ , а резцу — поступательное  $\Pi_3$ . Периодически после выполнения прохода шпиндельный барабан 3 движением  $B_2$  поворачивают на угловой шаг расположения шпинделей для переноса заготовок в новое положение для последующего прохода. Обычно обработку осуществляют набором различных инструментов, расположенных в зонах индексации шпинделей. В этом случае характеристический образ набора инструментов представляет собой объединение характеристических образов отдельных резцов. Класс образования поверхности ( $H^c-H^c$ ).

Кинематическая подсистема способа описывается структурной формулой

$${}^K M = (J \cup E)_{H^c} \cup (J \cup E)_{H^c} \cup (J \cup E)_D.$$

Функция кинематической подсистемы есть множество

$${}^K F = \{\{P\}, H^c - H^c, \{\Phi_1(B_1), \Phi_2(\Pi_2), \perp D(B_3)\}\}.$$

Базирующая подсистема описывается следующими структурными формулами:

при обработке длинных заготовок

$${}^6 M = \{{}^6 M^{1-4} \cup {}^6 M^5 \cup {}^6 M^6\}_n;$$

при обработке коротких заготовок

$${}^6 M = \{{}^6 M^{1-3} \cup {}^6 M^{4-5} \cup {}^6 M^6\}_n.$$

Функция базирующей подсистемы:

$${}^6 F = \{2, 0\}_n.$$

Энергетическая подсистема способа воспроизводит одну компоненту внутренней среды — механическую. Воспроизведение ее осуществляется кинематической подсистемой.

Недостатком описанного способа является необходи-

мость принятия мер для обеспечения стружкодробления при обработке. По традиции эту задачу решают посредством специальных автоматных сталей, или введением в кинематическую структуру станков специальных узлов, или применением резцов со стружколомающими устройствами. Естественно, приведенные приемы стружкодробления не всегда приемлемы в практике металлообработки. Например, автоматная сталь может не соответство-

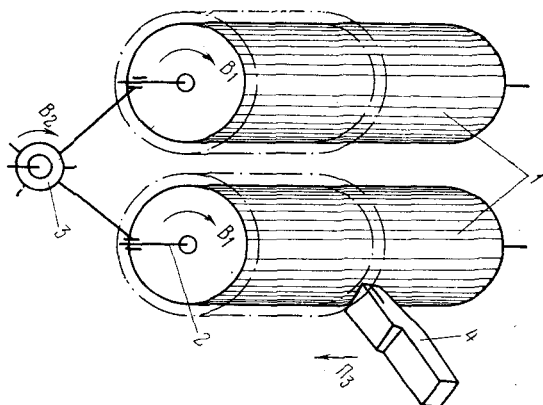


Рис. 4.2. Способ многшпindelной обработки

вать требованиям работоспособности тех или иных деталей, а установка в станке специальных узлов для стружкодробления нежелательна. Отметим, что эти приемы не оказывают существенного влияния на структуру способа обработки, т. е. рассматриваемый способ обработки остается неизменным.

Решение задачи надежного стружкодробления в данном случае возможно также изменением последовательности выполнения приемов способа. Для этого достаточно движение индексации  $D(B_3)$  осуществлять не последовательно после выполнения движений формообразования, а параллельно с ними. При таком изменении последовательности движений каждая заготовка будет совершать планетарное движение, периодически проходя зону резания. В итоге стружка будет срезаться в виде отдельных сегментов.

Приведенное решение задачи стружкодробления приводит к изменению кинематической подсистемы исходного способа при неизменности его схемы. Структура и

функция кинематической подсистемы нового способа, обеспечивающего достижение качественной целевой функции (стружкодробление) при сохранении первообразной цели (многошпindelная обработка), записываются выражениями

$${}^kM = ((J \cup E) \wedge (J \cup E)) \Pi \cup (J \cup E)_{H^c},$$

$${}^kF = \{\{P\}, \Pi - H^c, \{\Phi_1(B_1 \wedge B_2), \Phi_2(\Pi_3)\}\}.$$

По такому способу образующая обрабатываемой по-

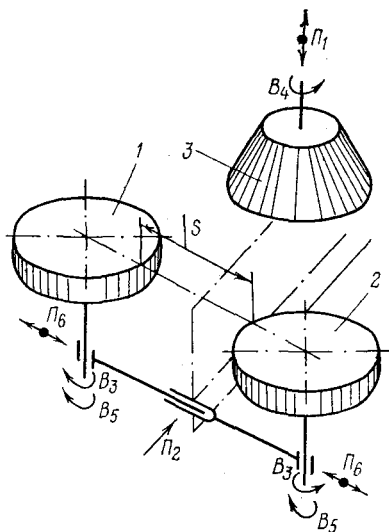


Рис. 4.3. Способ обработки двух зубчатых колес одним долбяком

верхности воспроизводится составным двухэлементным движением  $B_1 \wedge B_2$ . При необходимости получения цилиндрической поверхности с заданной допустимой величиной огранки в функцию способа вводится правило, определяющее соотношение движений  $B_1$  и  $B_2$ .

Неочевидность достижения целевой функции, уровень новизны и несводимость полученной новой  $S$ -системы к исходной подтверждены признанием рассмотренного способа изобретением [22].

В основу зубодолбежного станка [16] положен способ зубодолбления с касательным направлением движения резания. По этому способу заготовки 1 и 2 устанавли-

ливают (рис. 4.3) симметрично относительно направления врезания с расстоянием  $S$  между делительными окружностями, равным делительному диаметру долбяка 3. Затем долбяку 3 сообщают поступательно-возвратное движение  $П_1$  скорости резания и процесс зубодолбления выполняют в два этапа. На первом этапе заготовкам 1 и 2 сообщают движение врезания  $П_2$ , согласованное с их вращением  $В_3$  в разные стороны, а долбяку 3 и заготовкам 1 и 2 — движение обката (профилирования), состоящее из согласованных вращения  $В_4$  долбяка и вращения  $В_5$  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»  $П_6$ , синхронизированное с движением  $П_1$  для устранения затирания долбяка по вершинным режущим кромкам при холостом ходе.

Структура описанного способа зубодолбления одновременно двух колес включает следующие элементы: приемы — установка заготовок 1 и 2, сообщение долбяку 3 движения  $П_1$  скорости резания, сообщение заготовкам 1 и 2 движения врезания, состоящего из поступательного движения  $П_2$  и согласованного с ним вращения  $В_3$  заготовок в разные стороны, сообщение заготовкам 1 и 2 и долбяку 3 движения обката (профилирования), состоящего из согласованных вращения  $В_4$  долбяка и вращения  $В_5$  заготовок в одну сторону, сообщение заготовкам движения «отскока»  $П_6$ ; последовательность выполнения приемов — сначала установка заготовок, затем сообщение долбяку движения  $П_1$ , а заготовкам — движения «отскока»  $П_6$ , после этого одновременно сообщение движений врезания  $П_2 \equiv В_3$  и обката  $В_4 \equiv В_5$ , наконец, после врезания на высоту зуба прекращение движения  $П_2 \equiv В_3$ ; правила выполнения отдельных приемов — определенность установки заготовок относительно направления врезания, синхронизация движений  $П_1$  и  $П_6$ , существенно меньшая скорость движения врезания по сравнению со скоростью обката.

При зубодолблении врезание на высоту зуба осуществляют одновременно с обкаткой. В то же время анализ схемы взаимодействия долбяка и заготовок в рассматриваемом способе показывает, что переход к долблению

с касательным движением врезания на первом этапе обработки заготовки имеет неодинаковые суммарные скорости вращения, что создает неодинаковые условия стружкообразования и, как следствие, неодинаковое динамическое воздействие на оба делительных стола станка, на котором осуществляется способ. В конечном итоге это снижает качество получаемых зубчатых колес. Нежелательные последствия названного явления можно устранить. Для этого необходимо следующим образом изменить последовательность выполнения приемов: на первом этапе выполнять только врезание на высоту зуба, а на втором — только профилирование зубьев. Такое целенаправленное изменение последовательности выполнения приемов при сохранении неизменной общей совокупности этих приемов и правил их выполнения на основании следствия из определения  $S$ -системы приводит к качественно иному способу с иной структурой, обеспечивающей достижение новой конкретной целевой функции — повышения качества получаемых колес [11].

В заключение отметим, что при создании способов обработки по принципу изменения последовательности выполнения приемов графическое представление первообразного и производного способов остается неизменным. Например, исходный способ зубодолбления с касательным врезанием и полученный из него новый способ иллюстрируется схемой, приведенной на рис. 4.3. Анализ способов обработки позволяет утверждать, что первообразный способ и найденные из него на основе рассмотренного принципа производные способы неразличимы.

#### 4.3. ПРИНЦИП СОГЛАСОВАНИЯ РИТМОВ ФИЗИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ТВЕРДОЕ ТЕЛО

На рис. 4.4 показана схема способа долбления цилиндрических зубчатых колес, положенная в основу большинства зубодолбежных станков. При долблении процесс получения прямозубого колеса осуществляется в результате сообщения долбяку 1 и заготовке 2 нескольких формирующих и вспомогательных движений. Образующая зубчатого колеса — прямая, параллельная оси заготовки, — воспроизводится элементарным формирующим поступательно-возвратным движением  $P_1$  долбяка, а направляющая, имеющая форму профиля поперечного сечения нарезаемого колеса, — сложным движением об-

ката  $B_2 \equiv B_3$ , состоящим из двух согласованных элементарных движений: вращения  $B_2$  долбяка и вращения  $B_3$  заготовки. На начальном этапе одновременно с указанными движениями долбяку сообщают движение  $\Pi_4$  врезания на высоту зуба нарезаемого колеса. В течение всего цикла обработки заготовке сообщают также движение  $\Pi_5$  «отскока», синхронизированное с движением  $\Pi_1$  и предназначенное для отвода заготовки от долбяка при

его возвратном ходе с целью устранения скольжения зубьев долбяка о профилируемые зубья нарезаемого колеса. Характеристический образ зубчатого долбяка  $\{M_a\}_k$ .

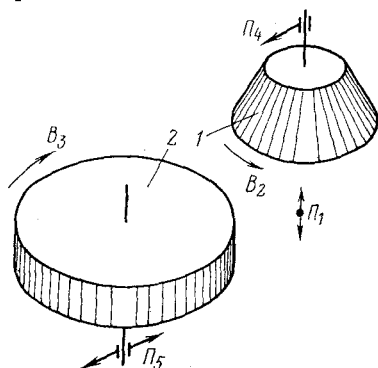


Рис. 4.4. Способ долбления цилиндрических зубчатых колес при радиальном врезании

Класс образования зубчатого венца ( $H^c - H^k$ ).

Кинематическая подсистема способа описывается структурной формулой

$$^*M = (\bar{J} \cup E)_{H^c} \cup (J \equiv J \cup E)_{H^k} \cup (J \cup E)_{Bp} \cup (\bar{J} \cup E)_{Bc}$$

Функция кинематической подсистемы есть множество

$$^*F = \{ \{M_a\}_k, H^c - H^k, \{ \Phi_1(\bar{\Pi}_1), \Phi_2(B_2 \equiv B_3), \\ ||Bp(\Pi_4), ||Bc(\Pi_5) \} \}$$

Базирующая подсистема (см. рис. 3.4), ее структура, функция и критерий сложности описаны в гл. 3. Энергетическая подсистема способа воспроизводит одну компоненту внутренней среды — механическую. Причем функцию энергетической подсистемы выполняет кинематическая подсистема. Следовательно, критерий сложности энергетической подсистемы равен нулю. Характерной теоретической особенностью обобщенного параметра состояния компоненты внутренней среды является периодическое воздействие на твердое тело; длительность периодов воздействия соответствует длине нарезаемых зубьев, а частота периодов — частоте двойных ходов долбяка.



В работах [19, 44], посвященных исследованию износа зуборезных долбяков, отмечается характерная особенность этого процесса, заключающаяся в образовании на режущих кромках зубьев долбяка локализованных зон интенсивного износа по задней поверхности. В работах [58, 59] показано, что такие зоны износа образуются также на передней поверхности зубьев долбяка. Причем по обеим поверхностям они располагаются симметрично относительно режущих кромок.

Локализация зон интенсивного износа зуборезных долбяков в работе [44] объясняется особенностями схода срезаемой стружки, а в работах [38, 58] выдвинута гипотеза о том, что зоны локализованного износа появляются вследствие затирания зубьев долбяка при его возвратном холостом ходе. Первое объяснение принципиально неверно. Для доказательства воспользуемся методом аналогии. Многочисленными исследованиями, посвященными износу токарных резцов, установлено, что при точении сталей различных марок, в том числе используемых для изготовления зубчатых колес, доминирующим видом износа является износ по передней поверхности. При увеличении подачи зона износа отодвигается от режущей кромки резца и между лункой износа и режущей кромкой остается ленточка. Процесс долбления или строгания по своей физической природе является частным случаем точения [53]. Следовательно, срезаемая при долблении стружка изнашивает преимущественно переднюю поверхность режущих зубьев долбяка. Таким образом, утверждение доказано. Подтверждает правильность приведенного доказательства и то, что посредством модификации профиля зубьев долбяка [44] устранение зон локализованного износа не обеспечивается.

Гипотеза о явлении затирания при зубодолблении, по-видимому, выдвинута интуитивно, так как ни экспериментальных, ни теоретических доказательств возникновения его авторы не приводят. Отметим, что затирание по задней поверхности не может быть использовано для доказательства причин износа по передней поверхности.

Для экспериментального подтверждения гипотезы о возникновении явления затирания долбяка по задней поверхности при его свободном ходе нами предложена следующая схема его выявления. Зуборезный долбяк 1 (рис. 4.5) закрепляют на штосселе 2 станка с помощью втулки 3 и шайбы 4 из диэлектрического материала. За-

готовку 5 нарезаемого колеса устанавливают на делительном столе 6 с использованием чередующихся металлических 7 и диэлектрических 8 прокладок и диэлектрической втулки 9. Прокладки 7 и 8 выполняют функцию щеток, удаляющих стружку с долбяка 1 при его свободном ходе. Для этого диэлектрические прокладки имеют диаметр, равный диаметру окружности выступов наре-

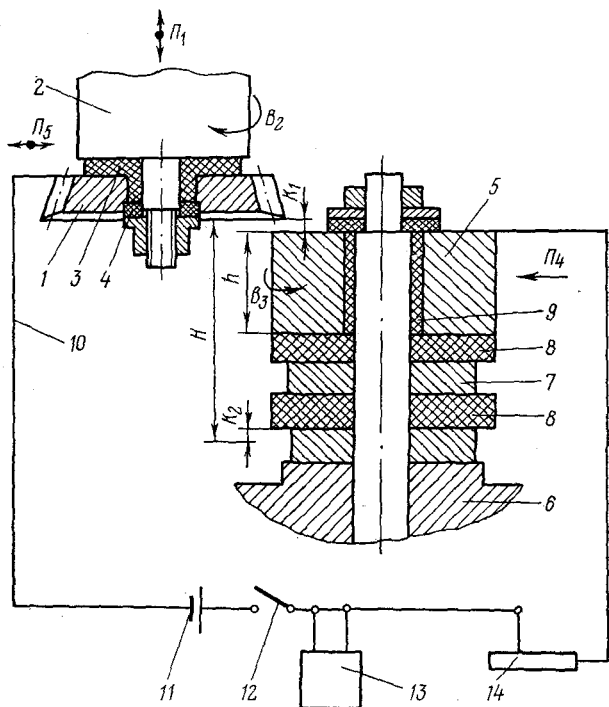


Рис. 4.5. Схема регистрации явления затирания при зубодолблении

заемого колеса, а металлические прокладки — диаметр, равный или несколько меньше диаметра окружности впадин этого колеса.

Долбяк 1 и заготовку 5 присоединяют к электрической цепи 10 последовательно с источником энергии 11, выключателем 12, быстродействующим записывающим прибором, например, модели НЗЗ8 и реостатом 14. Для регулировки электрической цепи движениями  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$  приводят долбяк и заготовку в соприкосновение, замы-

кают выключатель 12 и реостатом 14 устанавливают по записываемому прибору 13 рабочий ток в цепи. После этого движением  $P_1$  выводят долбяк в крайнее верхнее положение, соответствующее расстоянию  $K_1$  между торцами долбяка и заготовки. Затем устанавливают величину  $H$  хода долбяка, превышающую высоту заготовки и прокладок на величину верхнего и нижнего перебегов  $K_1$  и  $K_2$ . Для регистрации явления затирания на записываемом приборе подвижным органам станка сообщают традиционные для способа зубодолбления движения  $P_1, B_2 \equiv B_3, P_4, P_5$ .

При долблении зона контакта долбяка и заготовки периодически замыкает электрическую цепь 10, а записывающий прибор 13 регистрирует ток в ней. Причем при каждом двойном ходе долбяка на ленте записывающего прибора будет регистрироваться одна или две линии. Первая линия соответствует срезанию стружки с заготовки, а ее длина с учетом масштаба записи — высоте нарезаемого колеса. В случае возникновения явления затирания при холостом ходе на ленте записывающего прибора будет регистрироваться вторая линия, длина которой определяет величину проявления затирания по длине зубьев. Линии, соответствующие резанию, одинаковы по длине и имеют нечетные номера. Линии, регистрирующие затирание, будут иметь четные номера, их длина, т. е. величина проявления затирания по длине зубьев, зависит от параметров процесса и геометрических размеров долбяка и заготовки.

Описанная схема использована при долблении опытной партии цилиндрических зубчатых колес нормальной высоты стандартными долбяками различного модуля на станке модели 5122 с разными значениями режимов обработки. Эксперимент показал, что явление затирания возникает во всем диапазоне круговых подач, а при подачах, превышающих 0,3 мм/дв, ход долбяка проявляется по всей длине зубьев колеса. Было также установлено, что оно является функцией как геометрических параметров долбяка и заготовки, так и технологических параметров процесса обработки. Это позволяет разработать математическую модель явления затирания и всесторонне его исследовать. Такому исследованию должна быть посвящена отдельная работа.

Природа возникновения явления затирания объясняется следующим образом. Анализируя приведенное вы-

■е описание способа зубодолбления (см. рис. 4.4), замечаем, что процесс снятия припуска с заготовки осуществляется дискретно, т. е. только при движении долбяка в одну сторону. В то же время движение обката в течение всего цикла обработки осуществляется непрерывно. Следовательно, оба формообразующих движения функционируют качественно в различном ритме. Это неизбежно при каком-то значении круговой подачи, определяющей скорость обката, приводит к возникновению затирания, так как движение обката долбяка и нарезаемой заготовки отличается от движения обката двух зубчатых колес. При обкате долбяка и нарезаемой заготовки очередной зуб долбяка, вступая в зону зацепления, профилирует впадину копированием и обкатом. При первом рабочем ходе долбяка в движении  $\Pi_1$  на заготовке копируется часть профиля зуба, а при последующих рабочих ходах копирование сопровождается обкатом (огибанием), причем по мере прохождения зубьев долбяка зоны зацепления протяженность копирующей части профиля зуба сначала возрастает от нуля до определенного максимума, а затем убывает, приближаясь к нулю. Перенос зоны копирования по длине 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 возвратном свободном ходе в движении  $\Pi_1$  долбяк контактирует задней поверхностью режущих зубьев с материалом заготовки нарезаемого колеса на локализованном участке, срезаемом при следующем рабочем ходе, т. е. возникает явление затирания, которое циклически повторяется на каждом зубе долбяка, вступающем в процесс долбления, причем в наиболее неблагоприятных условиях находится выходная сторона зуба.

При долблении периодически вступает в работу очередной зуб долбяка. Наиболее неблагоприятные условия работы каждого зуба соответствуют начальному этапу, где преобладает копирование и возникают наибольшие по величине натяги при затирании. На режущих кромках данному этапу соответствуют локализованные участки износа у вершин зубьев долбяка.

Таким образом, явление затирания долбяка — это следствие существенной разницы в ритмах функционирования формообразующих движений. Причем следует от-

метить, что движение  $P_5$  «отскока» не компенсирует качественного различия ритмов формообразующих движений и, следовательно, не устраняет затирания.

С учетом изложенного объясним причины образования локализованного износа зуборезных долбяков. Локализованный износ зубьев долбяков является следствием воздействия преимущественно двух факторов: особенностей изменения толщин стружки, срезаемой различными участками режущих кромок, и возникновением явления затирания. Первый определяет износ по передней, а второй по задней поверхности.

При зубодолблении толщина срезаемой стружки возрастает от ножки к вершине зуба. Стружка наибольшей толщины срезается участками режущих кромок у вершин зубьев. На этих участках действуют наибольшие усилия и, следовательно, развиваются зоны локализованного износа по передней поверхности, превосходящие износ ее остальных участков вдоль режущих кромок. С повышением круговой подачи интенсивность явления увеличивается.

Явление затирания проявляется в виде трения скольжения режущих зубьев долбяка о профилируемую заготовку, которое приводит к износу задней поверхности. Причем величина износа больше у вершин зубьев, так как здесь создаются наибольшие натяги. С увеличением скоростей формообразующих движений, особенно круговой подачи, вызывающей увеличение натяга, интенсивность износа возрастает.

Симметричное расположение зон износа по передней и задней поверхностям ускоряет потерю размерной стойкости долбяка.

Для устранения локализованного износа зуборезных долбяков необходимо устранить причины, вызывающие его. Зоны локализованного износа по передней поверхности можно устранить посредством выравнивания толщин стружки, срезаемой при каждом рабочем ходе. Для этого, очевидно, следует изменить правило выполнения одного из приемов способа, например круговой подачи. Устранив причины, вызывающие явление затирания, можно устранить локализованные зоны износа по задней поверхности, например, посредством согласования ритмов функционирования формообразующих движений или изменением правил выполнения отдельных приемов способа зубодолбления.

Рассмотрим возможные варианты согласования ритмов формообразующих движений.

Согласно первому варианту, можно «привести» ритм движения  $P_1$  (см. рис. 4.4) к ритму движения  $B_2 \equiv B_3$ . Для этого требуется снизить скорость движения  $P_1$  и осуществлять его в течение всего цикла обработки заготовки не поступательно-возвратно, а поступательно. Такой путь приводит к замене зубодолбления зуботочением (см. рис. 2.8, к). Одновременно вследствие непрерывности зуботочения отпадает необходимость в движениях врезания  $P_4$  и «отскока»  $P_5$ . Отметим также, что этот вариант согласования ритмов формообразующих движений приводит к перестановке воспроизводящих линий: линия, имеющая форму профиля зубчатого колеса, будет образующей, а прямая — направляющей. Значительно изменятся структура и функция кинематической подсистемы (см. табл. 3.1), хотя мощность характеристического образа инструмента остается постоянной. Изменится и обобщенный параметр состояния внутренней среды, так как воздействие на твердое тело 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.

По второму варианту можно «привести» ритм движения обката  $B_2 \equiv B_3$  к ритму движения  $P_1$ . Для этого необходимо заменить непрерывный характер движения обката дискретным, что возможно, например, посредством прекращения движения обката на периоды свободного хода долбяка в движении  $P_1$  [11]. Такой вариант обеспечивает существенную, качественную модернизацию функции известного способа. Отметим, что структура кинематической подсистемы не претерпевает значительных изменений. Однако такое техническое решение в некоторых случаях может ухудшить динамику цепи обката зубодолбежного станка, так как при дискретном обкате кинематические связи цепи обката будут периодически натягиваться и ослабляться. В итоге понизится кинематическая точность цепи обката и, следовательно, ухудшится качество зубообработки. Поэтому рассматриваемый вариант согласования ритмов формообразующих движений можно модифицировать на основе следующего рассуждения.

Экспериментально или теоретически с помощью математической модели явления затирания 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. Сообщая полученное минимальное значение круговой подачи в цепь обката параллельно с дискретной рабочей подачей, можно обеспечить постоянное натяжение передач этой цепи.

Согласно третьему варианту, ритм движения обката  $B_2 \equiv B_3$  также «приводится» к ритму движения  $P_1$ . Непрерывный характер движения обката заменяется качательным, синхронизированным с движением  $P_1$ . Для обеспечения процесса формообразования при рабочем ходе долбяка в движении  $P_1$  движение обката должно иметь большую скорость, чем при возвратном свободном ходе. Во избежание потерь производительности разность круговых подач рабочего и свободного хода необходимо установить с учетом допустимой условиями обработки высоты огранки поверхности зубьев в направлении их профиля. Для этого можно воспользоваться выражением, полученным из уравнения (2.11):

$$S_p - S_x = 2 \sqrt{\frac{\Delta m Z_1^2 [(Z_1 + Z_2) \sin \alpha - \sqrt{(Z_1 + 2)^2 - Z_1^2 \cos^2 \alpha}]}{(Z_1 + Z_2) \sin \alpha \sqrt{(Z_1 + 2)^2 - Z_1^2 \cos^2 \alpha}}}$$

где  $S_p$  и  $S_x$  — круговая подача соответственно при рабочем и свободном ходе долбяка;  $\Delta$  — допустимая высота огранки поверхности зубьев в направлении их профиля.

Приведенный вариант согласования ритмов формирующих движений, также как и предыдущий, обеспечивает качественное изменение функции первообразного способа зубодолбления.

Рассмотрим комбинированный способ формообразующей обработки, схема которого приведена на рис. 4.6. По этому способу в шпиндель 1 по кругу устанавливают несколько заготовок 2, затем шпинделью и заготовкам сообщают вращательное движение соответственно  $B_1$  и  $B_2$  относительно собственных осей 4 и 5, а резцу 3 — движение продольной подачи. Одновременно между резцом и металлической пластиной 6, изолированной от станка,

создают внешнее электростатическое поле, противонаправленное электродвижущей силе собственного поля зоны резания. Цель дополнительного воздействия на твердое тело посредством внешнего поля — повышение размерной стойкости резца устранением электроэрозионных процессов в зоне резания.

При указанном характере взаимодействия заготовок и резца припуск 7 срезается в виде слоев металла ЕАК,

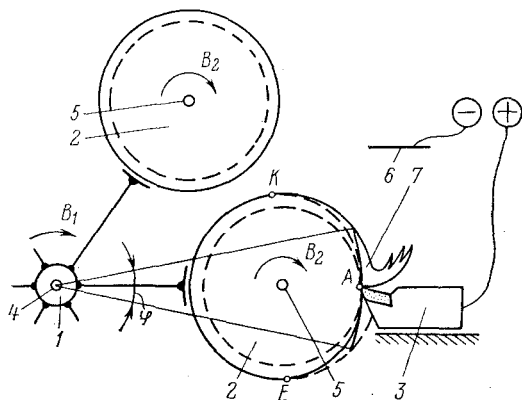


Рис. 4.6. Способ многшпindleйной обработки с наложением электростатического поля

равномерно расположенных по сечению заготовок. В то же время внешнее электростатическое поле создается между резцом 3 и пластиной 6 постоянно [27]. Таким образом, процессы срезания припуска и дополнительного воздействия на зону 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 воздействия на твердое тело. Для этого необходимо внешнее поле создавать только на период срезания припуска с заготовок. Было подсчитано, что расход энергии на создание внешнего электростатического поля уменьшается в несколько раз.

Рассмотренные примеры использования принципа согласования ритмов формообразующих движений или ритмов энергетических воздействий приводят к появлению новых S-систем с качественно иной структурой и



функцией по сравнению с исходными 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 можно 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.

#### 4.4. 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, повышения 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 способы обработки [2, 32, 45, 50 и др.].

Менее распространен принцип изменения правил выполнения приемов в формообразующей обработке посредством механического резания. Рассмотрим возможности его применения для повышения размерной стойкости зуборезных долбяков.

Для устранения явления затирания и, следовательно, локальных зон износа зубьев долбяков по задней поверхности необходимо разработать прежде всего математическую модель возникновения этого явления. На основании полученной модели возможны следующие варианты изменения правил выполнения приемов исходного способа зубодолбления (см. рис. 4.4).

По первому варианту следует назначить минимальный постоянный зазор между профилем выходной стороны зуба долбяка, находящейся в наиболее неблагоприят-

ятных условиях при долблении, и профилируемым его зубом заготовки, подставить величину этого зазора в математическую модель и вывести из нее закон изменения круговой подачи в цикле обработки. Сообщение полученной таким образом циклически изменяющейся подачи в цепь обката устраняет явление затирания.

Приведенный вариант изменения правил выполнения приема круговой подачи использован нами при разработке зубодолбежного станка [15]. Опытный образец этого станка модели КН-30 изготовлен на заводе-изготовителе зубодолбежных станков. Испытания показали, что описанный вариант изменения правила выполнения круговой подачи обеспечивает надежное устранение явления затирания.

Согласно второму варианту, при минимальном постоянном зазоре между профилем выходной стороны зуба долбяка и профилируемой стороной зуба нарезаемого колеса из математической модели следует вывести закон изменения величины «отскока» долбяка при свободном ходе. Записав полученную таким образом циклически изменяющуюся величину «отскока» на кулачке механизма «отскока» станка, можно при долблении устранить явление затирания.

По третьему варианту возможно объединение первых двух, т. е. одновременное циклическое управление круговой подачей и величиной «отскока». Естественно, этот вариант более сложен, чем предыдущие. Однако его применение вполне оправдано в том случае, когда при циклическом управлении круговой подачей нежелателен переход ее значений в отрицательную область, изменяющий направление движения обката в части цикла обработки.

Приведенные правила выполнения приемов — круговой подачи и «отскока» долбяка при свободном ходе — наиболее рациональны при разработке новых зубодолбежных станков, так как материализация этих правил требует переработки некоторых узлов станка-прототипа.

В заключение определим на основе принципа изменения правил выполнения приемов путь устранения образования зон локального износа долбяков по передней поверхности. Для решения этой задачи необходимо разработать математическую модель изменения толщины стружки вдоль режущей кромки зуба долбяка в виде функции геометрических параметров долбяка и заготов-

ки и технологических параметров процесса. Затем, приняв усредненное значение толщины стружки в качестве постоянной для всего цикла работы каждого зуба, вывести из математической модели закон управления круговой подачей. Полученную таким образом циклически изменяющуюся подачу можно подавать в цепь обката станка при рабочем ходе долбяка.

#### 4.5. 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. Возможны два варианта 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 на зубофрезерных станках. Одновременная обработка нескольких заготовок может осуществляться также набором режущих инструментов. Например, практикуется обработка двух-четырёх зубчатых колес таким же количеством долбяков, установленных на некотором расстоянии друг от друга вдоль оправки.

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 токарной обработки в схеме токарных автоматов параллельного действия. При конструкторском совмещении обработки нескольких заготовок возможно также качественное изменение исходного способа, обеспечивающее достижение новой целевой функции. Примером такого совмещения является способ токарной обработки, положенный в основу многошпиндельных токарных автоматов последовательного действия. Для данного совмещения обработки новая целевая функция —

возможность получения более сложных по конфигурации деталей, чем при совмещении по параллельной схеме. Часто при конструкторском совмещении обработки достигается неожиданный эффект, невозможный при обработке по исходной схеме. Например, при планетарном точении (см. рис. 3.12) таким эффектом является решение задачи стружкодробления.

На основе принципа совмещения обработки предложен способ зубодолбления одним долбяком одновременно двух заготовок (см. рис. 4.3). По сравнению с прототипом [46] этот способ позволяет удвоить производительность обработки без снижения качества получаемых колес. Дополнительным резервом скачкообразного увеличения производительности приблизительно в 1,5 раза является изменение правил выполнения приемов врезания и профилирования, изложенное в работе [17].

Существенная особенность принципа совмещения обработки нескольких заготовок одним инструментом или набором инструментов — задание количественной целевой функции (цели) нового способа обработки.

Примеры, реализующие некоторые новые способы формообразующей обработки, предложенные на основе принципа совмещения обработки, в конструкциях металлорежущих станков будут рассмотрены ниже.

# ГЛАВА 5

## КЛАССИФИКАЦИЯ СПОСОБОВ ФОРМООБРАЗУЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ

### 5.1. 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 из 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 любая  $S$ -система на первом уровне разбиения может быть представлена в виде объединения трех подсистем: энергетической, кинематической и базирующей. 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 — составляющими энергетической подсистемы, обычно не имеющими общих элементов с кинематической подсистемой. Как было показано ранее, энергетическая подсистема может выполнять функцию не только кинематической, 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 кинематически 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

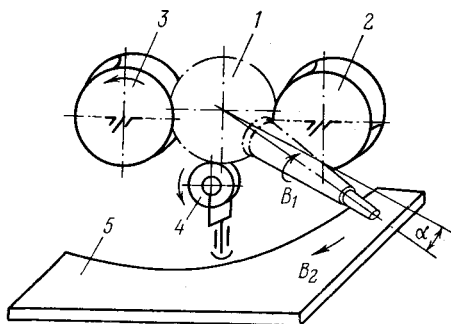


Рис. 5.1. Способ обкатки сферической поверхности с самоподачей

определяется классом характеристического образа инструмента и классом или подклассом геометрического воспроизведения поверхности.

По сложившейся традиции 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.

В основу устройства для чистовой обработки поверхностным пластическим деформированием шаровых поверхностей большого диаметра положен способ обкатки с самоподачей детали. Схема проведения такого способа показана на рис. 5.1 [31]. 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 к плоскости осей деформирующих роликов 2 и 3. Затем при сообщении вращения ведущему ролику 2 деталь 1 получает наряду

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 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 механику 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 рабочей поверхности накатных роликов. При одной и той же длине направляющей (окружность впадины) образующая ролика может иметь форму дуги окружности, радиус которой больше или равен радиусу обкатываемой сферы. Образующая может быть также очерчена дугами двух окружностей, радиус внутренней равен радиусу сферы, внешней — больше радиуса сферы. Поэтому характеристический образ инструмента (комплект накатных роликов) запишем в общем виде

$$P = \{M_{\alpha 1} \times M_{\alpha 2}\}_3,$$

где  $M_{\alpha 1}$  и  $M_{\alpha 2}$  — соответственно мощность образующей и направляющей отдельного ролика.

В работе [29] предложен еще один способ обкатки сферической поверхности с самоподачей. По этому способу (рис. 5.2) шаровую поверхность детали 1 также размещают между роликами 2, 3 и 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 итоге производится чистовая обработка ее сферической поверхности. Новизна способа по сравнению с предыдущим заключается в том, что рабочая поверхность ведущего 2 и поджимного 3 роликов выполнена не на периферии, а на

торце. Цель такого переноса рабочей поверхности — повышение безопасности процесса обработки при снижении требования к точности расположения центра обрабатываемой сферы относительно плоскости осей роликов 2 и 3.

Отметим, что перенос рабочей поверхности роликов не изменил характеристического образа инструмента. Следовательно, оба рассмотренных способа по своей структуре и принципу функционирования одинаковы, т. е. полностью взаимозаменяемы в любой конкретной ситуа-

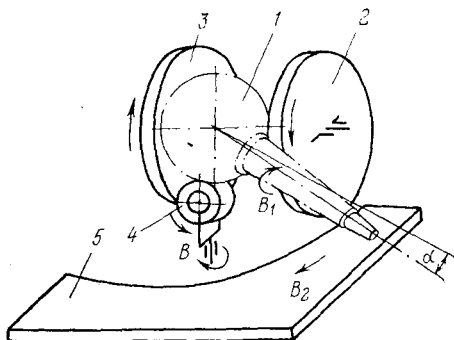


Рис 5.2. Способ обкатки сферической поверхности торцом роликов. Конструктивное различие роликов определяет новизну инструмента, а не новизну производного способа.

На рис. 5.3 показаны возможные схемы нарезания резьбы резцом, профиль которого соответствует профилю впадины резьбы. По первой наиболее распространенной схеме (рис. 5.3, а) при нарезании резьбы заготовке 1 сообщают вращательное движение  $B_1$ , а резцу 2 — продольное перемещение  $P_2$ . Другие схемы получены посредством перераспределения элементарных движений  $B_1$  и  $P_2$  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  $\Phi$  ( $B_1 \equiv B_2$ ). Следовательно, с позиций системного представления способов формообразующей обработки все рассмотренные схемы иллюст-



рируют один и тот же способ. Вместе с тем каждая из схем имеет область предпочтительного использования. Так, первая схема (рис. 5.3, а) наиболее распространена в универсальных токарно-винторезных станках, вторая (рис. 5.3, б) положена в основу прецизионных станков, третья (рис. 5.3, в) применяется в тяжелых станках, а четвертая (рис. 5.3, г) еще не используется [48]. Причем такое распределение областей предпочтительного использования рассмотренных схем имеет вполне определенную для каждого конкретного варианта цель, например, возможность создания универсального станка то-

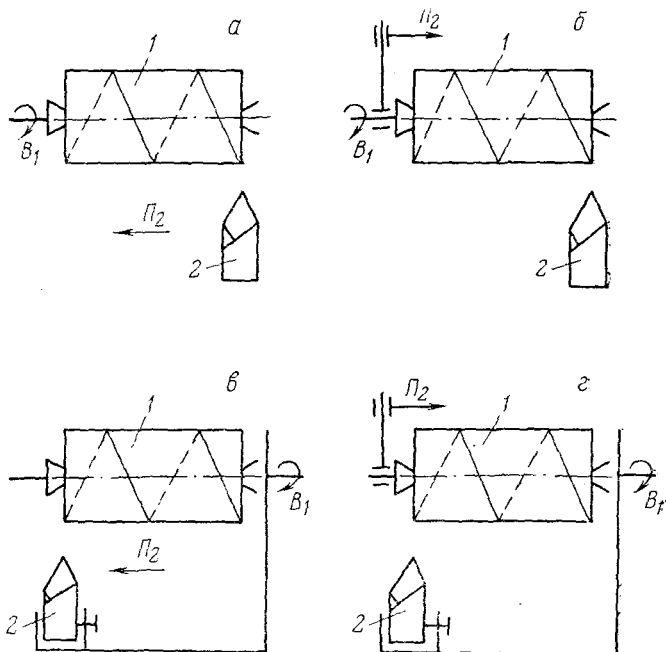


Рис. 5.3. Принципиальные схемы способа нарезания резьбы

карной группы, повышение точности нарезаемых резьб или улучшения динамических характеристик проектируемого станка.

Естественно, подобное схемное перераспределение движений между заготовкой и инструментом возможно также и для других способов формообразующей обработки. При этом чем большее число элементарных дви-

жений составляет структуру способа, тем больше возможных схемных решений.

Возвращаясь к вариациям схемы рассмотренной  $S$ -системы (рис. 5.3), замечаем, что в некоторых случаях возможна взаимная замена схем с допустимыми потерями, несущественными в конкретной ситуации. Это позволяет считать возможные схемные решения одной и той же  $S$ -системы различными только в ее пределах. В классификационных таблицах  $S$ -систему будем иллюстрировать одной наиболее распространенной схемой, а в случае необходимости приводить уже используемые или все возможные схемные решения.

В гл. 4 на основе определения способа формообразующей обработки как  $S$ -системы сформулированы наиболее общие принципы создания новых способов. В частности, достаточно подробно на конкретных примерах рассмотрены принципы изменения последовательности приемов и правил их выполнения. При использовании этих принципов 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 характеризуют вполне определенный уровень различимости способов в пределах конкретных групп  $S$ -систем. В этом случае в классификационных таблицах каждый новый способ может иллюстрироваться схемой первообразного способа или в зависимости от конкретной ситуации она может быть опущена.

При воспроизведении конкретной геометрической поверхности возможны различные схемы 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 (см. рис. 3.4, табл. 3.3). Аналогично для установки цилиндрической заготовки при токарной обработке возможно использование трех различных базирующих подсистем, имеющих одинаковый коэффициент сложности.

При разработке конкретного технологического про-

цесса 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  $S$ -системы. 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 полностью или частично 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 и классификации способов формообразующей обработки.

## 5.2. МЕТОДИКА КЛАССИФИКАЦИИ СПОСОБОВ ФОРМООБРАЗУЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ

В настоящем параграфе предпринята попытка разработать общую схему классификации способов формообразующей обработки поверхностей различного вида. В основу методики построения такой схемы положен принцип многоуровневого описания систем, при котором на каждом последующем уровне для конкретизации общей схемы включаются новые признаки.

При разработке схемы классификации 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.

Все многообразие (рис. 5.4) известных и возможных новых способов формообразующей обработки на первом уровне разбивается на три большие развивающиеся надсистемы, различающиеся характером воспроизведения поверхностей. Первая надсистема основана на удалении части вещества заготовки, вторая — на формоизменении вещества заготовки и третья — на прибавлении вещества к заготовке.

На втором уровне каждая надсистема разбивается на совокупности способов, различающихся видом первичного воздействия на заготовку или видом используемой энергии, например, механической, электрической, электромеханической, химико-механической и т. д.

На третьем уровне в пределах каждого вида используемой энергии каждая из совокупностей способов разделяется на группы, различающиеся формой воспроизводимой поверхности. На нескольких подуровнях способы обработки последовательно разбиваются на подгруппы, конкретизированные в пределах соответствующей формы воспроизводимой поверхности. Наибольшее число подуровней разбиения содержат способы обработки зубчатых поверхностей (рис. 5.5). На первом подуровне эта группа 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 реек и торцовых), на четвертом — на способы, различающиеся формой зубьев по длине (с прямым, винтовым, дуговым и червячным зубом).

Теоретически группа способов формообразующей обработки зубчатых поверхностей, характеризующаяся удалением части вещества, при использовании наиболее распространенного вида энергии (механическое резание) должна состоять из 64 подгрупп. В действительности таких групп только 29. Объясняется это тем, что некоторые виды зубчаток непредставимы и, следовательно, не используются в машиностроении. Например, бесполезно торцовое зубчатое колесо с некруглым или внут-

Многообразие  
способов формообразующей обработки

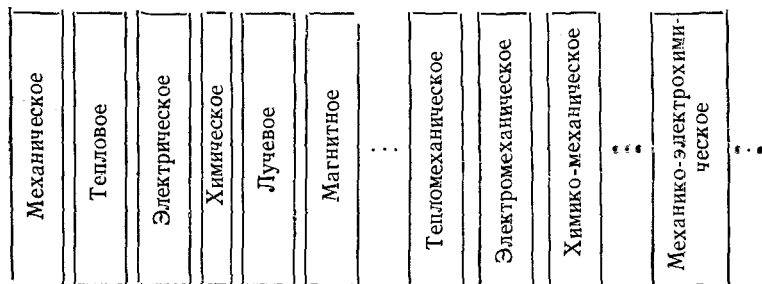
1-й уровень — характер воспроизведения поверхности

Удаление вещества  
с заготовки

Формоизменение  
вещества заготовки

Прибавление ве-  
щества к заготовке

2-й уровень — вид первичного воздействия на заготовку



3-й уровень — форма получаемой поверхности

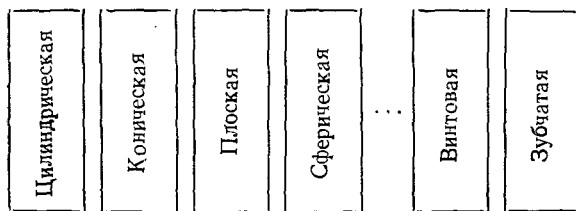


Рис. 5.4. Схема классификации способов формообразующей обработки

ренным венцом. То же можно отметить и для зубчатой рейки.

На рис. 5.6 приведены подуровни третьего уровня разбиения, позволяющие определить все возможные подгруппы способов формообразующей обработки винтовых поверхностей при использовании любого конкретного вида первичного воздействия. Теоретически возможны 12 подгрупп. В действительности таких подгрупп только 10, так как наружные и внутренние торцовые винтовые поверхности неразличимы.

Аналогично устанавливаются возможные подгруппы способов обработки, входящие в другие группы третьего уровня. Сочетая группы и подгруппы этого уровня разбиения с признаками первого и второго уровней, получаем все возможные группы и подгруппы способов формообразующей обработки. Элементарный подсчет показывает, что таких подгрупп несколько тысяч. Получен-

Способы формообразующей обработки  
зубчатых поверхностей (ЗП)

Подуровень 3.1

ЗП с круглым  
венцом

ЗП с некруглым  
венцом

Подуровень 3.2

ЗП с наружным  
венцом

ЗП с внутренним  
венцом

Подуровень 3.3

Цилиндрические  
ЗП

Конические  
ЗП

Плоские  
(рейки) ЗП

Торцовые  
ЗП

Подуровень 3.4

ЗП с прямыми  
зубьями

ЗП  
с винтовыми  
зубьями

ЗП  
с дугowymi  
зубьями

ЗП  
с червячными  
зубьями

Рис. 5.5. Схема разбиения способов формообразующей обработки зубчатых поверхностей

ные 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 первичного воздействия. Каждая подгруппа включает все известные и возможные новые способы формообразующей обработ-

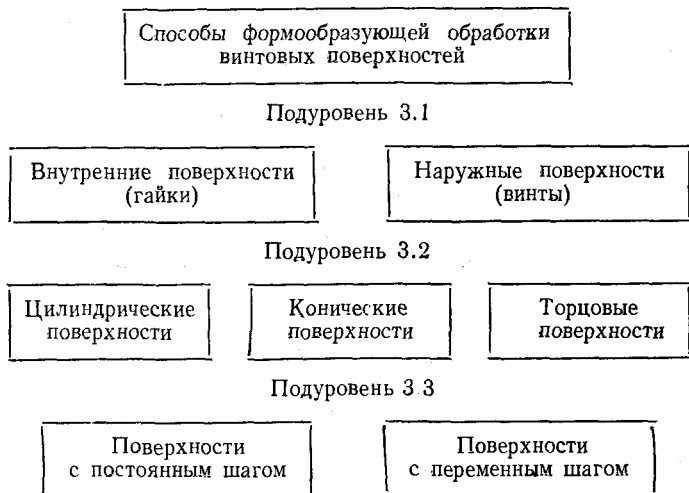


Рис. 5.6. Схема разбиения способов формообразующей обработки винтовых поверхностей

ки, различающиеся между собой структурой и функцией. Отметим также то, что уровень развития подгрупп различен. Известно, например, большое количество способов формообразующей обработки механическим резанием цилиндрических поверхностей. Отсюда высокий уровень развития соответствующей группы и составляющих ее подгрупп. Вместе с тем в технической литературе практически отсутствует информация о возможных способах получения реальных поверхностей посредством формоизменения вещества заготовки с использованием магнитной энергии.

Подгруппа — минимальная надсистема общей схемы классификации на четвертом уровне включает известные способы формообразующей обработки, располагае-

мые в порядке возрастания темпа воспроизведения образующей и направляющей (см. табл. 2.2). Для каждого способа описываются его структура и функция и указывается коэффициент сложности.

Ниже в качестве примера разрабатывается классификация способов формообразующей обработки резанием цилиндрических зубчатых колес с прямым зубом.

### 5.3. СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ И КЛАССИФИКАЦИЯ 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 пока еще не получил распространения.

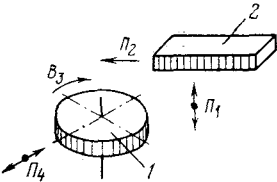
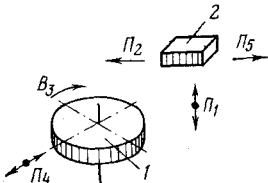
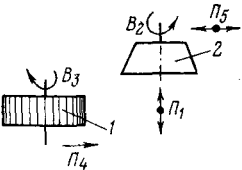
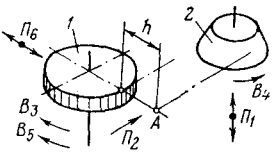
Схемы способов обработки прямозубых цилиндрических колес, созданные в разное время на основе первых двух методов профилирования зубьев, приведены в табл. 5.1 в порядке возрастания темпа образования воспроизводящих линий.

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 под-

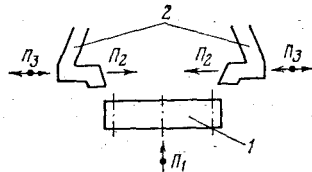


Таблица 5.1

## Классификация способов обработки резанием прямозубых колес

Номер схемы	Схема способа	Класс обра- зования поверх- ности	Критерии сложности			
			$C_9$	$C_R = C_J + C_E$	$C_6$	$C_s$
1		$H^C - H^K$	0	$7=4+3$	3	10
2		$H^C - H^K$	0	$9=5+4$	3	12
3		$H^C - H^K$	0	$9=5+4$	3	12
4	5.3	$H^C - H^K$	0	$9=5+4$	3	12
5	5.3	$H^C - H^K$	0	$9=5+4$	3	12
6	5.3	$H^C - H^K$	0	$9=5+4$	3	12
7	5.3	$H^C - H^K$	0	$9=5+4$	3	12
8		$H^C - H^K$	0	$10=6+4$	3	13

Номер схемы	Схема способа	Класс обра- зования поверх- ности	Критерии сложности			
			$C_9$	$C_K = C_J + C_E$	$C_6$	$C_3$
9		$H^c - H^k$	0	$15 = 9 + 6$	3	18
10		$H^k - П$	0	$5 = 3 + 2$	3	8
11		$H^k - П$	0	$8 = 5 + 3$	3	11
12		$H^k - H^c$	0	$5 = 3 + 2$	3	8
13		$E - П$	0	$6 = 3 + 3$	3	9

Номер схемы	Схема способа	Класс обра- зования поверх- ности	Критерии сложности			
			$C_a$	$C_K = C_J + C_E$	$C_6$	$C_s$
14		$E-H^c$	0	$6=3+3$	3	9

группы критерий сложности энергетической подсистемы равен нулю. При качественно различной длине ступицы нарезаемого колеса возможны две схемы базирования (см. рис. 3.4). 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.

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

$$P = \{M_a\}_K, \quad (k \geq Z),$$

где  $Z$  — число зубьев нарезаемого колеса.

При долблении образующая — прямая, параллельная оси заготовки, — производится движением  $\Pi_1$ , а направляющая — линия, очерчивающая профиль колеса, — сложным движением обката  $\Pi_2 \equiv B_3$ . Класс образования зубчатой поверхности ( $H^c - H^k$ ). При долблении заготовке сообщают также вспомогательное движение  $\Pi_4$ , предназначенное для ее отвода от гребенки при свободном ходе последней. Структура и функция кинематической подсистемы способа описывается множествами

$${}^k M = (\bar{J} \cup E)_{H^c} \cup (J \equiv J \cup E)_{H^k} \cup (\bar{J} \cup E)_{B_3},$$

$${}^*F = \{ \{ M_a \}_{k \geq Z}, H^c - H^*, \{ \Phi_1(\bar{P}_1), \Phi_2(P_2 \equiv B_3), \bigcup V_c(\bar{P}_k) \} \}.$$

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

Описанный способ используется главным образом в зарубежных станках для обработки мелко- и среднемодульных зубчатых колес с небольшим числом зубьев. На базе этого способа создан еще один способ, позволяющий короткой гребенкой 2 с малым числом зубьев нарезать крупномодульные зубчатые колеса 1 с большим числом зубьев (схема 2). Характеристический образ короткой гребенки

$$P = \{ M_a \}_k, \quad (k \ll Z).$$

На тяжелых зубообрабатывающих станках [4] используются гребенки, у которых  $k=3$ . По этому способу по сравнению с первообразным гребенке дополнительно после прорезки одной впадины сообщают движение деления  $P_5$  на один зуб, что усложняет кинематическую структуру способа на механику одного движения. Однако такое усложнение обеспечивает повышение точности обработки зубчатых колес [4].

Схема 3 иллюстрирует классический способ зубодолбления, используемый в большинстве зубодолбежных станков. Описание данного способа, его структура и принцип функционирования приведены в параграфе 4.3. На базе этого способа, используя принцип согласования ритмов формообразующих движений и принцип изменения правил выполнения приемов, нами разработан ряд способов, позволяющих устранить явление затирания, снижающее размерную стойкость долбяков. Графически такие способы подобны первообразному. Однако внесенные в него изменения на основе названных принципов существенно изменяют его функцию и тем самым обеспечивают достижение указанной целевой функции.

По способу 4 целевая функция — устранение явления затирания — обеспечивается посредством прекращения движения обката  $B_2 \equiv B_3$  на период свободного хода долбяка в движении  $P_1$  (см. параграф 4.3). По способу 5 та же цель достигается заменой непрерывного характера движения обката  $B_2 \equiv B_3$  качательным, синхронизированным с движением  $P_1$ . Для обеспечения процесса формообразования движение обката при рабочем ходе долбяка осуществляют с большей скоростью,

чем при обратном свободном ходе (см. параграф 4.3). Устранить затирание можно также посредством непрерывного управления скоростью движения обката с циклическостью по углу профиля выходной стороны очередного зуба долбяка, вступающего в работу (способ 6), или посредством непрерывного управления величиной «отскока» долбяка (способ 7) (см. параграф 4.4).

Схема 8 иллюстрирует относительно новый способ зубодолбления с касательным движением врезания, предложенный зарубежными исследователями [46]. Подробное описание способа дано в параграфе 1.1. На базе этого способа, используя принцип совмещения обработки нескольких заготовок одним инструментом, нами предложен способ одновременной обработки двух зубчатых колес (схема 9). Данный способ описан в параграфе 4.2. Математическая модель его кинематической подсистемы имеет вид

$${}^kM = (J \cup E)_{Hc} \cup (J \equiv J \cup E)_{Hk}^2 \cup (J \equiv J \cup E)_{Bp} \cup (J \cup E)_{Bc}^2,$$

$${}^kF = \{\{M_3\}_k, H^c - H^k, \{\Phi_1(\bar{P}_1), \Phi_2(B_4 \equiv B_5), \parallel \\ \parallel Bp(P_2 \equiv B_3), \parallel Bc(P_6)\}\}.$$

Критерий сложности кинематической подсистемы способа, определяемый из выражения для механики кинематической подсистемы, равен 15. Приведенный способ рационально использовать в производственных зубодолбежных станках для массового производства зубчатых колес.

Схема 10 иллюстрирует способ зубофрезерования прямозубых зубчатых колес червячной фрезой, положенный в основу большинства зубофрезерных станков.

При зубофрезеровании образующая — линия профиля зубьев колеса — воспроизводится движением обката  $B_1 \equiv B_2$ , состоящим из двух согласованных движений — вращения  $B_1$  фрезы 2 и вращения  $B_2$  заготовки 1, а направляющая — прямая, параллельная оси колеса, — движением  $P_3$  фрезы. Класс образования поверхности ( $H^k - P$ ).

Структура и функция кинематической подсистемы описываются выражениями

$${}^kM = (J \equiv J \cup E)_{Hk} \cup (J \cup E)_P.$$

$${}^kF = \{\{M_3\}_k, H^k - P, \{\Phi_1(B_1 \equiv B_2), \Phi_2(P_3)\}\}.$$

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

В последние годы в области зубообработки интенсивно внедряется диагональное зубофрезерование, обеспечивающее более высокую производительность. Особенностью этого процесса является использование длинных червячных фрез, получающих в процессе обработки дополнительное движение осевой подачи.

Схема 11 иллюстрирует соответствующий способ обработки. Математическая модель кинематической подсистемы способа описывается выражениями

$${}^kM = (J \equiv J \cup E)_{H^k} \cup (J \cup E)_П \cup (J \equiv J \cup E)_{Bp},$$

$${}^kF = \{\{M_{\alpha}\}_K, H^k - П, \{\Phi_1(B_1 \equiv B_2), \Phi_2(П_3), \perp Bp(П_4 \equiv B_5)\}\}.$$

Критерий сложности кинематической подсистемы способа диагонального зубофрезерования больше критерия сложности той же подсистемы первообразного способа (схема 10) на три, т. е. на коэффициент сложности механики, воспроизводящей сложное двухэлементарное движение осевого врезания фрезы  $П_4 \equiv B_5$ .

На схеме 12 показан способ зуботочения заготовки 1 чашечным резцом 2. Подробное описание способа изложено в параграфе 2.3, а модель кинематической подсистемы и ее функция приведены в табл. 3.1.

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 производителен, так как инструмент при образовании формы зуба по длине совершает поступательное движение, а не поступательно-возвратное, как при зубодолблении. Отмечалось, что процесс зуботочения не требует движения врезания и, следовательно, первообразный и возможные новые способы зуботочения проще зубодолбления. Однако дальнейшие исследования показали, что зуботочение имеет и недостатки. В частности, оно существенно уступает зубодолблению в универсальности [49]. Так, при зуботочении минимальное изменение числа нарезаемых зубьев при одном и том же модуле требует замены инструмента. При зубодолблении одним и тем же долбяком можно нарезать колесо с любым числом зубьев.

Схема 13 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  $B_1 \wedge \Pi_2$ , состоящим из двух элементарных — вращения  $B_1$  фрезы и подачи  $\Pi_2$  заготовки. Для прорезки каждой последующей впадины последовательно с движением  $B_1 \wedge \Pi_2$  осуществляют движение деления  $B_3$ .

Структура и функция данного способа зубообработки описываются выражениями

$${}^k M = (J \cup E) \wedge (J \cup E)_{\Pi} \cup (J \cup E)_{\Delta},$$

$${}^k F = \{\{E\}_K, E - \Pi, \{\Phi_1(B_1), \Phi_2(\bar{\Pi}_2), \underline{\underline{\parallel}} D(B_3)\}\}.$$

Способ фрезерования модульной фрезой непродуцителен и не обеспечивает требуемой в настоящее время точности. Поэтому используется главным образом в ремонтном производстве.

На схеме 14 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  $\Pi_1$  заготовки 1 нарезаемого колеса. При долблении резцы 2 получают также подачу врезания  $\Pi_2$  и движение «отскока»  $\Pi_3$  для устранения затирания резцов о заготовку при ее обратном ходе в движении  $\Pi_1$ . Математическая модель кинематической подсистемы способа имеет вид

$${}^k M = (J \cup E)_{Hc} \cup (J \cup E)_{Bp} \cup (J \cup E)_{Bc},$$

$${}^k F = \{\{E\}_z, E - H^c, \{\Phi_1(\bar{\Pi}_1), \underline{\underline{\parallel}} Bp(\Pi_2), \underline{\underline{\parallel}} Bc(\bar{\Pi}_3)\}\}.$$

По производительности контурное зубодолбление превосходит все другие способы зубообработки. Недостаточное распространение данного способа объясняется большой конструктивной сложностью инструмента и относительно узкой специализацией [49], поэтому он ис-

пользуется только в массовом производстве зубчатых колес.

В последние годы резко повысилось требование к производительности и особенно к точности изготавливаемых зубчатых колес. Решить эти задачи только посредством совершенствования конструкций зуборезных инструментов и более тщательным изготовлением традиционных зубообрабатывающих станков практически невозможно. Необходим иной подход. В частности, возможна на основе широкой унификации с лучшими моделями выпускаемых станков разработка моделей, реализующих некоторые из приведенных в табл. 5.1 способов. Кинематическая структура зубообрабатывающих станков, реализующих способы по схемам 4, 6 и 9, будет описана в гл. 6.

В табл. 5.1 включены не все известные способы нарезания прямозубых цилиндрических колес. Кроме того, в рассмотренной подгруппе возможны новые способы. Однако как известному, так и возможному новому способу в соответствии с общей схемой классификации отводится вполне определенное место в своей подгруппе по мере возрастания темпа воспроизведения образующей и направляющей.



# ГЛАВА 6

## СИНТЕЗ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН

### 6.1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

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 главным образом только последовательностью и правилами выполнения отдельных приемов. Выбор конкретных способов формообразующей обработки для материализации их в конструкции конкретной технологической машины осуществляется с помощью технико-экономических расчетов.

Любую технологическую машину можно рассматривать в виде объединения кинематической структуры, системы управления и компоновки. 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 от количества используемых источников энергии движения. Современная тенденция — использование в каждой кинематической группе отдельного двигателя, что обеспечивает сокращение количества передач в кинематических цепях и, как следствие, повышение кинематической точности. Применение раздель-

ных приводов обусловлено также развитием систем управления на базе электронной техники, в частности, систем числового программного управления и непосредственного цифрового управления.

На первом начальном уровне рассмотрения кинематическая структура относительно выделена из общей схемы технологической машины. Объясняется это тем, что при одной и той же кинематической структуре возможно использование различных систем управления. То же относится и к выбору схемы компоновки. Следует отметить, что наблюдающийся рост приведенных затрат на разработку новых технологических машин связан в основном с развитием и совершенствованием систем управления и схем компоновок.

В дальнейшем будут рассмотрены только некоторые закономерности синтеза кинематической структуры технологических машин.

Среди многообразия технологических машин наиболее значительный класс как по количеству, так и по разнообразию вариантов и развитости кинематической структуры составляют металлорежущие станки. Поэтому вопросы синтеза кинематической структуры технологических машин будем рассматривать на примерах металлорежущих станков.

## 6.2. ОБЩАЯ СХЕМА СИНТЕЗА КИНЕМАТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ

Структурную схему металлорежущего станка можно разработать, пользуясь общими теоретическими положениями [48], относящимися к кинематике станков. В общем случае синтез структурной схемы состоит из нескольких этапов.

Детали, изготавливаемые на станках, редко имеют одну непрерывную поверхность. В большинстве случаев они ограничены несколькими элементарными вполне определенно ориентированными поверхностями. Поэтому прежде всего разделяют образуемую поверхность на составляющие ее элементарные поверхности. Этот этап, в значительной мере связанный с выбором способа формообразующей обработки, характеризуется двумя противоречивыми моментами. Элементарные поверхности по протяженности меньше всей заданной поверхности и поэтому для их образования легко изготовить режущий ин-

струмент. Вместе с тем это вызывает необходимость в длительном процессе, осуществление которого связано с обязательным введением развитой группы деления, что усложняет конструкцию станка и его эксплуатацию. При отказе от группы деления следует предусмотреть такую геометрическую форму инструмента, при которой делительный процесс осуществляется либо одним из движений, либо копированием формы инструмента, что приводит к усложнению режущего инструмента. Характерным примером такого положения является обработка долблением цилиндрического прямозубого колеса.

Поверхность зубьев цилиндрического прямозубого колеса можно представить как два счетных множества одинаковых цилиндрических поверхностей с эвольвентной или иной направляющей. При долблении колеса одним профильным резцом после обработки каждой впадины необходимо производить деление. Для этого в станке должна быть предусмотрена точно настраиваемая кинематическая группа деления, что усложняет станок по сравнению со станками того же назначения, но без группы деления. Однако инструмент, выполняемый в виде фасонного резца, достаточно прост. Для осуществления деления требуется дополнительное вспомогательное время и поэтому процесс зубодолбления малопроизводителен. При совмещении движения деления с одним из формообразующих движений необходим более сложный инструмент — зуборезный долбяк. В этом случае при той же универсальности станка производительность его возрастает. При отказе от движения деления боковые поверхности всех зубьев колеса удобнее рассматривать как единую поверхность. В таком случае конструкция зубодолбежного станка будет очень простой, а режущий инструмент (резцовая головка) еще более усложнится, так как потребуется столько фасонных резцов, сколько нарезается зубьев. Такой инструмент очень дорог, не универсален, однако производительность станка будет очень высокой.

Как было отмечено выше, решение вопроса о выборе того или иного варианта осуществляется с учетом технико-экономических расчетов.

На следующем этапе выбирают образующую из двух геометрических производящих линий на обрабатываемой поверхности. При этом желательно реализовать ее в виде материальной линии — режущей кромки инструмента

с тем, чтобы использовать класс  $E$  ее образования, который в сочетании с классом  $H^c$  воспроизведения направляющей приводит к минимальному количеству формообразующих движений и, следовательно, к простому и производительному станку. Однако этому препятствует плохая работа режущей кромки при значительной ее протяженности и большой кривизне. Поэтому в качестве образующей выбирают более короткую и пологую линию (желательно, чтобы она была прямой). Затем подбирают форму вспомогательного элемента — характеристический образ (линию или точку) и его геометрическое положение относительно образуемой поверхности. В общем случае это зависит от многих технологических факторов и прежде всего от требований, предъявляемых к точности и чистоте образуемой поверхности и производительности.

На третьем этапе выбирают класс воспроизведения образующей и направляющей. При этом учитывают в каждом конкретном случае влияние способа образования поверхности на ее качество. Если технологические условия выбора способа геометрического образования поверхности не являются решающими, то следует отдать предпочтение способам, требующим минимального количества исполнительных движений, обеспечивающих геометрическое образование поверхности, что позволяет создать относительно простой станок. Отметим, что исполнительные формообразующие движения могут быть как простыми одноэлементарными или составными, состоящими из двух элементарных, так и сложными, состоящими из двух и более элементарных движений.

На четвертом этапе синтезируют кинематическую структуру станка. При этом учитывают, что каждое исполнительное движение воспроизводится отдельной кинематической группой, содержащей внутреннюю кинематическую связь, обеспечивающую траекторию исполнительного движения, и внешнюю связь, передающую энергию от двигателя во внутреннюю связь через звено соединения связей и обеспечивающую необходимую скорость исполнительного движения.

Кинематические группы, внутренняя связь которых включает не менее одной кинематической цепи, называются сложными. В этих группах количество элементарных кинематических пар (вращательных и поступательных), обеспечивающих получение простых одно-

элементарных движений, составляющих сложное исполнительное движение, всегда на единицу больше числа кинематических цепей внутренней связи. Кинематические группы, внутренняя связь которых выполнена в виде кинематической пары, называются простыми. Они воспроизводят как простые, так и сложные исполнительные движения. Траектория исполнительного движения, воспроизводимого такими группами, однозначно определяется конструкцией кинематических пар, выполняющих функции внутренних связей.

Исходя из выбранного способа геометрического образования обрабатываемой поверхности и технологического назначения станка, для каждого исполнительного движения проектируют кинематическую группу. Кинематическая структура станка может состоять из одной кинематической группы, создающей одно исполнительное движение формообразования — движение резания. В данном случае кинематическая структура станка — это структура кинематической группы. В качестве примера можно привести протяжные станки, в которых одним исполнительным движением осуществляется несколько процессов: формообразование, врезание и иногда деление. Чаще всего в станках создается несколько исполнительных движений. В этих случаях кинематическая структура станка состоит из нескольких кинематических групп и зависит прежде всего от их числа, характера и назначения. Основная часть кинематической структуры станка, содержащая группы формообразования, деления и врезания, обычно не является простой суммой нескольких кинематических групп. Большое влияние на нее оказывает способ соединения групп между собой. Существуют следующие способы кинематического соединения групп в общей структуре станка: через общее неподвижное звено, общую исполнительную кинематическую пару, общий источник энергии движения, внутригрупповую внутреннюю и внешнюю кинематические связи, межгрупповую кинематическую связь. Схема соединения кинематических групп оказывает влияние не только на кинематическую структуру станка, но и на его конструктивное оформление. Выбор схемы соединения кинематических групп в общую структуру станка — сложная задача. Для ее решения обычно используют принцип, опирающийся на опыт и известные аналогичные ситуации, сложившиеся в той или иной области станкостроения.

В заключение этапа на общей схеме станка размещают органы настройки исполнительных движений. Затем для этих органов на основании расчетных перемещений (РП) и уравнений кинематических цепей (УКЦ) выводят формулы настройки (ФН).

Наиболее полно сущность металлорежущего станка характеризует его кинематическая схема, так как она наиболее наглядно отображает структуру и принцип функционирования станка. Для такой схемы свойствен подробный показ элементов и механизмов, в том числе типовых, составляющих структуру кинематических цепей общей кинематической схемы станка. Однако на начальном этапе разработки кинематической структуры станка более рационально заменить кинематическую схему структурной. Для этого достаточно последовательности типовых механизмов, например зубчатых и других передач, гитар сменных зубчатых колес и т. п., без ущерба для раскрытия сущности станка обобщить конструктивными признаками, выраженными родовым понятием «кинематическая цепь». Этим достигается лаконичность, краткость, информационная насыщенность схемы. Для унификации структурных схем металлорежущих станков можно пользоваться табл. 6.1, в которой упорядочены условные родовые обозначения. Структурные схемы металлорежущих станков уже используются в практике научно-технической экспертизы изобретений [12].

В качестве иллюстрации изложенного разработаем структурную схему станка для обработки цилиндрических поверхностей синусоидального профиля.

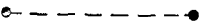





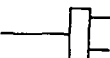
На рис. 6.1 показана форма синусоидальных профилей с различным числом выступов. Радиус-вектор таких профилей описывается выражением

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

где  $\rho$  — радиус-вектор профиля;  $R$  — радиус выступов;  $e$  — глубина впадины;  $n$  — число выступов профиля;  $\varphi$  — угловой параметр.

*Первый этап.* Синусоидальную поверхность можно разделить на составляющие элементарные поверхности. Их количество равно числу выступов профиля. Профиль каждой поверхности описывается так же, как и профиль всей поверхности, — по закону синуса. Следовательно, режущую кромку инструмента следует профилировать

Условные обозначения для элементов структурных схем  
металлорежущих станков

Условное обозначение	Родовое определение
	Участок кинематической цепи
	Кинематическая передача
	Орган настройки кинематической цепи
	Реверсивный механизм
	Суммирующий механизм
	Механизм синхронизации движений
	Механизм переключения кинематических цепей

также по закону синуса, что достаточно сложно. Нецелесообразность разделения поверхности на составляющие состоит в том, что для каждого типоразмера необходим отдельный фасонный инструмент.

Отказ от разделения синусоидальной поверхности на элементарные составляющие, а следовательно, и отказ от делительного движения открывает несколько возможностей. Профиль синусоидальной поверхности можно получить копированием формы режущей части инструмента, что приводит к существенному усложнению инструмента (протяжки) и одновременно к простейшей конструкции станка. Производительность станка будет высокой и позволит окупить затраты на изготовление сложного режущего инструмента. Однако указанные преимущества проявляются только в условиях производства с большой программой выпуска деталей. Кроме того, рассмотренный способ приемлем только для обработки отверстий синусоидального профиля.

Профиль синусоидальной поверхности можно получить движением обката, предусмотрев при этом такую геометрическую форму инструмента, при которой дели-

тельный процесс будет осуществляться с обкатным движением. В данном случае инструмент может быть выполнен в виде червячной фрезы, долбяка, обкатного резца. Стоимость его несколько снизится. Однако конструкция станка усложнится за счет введения в его кинематическую структуру сложной кинематической группы обката. Производительность по сравнению с протягиванием заметно снизится. В то же время кинематическая

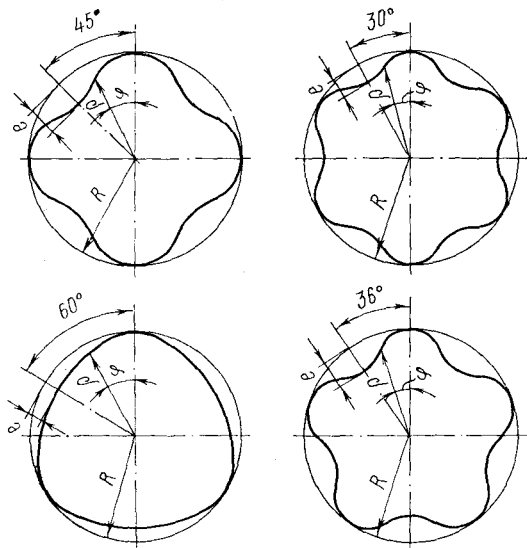


Рис. 6.1. Синусоидальные профили

структура станков, работающих с применением обкатного инструмента, более универсальна по сравнению со структурой протяжных станков. Существенным недостатком профилирования синусоидальной поверхности посредством обката, сказывающимся при широкой номенклатуре типоразмеров таких профилей, является необходимость изготовления большого числа обкатных инструментов в пределах изменения параметров  $n$  и  $e$  синусоидального профиля.

Синусоидальную поверхность можно получить также точением токарным резцом. В этом случае инструмент максимально прост, однако в структуре станка должна быть предусмотрена сложная кинематическая группа профилирования, в которую обязательно следует вклю-



чить механизм-построитель и органы настройки параметров  $n$  и  $e$ , что обеспечит его универсальность. С точки зрения универсальности важным преимуществом точения токарным резцом является возможность обработки как валов, так и отверстий при одной и той же настройке станка. На основании изложенного остановимся на способе токарной обработки.

*Второй этап.* При токарной обработке поверхностей малой протяженности в качестве образующей выбирают прямую, параллельную оси поверхности и равную ее длине. Образующая воспроизводится одновременно, а направляющая — непрерывно при скольжении, что приводит к простейшей структуре станка. При обработке поверхностей значительной протяженности образующей служит линия профиля поперечного сечения обрабатываемой поверхности, причем и образующая и направляющая воспроизводятся непрерывно. Сочетание обоих способов точения позволяет создать универсальный токарный станок, содержащий две частные кинематические структуры, в значительной степени схожие между собой и имеющие большое количество общих элементов.

При точении синусоидальных поверхностей рациональнее использовать второй способ точения, что приводит к необходимости выбора характеристического образа инструмента в виде точки или линии малой протяженности.

*Третий этап.* На основании предыдущего этапа для образования синусоидальной поверхности выбираем класс  $H^c - H^c$ . Это значит, что для воспроизведения образующей и направляющей необходимо создать по одному исполнительному движению. Образующая синусоидальной поверхности представляет собой линию переменной кривизны. Следовательно, движение материальной точки (характеристического образа), описывающее ее, должно быть сложным, состоящим из двух строго согласованных между собой элементарных движений: вращательного  $B_1$  и поступательного  $\Pi_2$ , выполняемого по синусоидальному закону. Направляющая синусоидальной поверхности — прямая, параллельная оси поверхности. Движение материальной точки, воспроизводящей ее, будет простым поступательным  $\Pi_3$ .

Таким образом, станок должен обеспечить два формообразующих движения: сложное движение резания  $\Phi_v(B_1 \equiv \Pi_2)$  и простое движение подачи  $\Phi_s(\Pi_3)$ .

В процессе точения синусоидальной поверхности глубина резания изменяется по закону синуса

$$t = t_1 + e(1 - \cos n\varphi),$$

где  $t_1$  — постоянная составляющая глубины резания, определяемая операционным припуском по диаметру выступов профиля.

Изменение глубины резания вызывает изменение силы резания, что приводит к изменению упругого отжатия в системе СПИД и, как следствие, к погрешности формы профиля и снижению точности обработки. Устранить такое явление можно стабилизацией силы резания. Наиболее просто это достигается соответствующим изменением в процессе точения продольной подачи. Следовательно, продольная подача должна носить пульсирующий характер. Причем ее переменная составляющая  $P_4$  должна подчиняться закону, близкому к параболическому (по нему изменяется сила резания в функции глубины резания). Воспроизведение пульсирующего характера продольной подачи посредством органа настройки, выполняемого в виде какого-либо механизма, проблематично. Кроме того, это существенно снизит универсальность станка. Поэтому рациональнее обе составляющие продольной подачи (постоянную  $P_3$  и переменную  $P_4$ ) формировать в двух параллельных ветвях внешней связи группы и сообщать подвижному звену внутренней связи одновременно. Для обеспечения автоматической синхронизации переменной составляющей продольной подачи с синусоидальным законом движения  $\Phi_v(B_1 \equiv \tilde{P}_2)$  целесообразно параболический закон переменной составляющей продольной подачи аппроксимировать синусоидальным законом образования профиля. Расчеты показывают, что погрешность формы профиля в данном случае будет незначительной. Одновременно такой подход к синхронизации движений позволит посредством соответствующего соединения кинематических цепей использовать один и тот же механизм-построитель для воспроизведения синусоидального профиля и переменной составляющей продольной подачи.

*Четвертый этап.* Для воспроизведения каждого из исполнительных движений станок должен содержать кинематические группы, соединенные в общую структуру станка. В станках токарного типа соединение кинематических групп осуществляется через общий двигатель.

На рис. 6.2 представлена структурная схема станка [7], отвечающая сформулированным условиям.

Группа скорости резания  $\Phi_v (B_1 \equiv \tilde{\Pi}_2)$  имеет развитую внутреннюю связь  $B_1 \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow i_x \rightarrow \text{МП} \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 6 \rightarrow 7 \rightarrow 8 \rightarrow 9 \rightarrow \Pi_2$ , представляющую собой кинематическую цепь, связывающую шпиндель 1 с поперечными салазками 9 суппорта 10. Связь содержит орган настройки  $i_x$  (гитару сменных зубчатых колес) и механизм-построй-

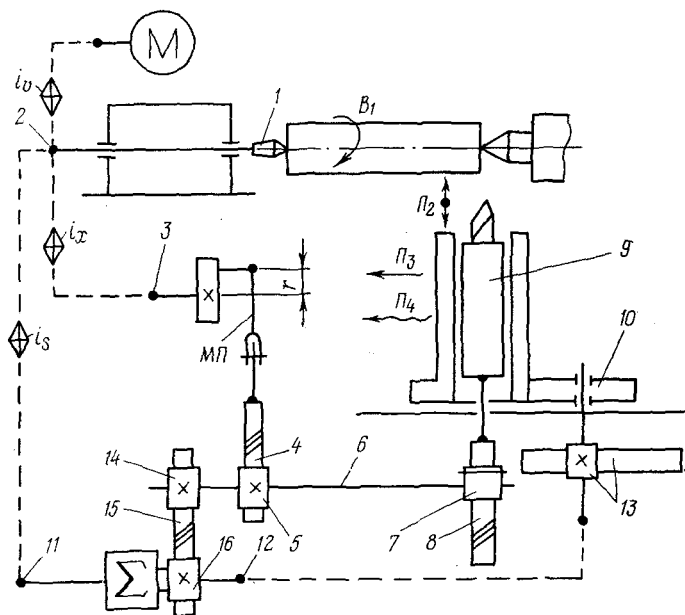


Рис. 6.2. Структурная схема станка для точения синусоидальных поверхностей

тель синусоидального профиля МП кривошипно-ползунного типа, преобразующий вращательное движение ведущего звена в поступательно-возвратное движение ведомого звена 4, изменяющееся по синусоидальному закону. Движение посредством рейки 4 передается колесу 5 и затем с помощью реечной передачи 7, 8 сообщается поперечным салазкам 9. Внешняя связь этой группы передает энергию движения от электродвигателя через орган настройки  $i_v$  и звено соединения связей 2 во внутреннюю связь.

Группа продольной подачи  $\Phi_s (\Pi_3 + \Pi_4)$  включает



нематике станков в технической литературе, по существу, еще не рассматривалась. Поэтому целесообразно разработать структурные схемы станков, реализующих некоторые из предложенных новых способов.

### 6.3. СИНТЕЗ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ СТАНКОВ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ВИНТОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ШАГА

Винтовая поверхность переменного шага служит основным элементом таких деталей машин и изделий, как шнек экструдерной машины и мясорубки, прокатный валок шаропрокатного стана и т. д. Винты переменного шага широко используются в ткацких станках. В форме многозаходного винта переменного шага изготавливают некоторые виды фрез.

Характерной особенностью обработки винтовых поверхностей переменного шага является выполнение переменным одним из двух элементарных движений (вращения заготовки или поступательного перемещения инструмента) сложного винтового движения или выполнение переменным одновременно обоих движений. Для осуществления этого в кинематику станков вводят различные механизмы изменения шага. Закон изменения передаточного отношения механизма изменения шага определяет закон изменения шага винтовой поверхности.

Рассмотрим синтез кинематической структуры, включая методику расчета настройки нескольких станков для точения винтовых поверхностей переменного шага. В основу станков положен способ формообразующей обработки, характеризующийся изменением шага винтовой поверхности за счет переменного поступательного движения резца. Класс образования поверхности ( $E-H^c$ ). Следовательно, кинематическая структура станка должна воспроизводить одно сложное формообразующее движение, состоящее из вращения заготовки с постоянной круговой частотой и согласованного с ним перемещения резца, изменяющегося по закону изменения шага винтовой поверхности. Данному условию отвечает структурная схема станка, приведенная на рис. 6.3 [6]. Станок имеет одну сложную кинематическую группу — группу образования винтовой поверхности  $\Phi_v (B_1 \equiv \Pi_2 + \Pi_3)$ . Однако в этом станке в отличие от большинства известных сложная группа включает две внутренние свя-

зи: начального теоретического шага (традиционную винторезную цепь) и приращения шага, в которую вынесен механизм изменения шага.

Внутренняя связь начального теоретического шага  $B_1 \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow i_x \rightarrow 3 \rightarrow \Sigma \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 6 \rightarrow 7 \rightarrow \Pi_2$  представляет собой кинематическую цепь, связывающую шпиндель 1, несущий заготовку, с инструментальным суппортом 7.

Внутренняя связь приращения шага  $B_1 \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow i_y \rightarrow 8 \rightarrow 9 \rightarrow 10 \rightarrow 11 \rightarrow 12 \rightarrow 16 \rightarrow 17 \rightarrow i_z \rightarrow 18 \rightarrow \Sigma \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 6 \rightarrow 7 \rightarrow \Pi_3$  также связывает шпиндель 1 с суппортом 7 и содержит механизм изменения шага, выполненный в виде по-

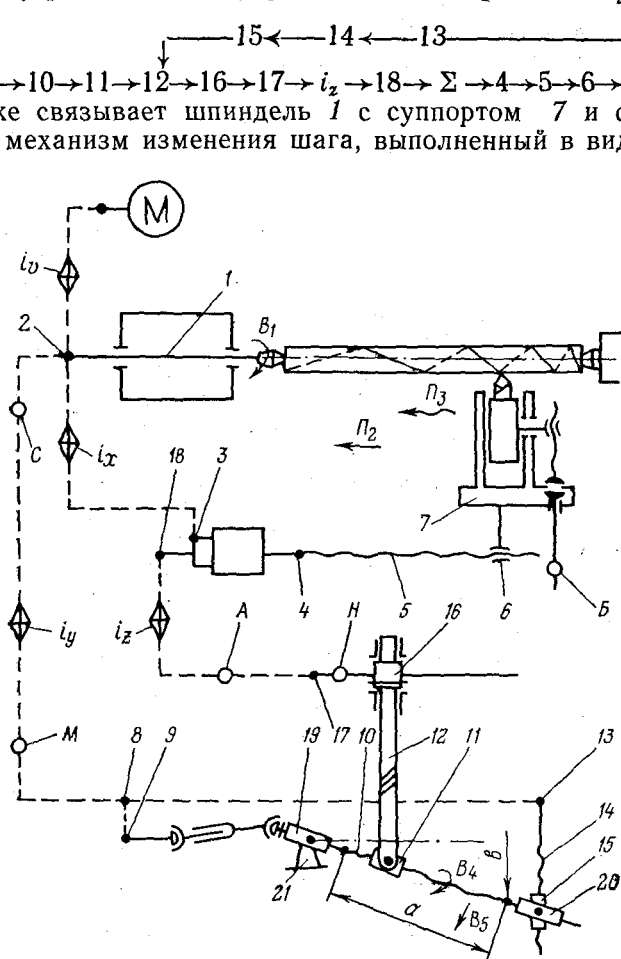


Рис. 6.3. Структурная схема станка для точения поверхностей переменного шага

воротной линейки-винта 10, несущего гайку 11, связанную посредством шарнира с зубчатой рейкой 12. Конструктивные параметры механизма изменения шага (величина перемещения  $a$  гайки 11 и соответствующая ей величина поперечного  $b$  перемещения рейки 12) связаны получаемым из кинематического контура  $B_4 \rightarrow 10 \rightarrow 9 \rightarrow 8 \rightarrow 13 \rightarrow 14 \rightarrow 15 \rightarrow 20 \rightarrow B_5$  соотношением

$$b = ai_0 \frac{t_{14}}{t_{10}}, \quad (6.1)$$

где  $i_0$  — передаточное отношение постоянных передач контура;  $t_{10}$  и  $t_{14}$  — соответственно шаг винта 10 и 14.

Обе внутренние связи соединены между собой суммирующим механизмом  $\Sigma$ . Внешняя связь группы передает энергию движения от электродвигателя  $M$  через орган настройки  $i_v$  и звено соединения связей 2 во внутреннюю связь.

При сообщении шпинделю 1 числа оборотов, равного числу витков нарезаемой резьбы, суппорт 7 по внутренней связи начального теоретического шага получит перемещение, равное сумме начальных шагов. Одновременно винт 10, получая движение по внутренней связи приращения шага, будет вращаться в опорах 19 и 20 и поворачиваться от горизонтального положения относительно кронштейна 21, что вызовет перемещение гайки 11 и связанной с ней шарниром рейки 12 вдоль винта 10 на величину  $a$  и в поперечном направлении — на величину  $b$ . Причем движение на величину  $b$ , как видно из выражения (6.1), будет ускоренным. Это движение посредством передачи рейка 12 — реечное колесо 16 преобразуется во вращательное равноускоренное движение и сообщается через суммирующий механизм суппорту 7. Таким образом, суппорт наряду с перемещением на сумму начальных шагов получит дополнительное перемещение, увеличивающееся на каждом шаге на постоянную величину. В итоге на заготовке будет воспроизводиться винтовая поверхность с прогрессивно нарастающим шагом.

Сложное формообразующее движение  $\Phi_v(B_1 \equiv \Pi_2 + \Pi_3)$  на траекторию воспроизведения винтовой поверхности настраивается тремя гитарами сменных зубчатых колес  $i_x, i_y, i_z$ . Гитары используются соответственно для настройки начального теоретического шага, перемещения

гайки 11 по винту 10 и для настройки на приращение шага, возрастающее при каждом обороте шпинделя на постоянную задаваемую величину. Скорость образования винтовой поверхности переменного шага настраивается органом  $i_v$  (коробка скоростей, сменные шкивы, гитара сменных зубчатых колес).

Выведем ФН для названных органов настройки. Предварительно введем следующие обозначения:  $L$  — длина обрабатываемой винтовой поверхности;  $k$  — число витков винтовой поверхности;  $T_1$  — шаг первого витка;  $\Delta T$  — приращение шага на каждом витке;  $\Sigma \Delta T$  — сумма приращений всех витков ( $\Sigma \Delta T = L - kT_0$ );  $T_0$  — начальный теоретический шаг ( $T_0 = T_1 - \Delta T$ ).

Цепь начального теоретического шага с гитарой  $i_x$ :

РП: 1 оборот шпинделя  $\rightarrow T_0$  перемещения суппорта;

УКЦ:  $T_0 = 1 i_x i_{01} i_{\Sigma} t_5$ ;

ФН:  $i_x = T_0 / i_{01} i_{\Sigma} t_5$ ,

где  $i_{01}$  — передаточное отношение постоянных передач расчетной цепи;  $i_{\Sigma}$  — передаточное отношение суммирующего механизма;  $t_5$  — шаг ходового винта 5.

Цепь перемещения гайки 11 с гитарой  $i_y$ :

РП:  $k$  оборотов шпинделя  $\rightarrow a$  перемещения гайки 11;

УКЦ:  $a = k i_y i_{02} t_{10}$ ;

ФН:  $i_y = a / k i_{02} t_{10}$ ,

где  $i_{02}$  — передаточное отношение постоянных передач расчетной цепи;  $t_{10}$  — шаг винта 10.

Цепь приращения шага с гитарой  $i_z$ :

за  $k$  оборотов шпинделя гайка 11 переместится на величину  $a$ , а зубчатая рейка 12 в поперечном направлении — на величину  $b$ ; за это время суппорту 7 должно быть сообщено дополнительное перемещение на величину  $\Sigma \Delta T$ . Следовательно,

РП:  $b$  перемещения рейки  $\rightarrow \Sigma \Delta T$  дополнительного перемещения суппорта;

УКЦ:  $\Sigma \Delta T = b i_z i_{03} t_5 / \pi m_{16} Z_{16}$ ;

ФН:  $i_z = \Sigma \Delta T \pi m_{16} Z_{16} / b i_{03} i_{\Sigma} t_5$ ,

где  $m_{16}$  и  $Z_{16}$  — соответственно модуль и число зубьев реального колеса 16;  $i_{03}$  — передаточное отношение постоянных передач расчетной цепи.

Цепь скорости резания с органом настройки  $i_v$ :

РП:  $n_M$  об/мин двигателя  $M \rightarrow n_{ш}$  об/мин шпинделя 1;

УКЦ:  $n_{ш} = n_M i_{04} i_v$ ;

ФН:  $i_v = n_{ш} / n_M i_{04}$ ,



где  $n_M$ — круговая частота вращения электродвигателя  $M$ ;  $i_{04}$ — передаточное отношение постоянных передач расчетной цепи.

Модифицируя способ обработки винтовых поверхностей переменного шага, например, введением в его структуру дополнительных движений или изменением правил выполнения отдельных движений, можно расширить универсальность станка. Для этого в его структуру необхо-

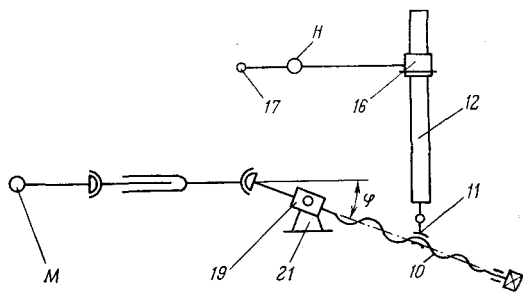


Рис. 6.4. Винт переменного шага в механизме изменения шага

димо ввести дополнительные конструктивные элементы или изменить конструкцию механизма приращения шага.

Соединив кинематические звенья  $A$  и  $B$  дополнительной кинематической цепью с органом ее настройки, на станке можно обрабатывать винтовые поверхности с переменной глубиной, изменяющейся по закону изменения шага, а соединив звенья  $B$  и  $C$  — нарезать конические поверхности переменного шага. При одновременном введении в кинематическую структуру станка обеих цепей они должны быть соединены между собой суммирующим механизмом, так как поперечный суппорт станка будет одновременно участвовать в двух сложных исполнительных движениях.

Для изменения правил выполнения отдельных приемов способа обработки винтовых поверхностей переменного шага в структуре станка необходимо заменить механизм изменения шага. Например, между звеньями  $M$  и  $H$  можно без существенных изменений конструкции станка использовать механизм с винтом переменного шага 10 (рис. 6.4), устанавливаемым при настройке под углом к оси центров станка. В этом случае характер изменения шага получаемой поверхности будет опреде-

ляться характером изменения шага винта механизма изменения шага.

Рассмотренные модификации основной кинематической структуры могут быть реализованы в одном универсальном винторезном станке. Выбор частной структуры, обеспечивающей получение винтовой поверхности с заданными геометрическими параметрами, можно осуществлять соответствующими переключениями в общей механике станка.

#### 6.4. РЕАЛИЗАЦИЯ ПРИНЦИПА СОГЛАСОВАНИЯ РИТМОВ ФОРМООБРАЗУЮЩИХ ДВИЖЕНИЙ В КИНЕМАТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЕ ЗУБОДОЛБЕЖНЫХ СТАНКОВ

Проведенный анализ классического способа долбления цилиндрических зубчатых колес зуборезным долбяком показал, что принцип согласования ритмов формообразующих движений является действенным средством создания новых способов формообразующей обработки с новой структурой и функцией, обеспечивающих достижение новой конкретной цели (см. гл. 4). На основе этого принципа разработан ряд способов зубодолбления, позволяющих устранить явление затирания и соответственно существенно увеличить размерную стойкость долбяков при одновременном повышении производительности обработки. Поэтому целесообразно рассмотреть наиболее рациональные структурные схемы зубодолбежных станков, реализующие предложенные способы зубодолбления.

При разработке станка с дискретным движением обката, воспроизводящим зацепление долбяка и нарезаемого колеса, необходимо во внутреннюю связь группы формообразования подавать движение круговой подачи в периоды рабочего хода долбяка. Для этого во внешнюю связь группы необходимо включить механизм прерывистого действия и синхронизировать его работу с работой механизма поступательно-возвратного движения долбяка. Таким условиям отвечает кинематическая структура станка, приведенная на рис. 6.5.

Структурная схема станка содержит следующие кинематические группы: скорости резания  $\Phi_v (\bar{П}_1)$ , дискретного движения обката  $\Phi_s (B_2 \equiv B_3)$ , врезания  $B_p (П_4)$  и «отскока»  $B_c (П_5)$ . Объединение их в общую структу-

ру станка выполнено по схеме с общим электродвигателем.

Группа скорости резания  $\Phi_v(\bar{\Pi}_1)$  включает внутреннюю связь — элементарную поступательную кинематическую пару, образованную гильзой 1 и корпусом 2 суппорта станка, и внешнюю связь  $M \rightarrow 3 \rightarrow i_v \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 6 \rightarrow 1 \rightarrow \bar{\Pi}_1$ , представляющую собой кинематическую цепь, передающую энергию от электродвигателя к тяговому валу 5, вращательное движение которого преобразуется в поступательно-возвратное движение  $\bar{\Pi}_1$  гильзы 1 штоossenя 7 долбяка.

Движение  $\bar{\Pi}_1$  имеет прямолинейную незамкнутую траекторию, поэтому группа  $\Phi_v(\bar{\Pi}_1)$  настраивается только на три параметра: скорость резания — органом настройки  $i_v$ , путь и исходную точку — изменением плеч рычагов кулисного механизма 6.

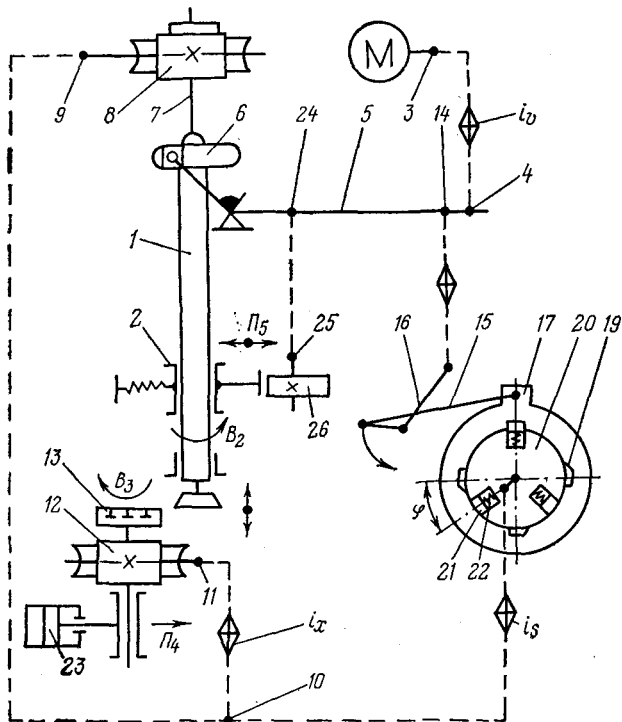


Рис. 6.5. Структурная схема зубодолбежного станка с дискретным движением обката

Группа обката  $\Phi_s (B_2 \equiv B_3)$  состоит из развитой внутренней связи (цепь обката)  $B_2 \rightarrow 8 \rightarrow 9 \rightarrow 10 \rightarrow i_x \rightarrow 11 \rightarrow 12 \rightarrow 13 \rightarrow B_3$ , кинематически связывающей штоссель 7 долбяка с делительным столом 13. Эта связь содержит орган настройки  $i_x$  на траекторию движения  $B_2 \equiv B_3$ . Внешняя связь группы  $M \rightarrow 3 \rightarrow i_v \rightarrow 4 \rightarrow 14 \rightarrow 15 \rightarrow i_s \rightarrow 10$  передает энергию движения от электродвигателя через звено соединения связей 10 во внутреннюю связь. Внешняя связь включает механизм 15, формирующий дискретное движение обката, и орган настройки  $i_s$  скорости этого движения.

Механизм, формирующий дискретное движение обката, состоит из кривошипно-коромыслового механизма 16 и механизма прерывистого действия 17. Оба механизма работают синхронно с кулисным механизмом 6 привода поступательно-возвратного движения  $\Pi_1$  долбяка.

Механизм прерывистого действия 17 [42] выполнен в виде кольца (ведомое звено кривошипно-коромыслового механизма) с пазами 18, имеющими скосы 19 с одной стороны, охватывающего диск 20, в пазах которого установлены пальцы 21, опирающиеся на пружины 22. Разность  $\varphi$  угловых шагов расположения пазов является углом качания кольца механизма прерывистого действия. Этот угол определяет период сообщения движения во внутреннюю связь группы обката.

Движение обката  $B_2 \equiv B_3$  имеет замкнутую траекторию. Группа обката настраивается на траекторию движения органом  $i_x$  (гитара сменных зубчатых колес), на скорость — органом  $i_s$ , на направление — двумя реверсами, совмещенными с органом настройки  $i_x$  и механизмом прерывистого действия.

Группа врезания  $Vp (\Pi_4)$  включает внутреннюю связь — элементарную поступательную кинематическую пару, образованную корпусом делительного стола 13 и направляющими станка, и внешнюю связь, передающую энергию движения во внутреннюю связь от гидроцилиндра 23, перемещающего стол в направлении врезания. Группа врезания настраивается на скорость движения дросселем гидросистемы станка.

Вспомогательная группа «отскока»  $Vc (\Pi_5)$  состоит из внутренней связи (элементарной поступательной кинематической пары), образованной корпусом суппорта и направляющими станка, и внешней связи  $M \rightarrow 3 \rightarrow i_v \rightarrow 4 \rightarrow 24 \rightarrow 25$ , сообщающей движение кулачку 26. отводяше-

му делительный стол от долбяка при его обратном свободном ходе (движение  $\Pi_5$ ).

Для органов настройки  $i_v$  и  $i_x$  ФН выводится по общепринятой методике, а для  $i_s$  следующим образом:

РП:  $1/2$  двойного хода долбяка в движении  $\Pi_1 \rightarrow S_K$  повороту долбяка в движении  $B_2$ ;

$$\text{УКЦ: } S_K = 1i_0i_s/2;$$

$$\text{ФН: } i_s = 2S_K/i_0,$$

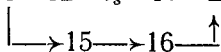
где  $S_K$  — круговая подача;  $i_0$  — передаточное отношение постоянных передач расчетной цепи.

При рассмотрении способа зубодолбления с дискретным движением обката (дискретной круговой подачей) отмечалось такое нежелательное явление, как возможность ухудшения кинематической точности цепи обката станка из-за периодического ослабления натяга в ее передачах. Устранить его можно посредством сообщения долбяку и заготовке в периоды свободного хода долбяка замедленного движения обката с минимальной («ползучей») круговой подачей.

При разработке кинематической структуры зубодолбежного станка, удовлетворяющей приведенным требованиям, наиболее рационально обе составляющие скорости движения обката (рабочую и «ползучую») сформировать в двух параллельных ветвях внешней связи группы обката и сообщить их во внутреннюю связь через суммирующий механизм, что позволит унифицировать разрабатываемую структуру со структурой станка, описанного выше. Этим условиям удовлетворяет структурная схема станка, показанная на рис. 6.6.

Станок содержит группы скорости резания  $\Phi_v(\bar{\Pi}_1)$ , обката  $\Phi_s(B_2 \equiv B_3)$ , врезания  $Vp(\Pi_4)$  и «отскока»  $Vc(\Pi_5)$ . Формообразующая группа  $\Phi_v(\bar{\Pi}_1)$  и вспомогательные группы  $Vp(\Pi_4)$  и  $Vc(\Pi_5)$  идентичны соответствующим группам предыдущей схемы. Следовательно, детально их можно не рассматривать.

Группа обката  $\Phi_s(\hat{B}_2 \equiv \hat{B}_3)$  включает развитую внутреннюю связь  $B_2 \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow i_x \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow B_3$ , кинематически связывающую штоссель 6 долбяка с делительным столом 7. Связь содержит орган настройки  $i_x$  на траекторию движения обката. Внешняя связь группы  $M \rightarrow 8 \rightarrow i_v \rightarrow 9 \rightarrow 10 \rightarrow 11 \rightarrow 12 \rightarrow i_s \rightarrow 13 \rightarrow \Sigma \rightarrow 14 \rightarrow 3$  сообщает энергию движения



от электродвигателя через звено соединения связей  $\mathcal{Z}$  во внутреннюю связь (цепь обката). Внешняя связь после кинематического звена  $11$  имеет две параллельные ветви, одна из которых содержит механизм  $12$ , формирующий дискретное рабочее движение и орган настройки  $i_s$  скорости этого движения, а другая выполнена в виде ненастраиваемой кинематической цепи  $15$ . Выходными звеньями обе ветви связаны с входами  $13$  и  $16$  суммирующего механизма. Механизм, формирующий дискретное рабочее движение, идентичен соответствующему механизму предыдущей схемы.

Среди способов зубодолбления, основанных на принципе согласования ритмов формообразующих движений, рассматривался способ, согласно которому при холо-

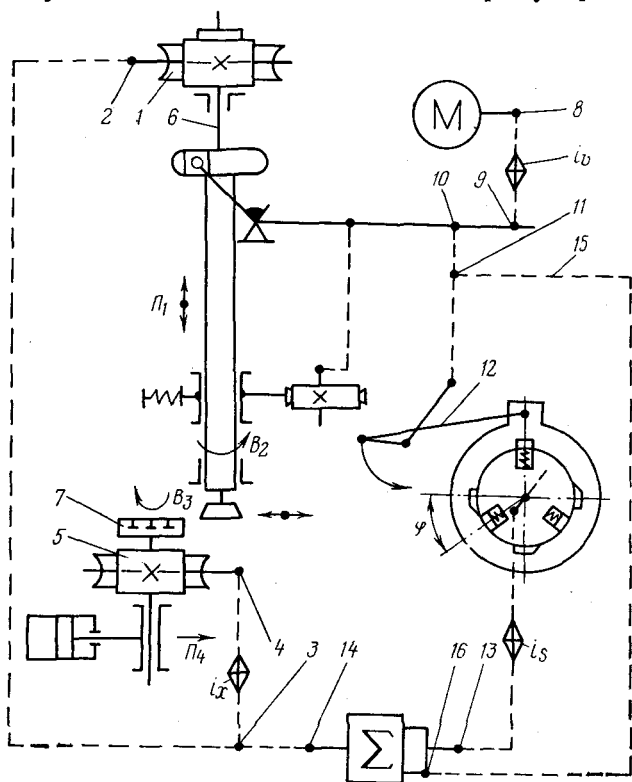


Рис. 6.6. Структурная схема станка с двумя скоростями обката — рабочей и «ползучей»

стом ходе долбяка движение обката реверсируют на противоположное. Причем его скорость должна быть меньше скорости обката при рабочем ходе долбяка. Реализация такого способа не представляет затруднений. Достаточно в ненастраиваемую кинематическую цепь 15 (рис. 6.6) последовательно включить механизм, формирующий дискретное движение, и орган настройки на скорость. Механизм дискретного действия необходимо установить для работы в противофазе с таким же механизмом, размещенным в цепи, формирующей рабочее движение обката.

В заключение отметим, что рассмотренные пути реализации способов зубодолбления, обеспечивающих устранение явления затираания, основанных на принципе согласования ритмов формообразующих движений, не требуют значительной переработки конструкций выпускаемых зубодолбежных станков. По существу, переработка любой базовой модели станка может быть сведена к разработке новой коробки круговых подач.

#### 6.5. РЕАЛИЗАЦИЯ ПРИНЦИПА ИЗМЕНЕНИЯ ПРАВИЛ ВЫПОЛНЕНИЯ ПРИЕМОМ В КИНЕМАТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЕ ЗУБОДОЛБЕЖНЫХ СТАНКОВ

В главе, посвященной поиску путей устранения явления затираания, в общем виде сформулировано правило управления скоростью движения обката в функции изменения угла профиля выходной стороны очередного вступающего в работу зуба долбяка. При разработке станка с таким управлением скоростью обката разделим циклически изменяющуюся кривую закона управления на две составляющие — постоянную и переменную и будем сообщать их в цепь обката параллельно. Вариант кинематической структуры зубодолбежного станка приведен на рис. 6.7 [15], где показана только группа управляемого движения обката  $\Phi_s(\vec{B}_2 \equiv \vec{B}_3)$ . Другие группы, входящие в кинематическую структуру станка (скорости резания, врезания и «отскока»), традиционны для станков этого вида. Поэтому рассматривать их не будем.

Внутренняя связь группы обката  $\Phi_s(\vec{B}_2 \equiv \vec{B}_3)$  представляет собой кинематическую цепь  $B_2 \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow i_x \rightarrow 4 \rightarrow 5$ , связывающую штоссель  $b$  с делительным столом 7. Связь

включает орган настройки  $i_x$  на траекторию движения обката  $\tilde{B}_2 \equiv \tilde{B}_3$ . Внешняя связь  $M \rightarrow 8 \rightarrow i_v \rightarrow 9 \rightarrow 10 \rightarrow i_k \rightarrow 11 \rightarrow$

$\rightarrow 12 \rightarrow 13 \rightarrow \Sigma \rightarrow 14 \rightarrow 3$  сообщает энергию движения от электродвигателя через звено соединения связей  $\tilde{3}$  во внутреннюю связь. Внешняя связь состоит из двух параллельных ветвей. Одна из них, содержащая орган настройки  $i_s$ , сообщает во внутреннюю связь постоянную составляющую скорости обката (круговой подачи), а вторая, имеющая орган настройки  $i_k$  и кулачковый механизм, на кулачке которого «записана» переменная составляющая

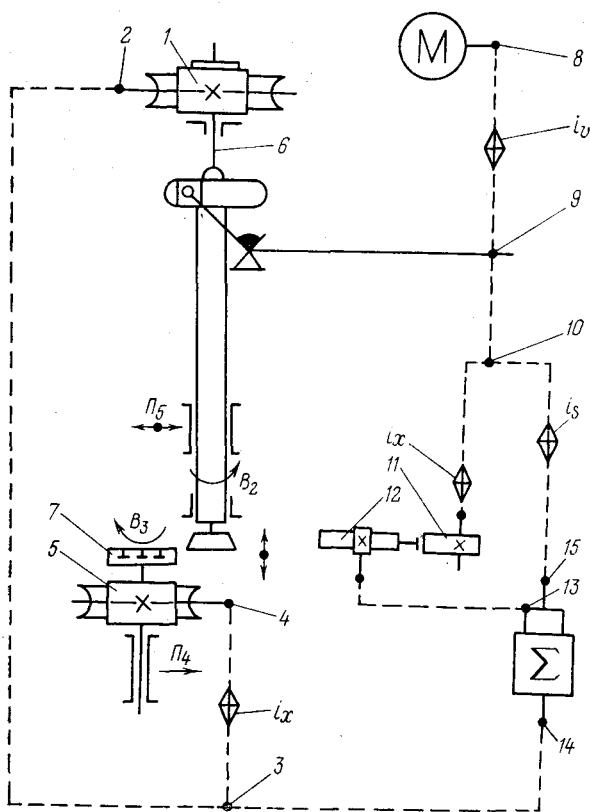


Рис. 6.7. Структурная схема станка с непрерывно управляемой круговой подачей



закона управления обкатом,— переменную составляющую. Обе составляющие складываются суммирующим механизмом  $\Sigma$ , расположенным во внешней связи.

Переменная составляющая круговой подачи (скорости обката) «записана» на кулачке 18 и посредством зубчато-реечной передачи 19, 20 преобразуется в переменное вращательное движение, сообщаемое одному из входов суммирующего механизма. Формула настройки для ветви внешней связи, содержащей кулачок 18, выводится следующим образом:

РП: 1 двойной ход долбяка  $\rightarrow 1/K$  поворота кулачка 18;

УКЦ:  $1/K = 1 i_0 i_k$ ;

ФН:  $i_k = 1/k i_0$ ,

где  $K$  — количество циклически повторяющихся участков на кулачке 18;  $i_0$  — передаточное отношение постоянных передач расчетной цепи.

Разработанная кинематическая структура станка с непрерывно управляемой скоростью движения обката положена в основу конструкции опытного образца зубодолбежного станка модели КН-30, спроектированного на базе отечественного станка модели 5122 и изготовленного на заводе-изготовителе зубодолбежных станков.

При обсуждении путей повышения размерной стойкости зуборезных долбяков рассматривался способ устранения зон локализованного износа зубьев по передней поверхности посредством циклического управления скоростью обката при рабочем ходе долбяка в функции толщины стружки. Кинематическая структура зубодолбежного станка, реализующая этот способ, приведена на рис. 6.8, где показана только группа обката  $\Phi_s (B_2 \equiv B_3)$ . Внутренняя связь группы обката, связывающая штоссель 1 долбяка и делительный стол 2, аналогична цепи обката предыдущих схем. Внешняя связь  $M \rightarrow 3 \rightarrow i_v \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 6 \rightarrow 7 \rightarrow 8 \rightarrow 9 \rightarrow \Sigma \rightarrow 11 \rightarrow 12$  передает энер-

↑  
→  $i_s$  → 10 —  
↑

гию движения от электродвигателя через звено соединения связей 12 во внутреннюю связь. Внешняя связь содержит механизм 6, формирующий дискретное движение обката, который идентичен механизму, используемому в станке по схеме, приведенной на рис. 6.5. Кроме того, она имеет две параллельные ветви. Одна из них содержит орган настройки  $i_s$  постоянной составляющей

скорости движения обката, а другая — механизм 8, формирующий переменную составляющую этого движения. Выходными звеньями обе ветви связаны с входами 9 и 10 суммирующего механизма. С выхода 11 суммирующего механизма результирующая круговая подача сообщается через звено 12 во внутреннюю связь.

Механизм 8, формирующий переменную составляющую круговой подачи, включает кулачок 13, рабочий профиль которого несет информацию о законе управления скоростью обката при рабочих ходах долбяка в функции изменения толщины стружки, срезаемой режущей кромкой, работающей в наихудших условиях. С кулачком 13 контактирует ролик 14, закрепленный на ры-

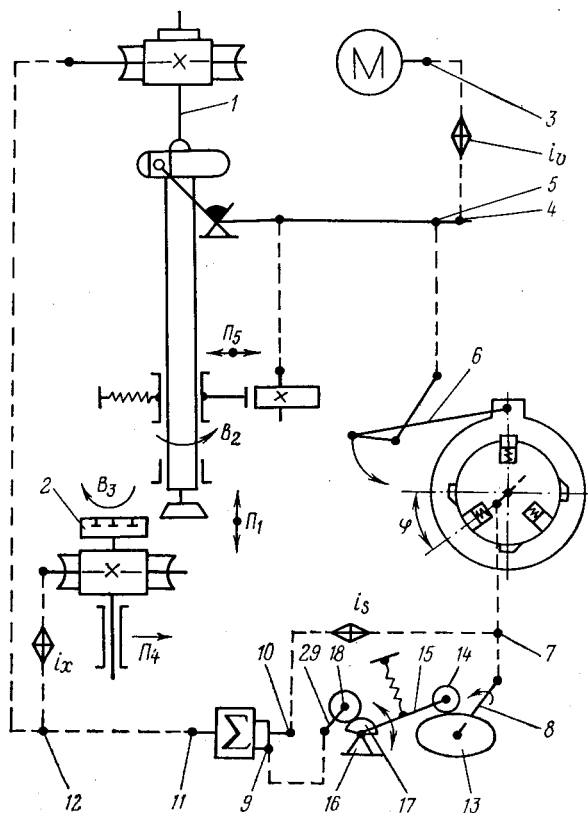


Рис. 6.8. Структурная схема станка с управлением круговой подачи в функции толщины стружки

чаге 15, качающемся относительно кронштейна 16. На оси качания рычага установлен зубчатый сектор 17, находящийся в зацеплении с шестерней 18, кинематически связанной с входом 9 суммирующего механизма.

Опыт проектирования зубодолбежного станка модели КН-30 показал, что рассмотренные пути изменения кинематической структуры станков этого типа с целью устранения отрицательного воздействия на размерную стойкость долбяков явления затирания и образования зон локализованного износа по передней поверхности не требует значительных затрат. Однако преимущества такого изменения структуры станков очевидны.

Функциональные связи описанных станков выполнены на механических передачах. Решение задачи устранения явления затирания возможно при выполнении этих связей немеханическими на базе систем числового программного управления. Вариант кинематической структуры зубодолбежного станка, реализующий данное направление, приведен на рис. 6.9, где показаны только группы формообразования  $\Phi_v(P_1)$  и  $\Phi_s(B_2 \equiv B_3)$ .

Электродвигатель 1 группы скорости резания  $\Phi_v$  подключен к устройству числового программного управления 2 через блок путевого управления 3 и тиристорный преобразователь 4. С приводным валом 5 кинематически связано подвижное звено 6 аналогового измерительного преобразователя 7. Подвижное звено 6 преобразователя несет информацию о законе управления скоростью движения обката. Аналогичный измерительный преобразователь 7 электрически соединен через предварительный усилитель 8 с коммутатором 9, а выходы коммутатора — с первыми входами суммирующих усилителей 10 и 11. Вторые входы суммирующих усилителей соединены с блоком числового программного управления 2 через блоки путевого управления 12 и 13, а выход суммирующего усилителя 10 — с тиристорным преобразователем 14, питающим электродвигатель 15, кинематически связанный с делительной парой 16 делительного стола 17. Выход суммирующего усилителя 11 соединен с тиристорным преобразователем 18, питающим аналогичный электродвигатель 19, кинематически связанный с делительной парой 20 штосселя 21 долбяка. Делительные пары 16 и 20, электродвигатели 15 и 19, тиристорные преобразователи 14 и 18, суммирующие усилители 10 и 11, блоки путевого управления 12 и 13 и

электронная гитара, выполненная на базе интерполятора устройства числового программного управления 2, в совокупности функционально образуют цепь обката (внутреннюю связь) группы  $\Phi_s (B_2 \equiv B_3)$ . Ее настройка на соотношение частот вращения долбяка и делительного стола осуществляется устройством числового программного управления 2. Им же вырабатывается путевой сигнал управления электродвигателями. Дополнительный сигнал для изменения скорости обката (круговой подачи) синхронно с поступательно-возвратным движением долбяка вырабатывается аналоговым измерительным

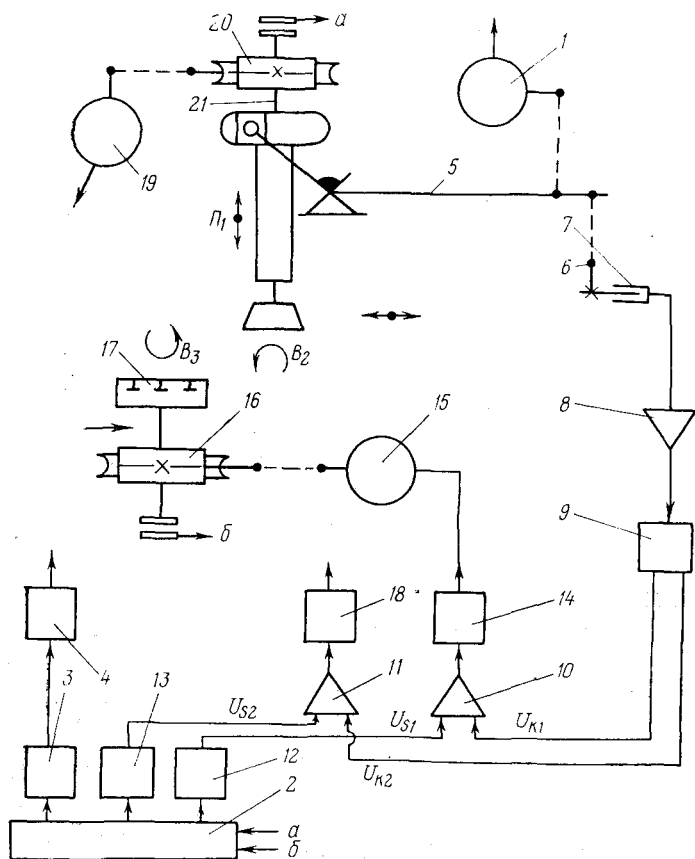


Рис. 6.9. Структурная схема зубодолбежного станка с числовым программным управлением

преобразователем 7 и сообщается в цепь обката через суммирующие усилители 10 и 11.

При включении устройства числового программного управления 2 включается электродвигатель 1. Его вращательное движение посредством кулисного механизма преобразуется в поступательно-возвратное движение  $\Pi_1$  долбяка. Устройство числового программного управления вырабатывает сигналы путевого управления  $U_{s1}$  и  $U_{s2}$  и сообщает их на входы суммирующих усилителей. Одновременно на другие входы усилителей подается сигнал изменения скорости обката в виде  $U_{k1}$  и  $U_{k2}$ . Сигналы путевого управления и изменения скорости обката попарно складываются суммирующими усилителями и подаются на тиристорные преобразователи 14 и 18 для управления работой электродвигателей 15 и 19 цепи обката. В результате совместного вращения штосселя 21 долбяка и делительного стола 17, воспроизводящего движение обката, профилирование обрабатываемого колеса будет осуществляться с переменной круговой подачей, изменяющейся по закону, заданному аналоговым измерительным преобразователем в зависимости от принятого правила управления. Например, при свободном ходе долбяка движение обката будет или прекращаться, или реверсироваться, или замедляться до значения, при котором явления затирания не возникает.

#### 6.6. РЕАЛИЗАЦИЯ ПРИНЦИПА СОВМЕЩЕНИЯ ОБРАБОТКИ НЕСКОЛЬКИХ ЗАГОТОВОК

Реализацию этого принципа, обеспечивающего повышение производительности технологических машин, рассмотрим на примерах зубодолбления и многошпиндельной токарной обработки.

Известно, что повысить производительность зубодолбления при традиционном способе обработки с радиальным движением врезания долбяка можно путем увеличения скорости резания, т. е. увеличением числа двойных ходов долбяка в минуту или путем повышения скорости обката, т. е. круговой подачи. Увеличение числа двойных ходов долбяка приводит к значительным динамическим нагрузкам в системе СПИД, что не только снижает качество зубообработки, но и надежность и технологическую долговечность станка. Кроме того, оно сопровождается соответствующим увеличением числа от-

водов стола или суппорта при обратном свободном ходе долбяка. Это движение, выполняемое синхронно с поступательно-возвратным движением долбяка, является дополнительным источником динамического воздействия на систему СПИД. Первый путь повышения производительности зубодолбления, очевидно, исчерпал себя достигнутыми к настоящему времени скоростями резания.

С повышением круговой подачи возрастает толщина стружки, ухудшается процесс стружкообразования, возрастают силы резания, увеличивается пропорционально квадрату круговой подачи высота продольных гребешков на боковых поверхностях зубьев обработанных колес. В результате возрастают погрешности зубообработки и снижается период стойкости долбяка.

Таким образом, решение проблемы повышения производительности зубодолбления при одновременном сохранении показателей технологической надежности зубодолбежных станков только с технологических позиций представляется весьма проблематичным. Поэтому решение проблемы, особенно при создании новых станков для производств, характеризующихся крупносерийным и массовым выпуском зубчатых колес, следует искать прежде всего в области конструирования, т. е. путем поиска принципиально новых способов зубодолбления и разработки на их основе кинематических структур станков с последующей детальной проработкой на базе широкой унификации с наиболее удачными из выпускаемых моделей.

Ниже предлагается одно из таких решений, в основу которого положена группа способов зубодолбления с касательным движением врезания, описанная при изложении принципа совмещения обработки нескольких заготовок.

На рис. 6.10 приведена схема зубодолбежного станка с двумя делительными столами для одновременной обработки двух заготовок одним долбяком [16].

Кинематическая структура станка содержит группы скорости резания  $\Phi_v(\overline{П}_1)$ , обката  $\Phi_s(B_2 \equiv B_3)$ , врезания  $\Phi_p(P_4 \equiv B_5)$  и «отскока»  $\Phi_c(P_6)$ .

Группа  $\Phi_v(P_1)$  традиционна для зубодолбежных станков. Ее внутренняя связь — элементарная поступательная кинематическая пара, образованная гильзой штосселя долбяка и корпусом станка. Внешняя связь  $M \rightarrow 1 \rightarrow i_v \rightarrow 2 \rightarrow 4 \rightarrow P_1$  представляет собой кинематиче-

скую цепь, передающую энергию движения от электродвигателя через орган настройки на скорость резания  $i_v$  и кулисный механизм 4 к гильзе 5 штопселя 6 долбяка.

Группа  $\Phi_s (B_2 \equiv B_3)$  имеет традиционную для зубодолбежных станков внутреннюю связь (цепь обката)

$$B_2 \rightarrow 6 \rightarrow 7 \rightarrow 8 \rightarrow 9 \rightarrow i_x \rightarrow 10 \begin{cases} \nearrow 11 \rightarrow \Sigma \rightarrow 12 \rightarrow 13 \rightarrow B_3, \\ \searrow 11 \rightarrow \Sigma \rightarrow 12 \rightarrow 13 \rightarrow B_3, \end{cases}$$

связывающую штопсель 6 с делительными столами 13. Причем после кинематической передачи 10 цепь обката разветвляется на две конструктивно одинаковые ветви.

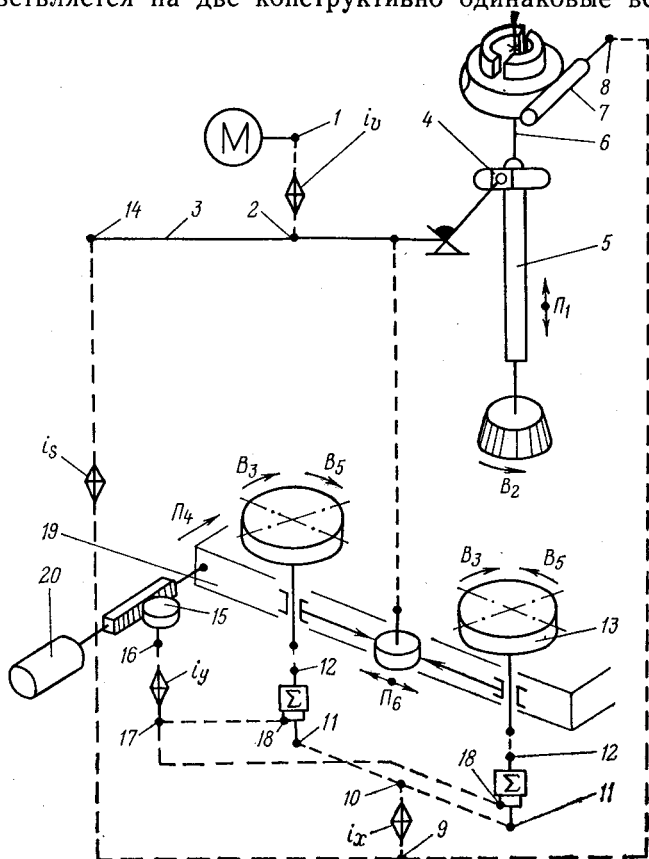


Рис. 6.10. Структурная схема зубодолбежного станка с двумя делительными столами

Внешняя связь группы  $M \rightarrow 1 \rightarrow i_v \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 14 \rightarrow i_s \rightarrow 9$  передает энергию движения от электродвигателя во внутреннюю связь через звено соединения связей 9.

Группа  $Bp(P_4 \equiv B_5)$  является нетрадиционной для зубодолбежных станков и воспроизводит зацепление реечной передачи. Ее внутренняя связь

$$P_4 \rightarrow 15 \rightarrow 16 \rightarrow i_y \rightarrow 17 \begin{matrix} \nearrow 18 \rightarrow \Sigma \rightarrow 12 \rightarrow 13 \rightarrow B_5, \\ \searrow 18 \rightarrow \Sigma \rightarrow 12 \rightarrow 13 \rightarrow B_5 \end{matrix}$$

представляет собой кинематическую цепь, связывающую продольный стол 19 с делительными столами 13. Цепь содержит орган настройки на траекторию  $i_y$ . После кинематической передачи 17 она разветвляется на два конструктивно одинаковых участка. Внешняя связь передает энергию движения от гидродвигателя 20 через реечную передачу 15 (звено соединения связей) во внутреннюю связь. Управление скоростью движения врезания осуществляется посредством изменения расхода жидкости в гидросистеме.

Делительные столы 13 одновременно участвуют в двух движениях. Поэтому внутренние связи групп обката и врезания после их разветвления соединены между собой суммирующими механизмами.

Группа «отскока»  $Bc(P_6)$  традиционна для зубодолбежных станков. Однако это движение сообщается делительным столам, а его направление перпендикулярно направлению движения врезания.

В общем виде формула настройки для гитары  $i_y$  внутренней связи группы врезания имеет вид

РП:  $S$  перемещения стола 19 в движении  $P_4 \rightarrow S/\pi m Z$  поворота делительных столов 13 в движении  $B_5$ ;

$$\text{УКЦ: } S/\pi m Z = S i_0 i_\Sigma i_y;$$

$$\text{ФН: } i_y = 1/\pi m Z i_0 i_\Sigma,$$

где  $m$  и  $Z$  — соответственно модуль и число зубьев нарезаемых колес;  $i_0$  и  $i_\Sigma$  — передаточное отношение соответственно постоянных передач расчетной цепи и суммирующего механизма.

ФН для других органов настройки выводятся по общепринятым правилам для зубодолбежных станков.

Таким образом, переход к зубодолблению с касательным движением врезания позволяет за счет конструкторского совмещения обработки создать станок, производительность которого в 2 раза выше производительности



сти известных зубодолбежных станков с радиальным движением врезания. Главным достоинством станка является возможность использования различных технологических решений в качестве дополнительного резерва повышения производительности. Отметим, что рассмотренные пути устранения явления затирания полностью приемлемы и для описанного станка.

Из анализа описания зубодолбежного станка следует, что переход к одновременной обработке двух зубча-

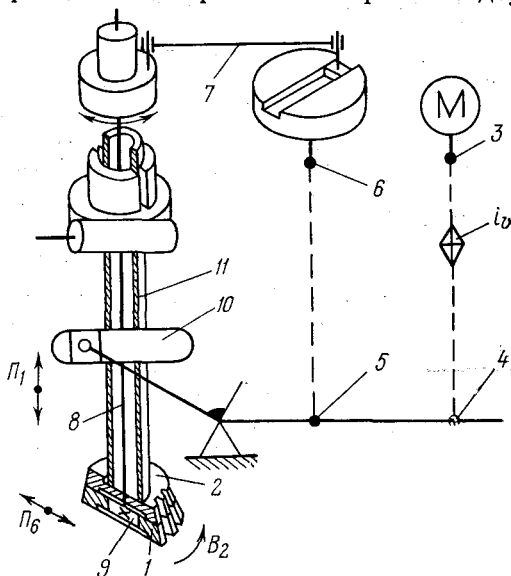


Рис. 6.11. Схема совмещения группы «отскока» с инструментом в структуре станка

тых колес при касательном движении врезания приводит к осуществлению движения «отскока» посредством столов, имеющих обычно большую массу, чем инструментальный суппорт. При большой частоте двойных ходов долбяка это может ухудшить динамику станка и, следовательно, понизить технологическую надежность. Поэтому возможно группу «отскока» совместить с инструментом, выполнив его в виде обкатной долбежной головки (рис. 6.11). Полученная таким образом группа «отскока»  $Bc(\bar{\Pi}_6)$  простая. Ее внутренняя связь — элементарная поступательная пара, образованная резцами

1 и пазами корпуса долбежной головки 2. Внешняя связь  $M \rightarrow 3 \rightarrow i_v \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 6 \rightarrow 7 \rightarrow 8 \rightarrow 9 \rightarrow 1 \rightarrow П_6$  передает энергию движения от электродвигателя  $M$  к резцам 1 (подвижным звеньям внутренней связи) и содержит кривошипно-коромысловый механизм 7, каждый поворот ведущего звена которого преобразуется в качание на постоянный угловой шаг кулачка 9, убирающего резцы 1 при обратном свободном ходе резцовой головки 2 и выдвигающего их при рабочем ходе. Кривошипно-коро-

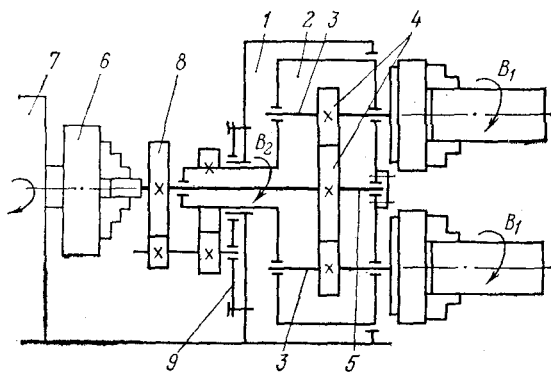


Рис. 6.12. Схема многошпиндельной приставки к токарному станку

мысловый механизм 7 работает синхронно с кулисным механизмом 10 привода поступательно-возвратного движения  $П_1$  гильзы 11 штосселя 8. Величина «отскока» резцов при свободном ходе «записана» на профиле кулачка 9.

В гл. 5 отмечалось, что совмещение обработки может привести к новому эффекту. В качестве примера приводился способ точения, обеспечивающий надежное стружкодробление за счет планетарного движения заготовки. Рассмотрим возможные пути материализации этого способа.

На рис. 6.12 приведена схема многошпиндельной приставки к токарному станку [13], реализующая способ планетарного точения. В корпус 1 приставки со свободным вращением вмонтирован шпиндельный блок 2, несущий в подшипниковых опорах шпиндели 3. Посредством пар зубчатых колес 4 шпиндели кинематически связаны с центральным валом 5, свободно вращающимся

в шпиндельном блоке 2. Центральный вал 5 закреплен в патроне 6 токарного станка и несет также ведущую шестерню 8 гитары сменных зубчатых колес 9, кинематически связывающей центральный вал со шпиндельным блоком 2. При сообщении вращения шпинделю станка через центральный вал 5 и пары зубчатых колес 4 получают вращательное движение  $B_1$  шпиндели 3. Одновременно через гитару сменных зубчатых колес 9 получит вращение  $B_2$  шпиндельный блок 2. В итоге совместное вращение шпиндельного блока 2 и шпинделей 3 будет обеспечивать периодическое прохождение каждой заготовкой зоны контакта с резцом, установленным в резцедержателе станка и получающим продольную подачу.

Для равномерного срезания припуска, исходя из условий достижения предельно допустимой огранки получаемой цилиндрической поверхности, круговые частоты вращения  $B_1$  и  $B_2$  должны быть функционально связаны. Связь обеспечивается соответствующей настройкой гитары сменных зубчатых колес 9. Методика определения передаточного отношения этой гитары в функции высоты огранки рассмотрена при описании способа точения.

Для оценки технологических возможностей планетарного точения проводилась обработка цилиндрических поверхностей с помощью многошпиндельной приставки, установленной на токарном станке 1К62 [13]. Точение осуществлялось при различных настройках гитары сменных зубчатых колес 9. Отмечено, что при обработке можно получить любое приближающееся к нулю минимальное значение огранки получаемой поверхности. Одновременно обеспечивается повышение производительности обработки. Причем эффект будет тем выше, чем большее количество шпинделей имеет приставка. Практически приставка может быть спроектирована для любого токарного станка.

Возможно оснащение приставки собственным приводом. В этом случае при модернизации токарного станка ее можно установить вместо передней бабки. В структурном отношении конструкция приставки (рис. 6.13) представляет собой сложную кинематическую группу  $\Phi_v(B_1 \wedge B_2)$ , воспроизводящую образующую получаемых поверхностей. Внутренняя связь  $B_1 \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow i_x \rightarrow 5 \rightarrow 6 \rightarrow 7 \rightarrow B_2$  — это кинематическая цепь, связываю-

щая шпиндели 1 и шпиндельный блок 2. Она содержит гитару сменных зубчатых колес  $i_x$ , посредством которой устанавливается функциональная связь между круговыми частотами вращения шпинделей и шпиндельного блока. Особенностью внутренней связи является наличие массивных шкивов 8, 9, 10, 11, установленных на коаксиально расположенных валах соответственно 12, 13 и 3, 14. Массивные шкивы обеспечивают плавную ра-

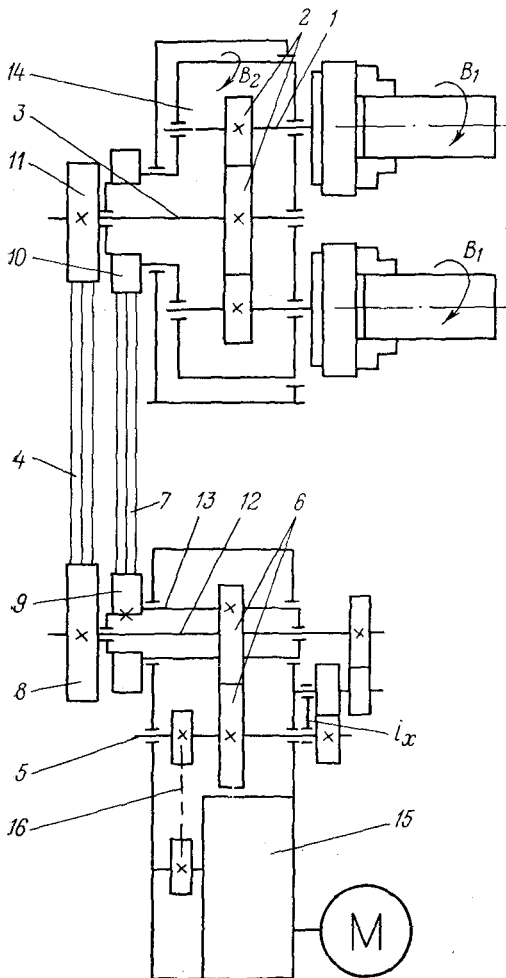


Рис. 6.13. Схема привода многошпиндельной приставки

боту приставки в условиях ударной нагрузки. Внешняя связь сообщает энергию движения от электродвигателя через коробку скоростей 15 и кинематическую передачу 16 к звену соединения связей 5 и далее по внутренней связи к шпинделям и шпиндельному блоку.

Возможна также разработка станка для планетарной обработки с числовым программным управлением.

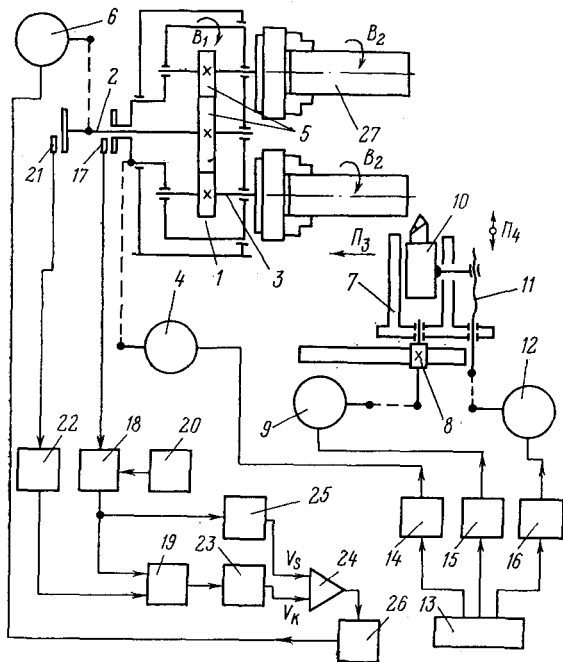


Рис. 6.14. Структурная схема многошпиндельного станка для планетарного точения с числовым программным управлением

Один из вариантов структуры такого станка приведен на рис. 6.14. В этом станке функциональная связь между круговыми частотами вращения  $B_1$  шпиндельного блока и  $B_2$  шпинделей осуществляется посредством системы синхронизации движений, выполненной на электронных блоках.

В шпиндельном блоке 1 смонтированы симметрично относительно центрального вала 2 шпиндели 3. Привод вращения шпиндельного блока производится от высокомоментного электродвигателя 4 с регулируемой круго-

вой частотой, а привод вращения шпинделей 3 от центрального вала 2 через зубчатые передачи 5 — от высокомоментного электродвигателя 6 с регулируемой круговой частотой, кинематически связанного с центральным валом 2.

Привод продольного суппорта 7 осуществляется посредством зубчато-реечной передачи 8 от высокомоментного регулируемого электродвигателя 9. На продольном суппорте установлен поперечный суппорт 10. Его привод осуществляется через передачу винт — гайка 11 от высокомоментного электродвигателя 12.

Управление электродвигателями 4, 9, 12 производится от устройства числового программного управления 13 через блоки управления соответственно 14, 15 и 16, а управление электродвигателем 6 — от системы синхронизации вращения шпиндельного блока 1 и шпинделей 3. Система выполнена в виде первого импульсного измерительного преобразователя 17, например, фотоэлектрического, установленного на шпиндельном блоке 1 и через первый счетчик импульсов 18 соединенного с первым входом фазового дискриминатора 19. Со счетчиком импульсов 18 соединен блок 20 задания передаточного отношения. На центральном валу 2 расположен аналогичный первому второй импульсный измерительный преобразователь 21, соединенный через второй счетчик импульсов 22 со вторым входом фазового дискриминатора 19.

Выход фазового дискриминатора 19 соединен через импульсно-аналоговый преобразователь 23 с первым входом суммирующего усилителя 24. К второму входу усилителя подключен блок 25 задания исходного значения круговой частоты вращения шпинделей, соединенный со счетчиком импульсов 18. Выход суммирующего усилителя 24 соединен с усилителем мощности 26, который посредством шины соединен с электродвигателем 6.

При настройке станка программируется или на программноносителе или на блоке 20 задания передаточного отношения круговая частота вращения шпинделей.

Работа станка осуществляется следующим образом. По программе от устройства числового программного управления включается электродвигатель 4 привода вращения шпиндельного блока. Одновременно по программе блок 20, настроенный на расчетное передаточное

отношение функциональной связи шпиндельный блок — шпиндели, запускает через счетчик импульсов 18 блок 25. Вырабатываемый им путевой сигнал  $V_s$  в аналоговой форме после усиления суммирующим усилителем 24 и усилителем мощности 26 включает электродвигатель 6 привода вращения шпинделей.

По программе в соответствии с циклом обработки от устройства числового программного управления 13 через блоки управления 15 и 16 включаются также электродвигатели 9 и 12 приводов продольного и поперечного суппортов.

Во время работы станка импульсные измерительные преобразователи 17 и 21 вырабатывают импульсные сигналы, частоты которых пропорциональны угловым скоростям соответственно шпиндельного блока и шпинделей. Сигналы подаются на входы счетчиков импульсов 18 и 22 и далее на входы фазового дискриминатора 19. В результате сравнения указанных сигналов фазовый дискриминатор вырабатывает импульсный сигнал ошибки, соответствующий возможному рассогласованию скоростей вращения шпиндельного блока и шпинделей.

Импульсный сигнал ошибки преобразуется в импульсно-аналоговом преобразователе 23 и подается в виде аналогового сигнала коррекции  $V_k$  на суммирующий усилитель для управления круговой частотой электродвигателя 6 привода вращения шпинделей 3. Таким образом, стабилизируется отношение круговых частот вращения шпиндельного блока и шпинделей и тем самым обеспечивается заданная условиями обработки огранка получаемых поверхностей.

Приведенные примеры, а также известный опыт совмещения формообразующей обработки одновременно нескольких заготовок одним инструментом показывают, что этот принцип является важным резервом повышения производительности технологических машин.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В развитии любой отрасли науки наступает такой момент, когда в качестве специального направления исследований выделяется построение различных обобщающих теорий. С этой точки зрения не является исключением и технология машиностроения, сформировавшая к настоящему времени большой массив разнообразных способов формообразующей обработки, отдельные группы которых можно использовать для решения одной и той же технологической задачи. Выбор способа формообразующей обработки для решения конкретной технологической задачи обозначил тенденцию к их систематизации. Известны работы преимущественно советских исследователей, посвященные различным аспектам этой проблемы. Однако затронутые в них вопросы, имея определенное методологическое значение, не охватывают с единых позиций всего многообразия известных и возможных новых способов формообразующей обработки и, следовательно, не составляют единой теории анализа, синтеза и систематизации способов получения реальных поверхностей, что определило основную цель выполненного исследования в виде разработки методологических основ систематизации способов формообразующей обработки на базе наиболее общих признаков, присущих всем способам независимо от вида используемой энергии. В ходе исследования на основе системного подхода решены следующие задачи.

1. В технической литературе понятие способа смешивается с понятием метода. Отмечена ошибочность такого подхода. Показано, что способ формообразующей обработки есть частная конкретная совокупность приемов метода, наделенная собственной целевой функцией. Из анализа конкретных произвольно взятых примеров сформулировано физическое понятие способа формообразующей обработки как целенаправленной совокупности



приемов воздействия посредством объекта, выполняющего функцию инструмента, на твердое тело, осуществляемых в определенной последовательности с соблюдением определенных правил.

2. Из определения понятия системы сделан вывод о том, что любой способ формообразующей обработки может быть отнесен к категории системных объектов, если он обладает целостностью, а его свойства и функция не сводятся непосредственно к свойствам и функциям составляющих его элементов. Показано, что такой объект характеризуется со стороны целостности относительной обособленностью из совокупности известных способов, объединенных общей целевой функцией; со стороны функции — как процесс формообразования поверхностей, т. е. как процесс качественного изменения твердого тела; со стороны структуры — как множество целесообразно связанных элементов — приемов, их последовательностей и правил выполнения. Объекты — способы формообразующей обработки, обладающие совокупностью названных свойств, — отнесены к категории технических систем, обозначенных как  $S$ -системы.

Системное представление способов формообразующей обработки позволяет применять методы теории систем при их анализе, синтезе и систематизации.

3. Доказано, что любой способ формообразующей обработки как  $S$ -система представляет собой объединение относительно обособленных подсистем (кинематической, базирующей и энергетической), каждая из которых наделена определенной структурой и функцией.

Способы формообразующей обработки являются результатом творческого поиска и создаются для решения конкретных технологических задач. В этом состоит суть диалектики появления новых способов обработки и непрерывного развития их многообразия.

Показано, что вся совокупность известных и возможных новых способов формообразующей обработки как целенаправленных  $S$ -систем, связанных общей первообразной целевой функцией, представляет собой большую развивающуюся систему или надсистему по отношению к составляющим ее  $S$ -системам.

4. Установлено, что реальная поверхность создается при помощи вспомогательного элемента (точки, линии или некоторой поверхности), материализованного на рабочей части инструмента. На основе теоретико-множест-

венных представлений дано понятие о характеристическом образе инструмента — вспомогательного элемента. Доказано, что оно носит всеобщий характер и, следовательно, распространяется не только на инструменты в традиционном представлении, но также и на иные объекты, выполняющие функцию инструмента (физическое поле, сфокусированный луч с высокой плотностью энергии и т. д.).

На примере лезвийных режущих инструментов рассмотрено влияние характеристического образа инструмента на микрогеометрию получаемых поверхностей.

Определены геометрические классы и подклассы образования реальных поверхностей. На конкретных примерах показана их осуществимость.

5. Разработана методика системного описания способов формообразующей обработки. Показано, что кинематическая или энергетическая подсистема может одновременно выполнять функцию других подсистем. Так, при механическом резании кинематическая подсистема выполняет функцию энергетической. При некоторых видах обработки, например, при объемной штамповке или при обработке поверхностным пластическим деформированием характеристический образ инструмента может выполнять функцию отдельных баз или базирующей подсистемы в целом. Возможны также способы формообразующей обработки, в которых энергетическая подсистема совмещает функции кинематической и базирующей подсистем и одновременно является инструментом.

Приведены примеры системного описания способов формообразующей обработки, основанные на различных видах физического воздействия при разном их количестве.

Для оценки сложности различных S-систем предложен критерий сложности, представляющий собой объединение критериев сложности кинематической, базирующей и энергетической подсистем.

Критерий сложности кинематической подсистемы определен как общее количество информационных и энергетических комплексов подсистемы, критерий сложности базирующей подсистемы — как общее количество баз, подлежащих материализации в виде конкретных установочных приспособлений и элементов, критерий сложности энергетической подсистемы — как общее ко-

личество составляющих этой подсистемы, функции которых не переданы другим подсистемам.

6. Из определения  $S$ -системы выведено следствие, согласно которому целенаправленное изменение совокупности приемов или последовательности их выполнения, изменение правил выполнения приемов приводит к качественно иному способу с иной структурой и функцией, что является основой наиболее распространенного принципа создания новых способов обработки. Целенаправленное усложнение или упрощение структуры исходного способа приводит к качественно новому способу.

Сформулированы принципы поиска новых способов формообразующей обработки, основанные на согласовании ритмов физического воздействия и формообразующих движений, и принцип поиска, основанный на совмещении обработки одним инструментом нескольких заготовок.

Названные принципы поиска имеют всеобщий характер и могут применяться в любой области обработки. Автор использовал их для создания новых способов зубодолбления, решающих задачу повышения производительности зубообработки, улучшения качества получаемых колес и увеличения размерной стойкости долбяков.

7. Разработана классификация способов формообразующей обработки. Общая схема классификации построена по принципу многоуровневого описания систем, при котором на каждом последующем уровне для конкретизации схемы включаются новые признаки. На первом уровне все способы обработки разбиваются на три большие развивающиеся надсистемы, различающиеся характером воспроизведения поверхностей. Первая надсистема основана на удалении части вещества твердого тела, вторая — на формоизменении вещества и третья — на прибавлении вещества к заготовке. На втором уровне каждая из надсистем разбивается на совокупности способов, различающихся видом первичного воздействия на заготовку или видом используемой энергии. На третьем уровне в пределах каждого вида энергии каждая из совокупностей разделяется на группы по форме воспроизводимой поверхности. На нескольких подуровнях третьего уровня все способы последовательно разбиваются на подгруппы, конкретизированные в пределах соответствующей формы воспроизводимой поверхности. На четвертом уровне каждая подгруппа (ми-

нимальная надсистема) включает все известные и возможные новые способы формообразующей обработки (S-системы), различающиеся структурой и функцией. В качестве иллюстрации общей методики разработана классификация способов обработки резанием прямозубых цилиндрических колес.

8. Описана на примере металлорежущих станков методика синтеза кинематической структуры технологических машин. На ее основе разработаны структурные схемы станков, реализующие некоторые новые способы формообразующей обработки, созданные автором с использованием общих принципов поиска новых способов, сформулированных в данной работе.

9. Проведенные исследования по теории систематизации способов формообразующей обработки, полученные при этом теоретические данные и практические результаты, а также разработанные методики могут быть использованы для дальнейшего детального развития теории системологии способов обработки реальных поверхностей. Задачами дальнейших исследований в данном направлении являются следующие.

Установление влияния характеристического образа инструмента не только традиционного, например, режущего, но и основанного на каком-либо физическом явлении на формирование микрогеометрии получаемых поверхностей, физико-механические свойства поверхностного слоя и структурные изменения, происходящие в обрабатываемом материале.

Выявление взаимовлияния кинематической, базирующей и энергетической подсистем для различных классов способов формообразующей обработки. Установление качественных и количественных характеристик такого влияния.

Проведение количественного сравнительного анализа различных способов и методов обработки при использовании различных параметров качества.

Разработка алгоритмов выбора способов обработки для решения технологических и конструкторских задач в конкретных условиях. Привязка таких алгоритмов к системам автоматизированного проектирования.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Барон Ю. М. Технология магнитно-абразивной обработки.— Л.: Машиностроение, 1975.— 128 с.
2. А. с. 827255 (СССР). Способ соединения двух керамических материалов / Бем Валтр и др.— Оpubл. в Б. И., 1981, № 17.
3. Большая Советская Энциклопедия. 3-е изд.— М.: Советская энциклопедия, 1971, т. 16, с. 472—473.
4. Бушуев В. В., Налетов С. П. Тяжелые зубообрабатывающие станки.— М.: Машиностроение, 1976.— 302 с.
5. Голембиевский А. И. Системно-структурный анализ способов обработки поверхностным пластическим деформированием.— Изв. вузов. Машиностроение, 1975, № 10, с. 150—152.
6. Голембиевский А. И. Кинематическая структура станка для нарезания резьб с переменным шагом.— Изв. вузов. Машиностроение, 1981, № 1, с. 140—143.
7. Голембиевский А. И. Кинематика токарного станка для точения синоидных поверхностей.— Изв. вузов. Машиностроение, 1978, № 7, с. 170—174.
8. Голембиевский А. И. Формализованное описание и систематизация способов формообразующей обработки. Сообщение 1.— Изв. вузов. Машиностроение, 1979, № 5, с. 128—131.
9. Голембиевский А. И. Формализованное описание и систематизация способов формообразующей обработки. Сообщение 2.— Изв. вузов. Машиностроение, 1979, № 6, с. 151—154.
10. А. с. 697265 (СССР). Способ долбления цилиндрических зубчатых колес / А. И. Голембиевский.— Оpubл. в Б. И., 1979, № 42.
11. А. с. 698732 (СССР). Способ долбления цилиндрических зубчатых колес / А. И. Голембиевский.— Оpubл. в Б. И., 1979, № 43.
12. Голембиевский А. И. О выполнении чертежей к описаниям изобретений, объектом которых являются металлорежущие станки.— Вопросы изобретательства, 1980, № 7, с. 55—56.
13. Голембиевский А. И., Голембиевская Г. Е. Многошпиндельная приставка.— Машиностроитель, 1981, № 8, с. 28—29.
14. Голембиевский А. И., Симановский Э. Д. Методика структурного анализа и классификации методов ротационной обработки.— Вестн АН БССР. Сер. физ.-техн. наук, 1971, № 3, с. 46—51.
15. А. с. 778961 (СССР). Зубодолбежный станок / А. И. Голембиевский, А. И. Трофимов.— Оpubл. в Б. И., 1980, № 42.
16. Голембиевский А. И., Терентьев В. А. и др. Кинематическая структура зубодолбежного станка повышенной производительности.— Изв. вузов. Машиностроение, 1979, № 9, с. 136—139.
17. Голембиевский А. И., Терентьев В. А., Трофимов А. И. По

вышение производительности зубодолбления.— *Машиностроитель*, 1979, № 3, с. 26.

18. *Грановский Г. И.* Кинематика резания.— М.: Машгиз, 1948.— 200 с.

19. *Гусева В. В.* О подачах и скоростях резания на зубодолбежных станках.— *Автомобильная и тракторная промышленность*, 1957, № 7, с. 35—37.

20. *Гурвич Р. А.* Алмазно-электролитическое сверление.— *Машиностроитель*, 1973, № 2, с. 11—15.

21. *Дружинин В. В., Конторов Д. С.* Проблемы системологии.— М.: Советское радио, 1976.— 296 с.

22. А. с. 465274 (СССР). Способ токарной обработки / Ю. И. Ермаков, Б. А. Фролов.— Оpubл. в Б. И., 1975, № 12.

23. *Заманский М.* Введение в современную алгебру и анализ.— М.: Наука, 1974.— 358 с.

24. *Зинин М. Н.* Станки для обработки зубчатых колес.— М.: Машгиз, 1950.— 188 с.

25. *Инструкция* по государственной научно-технической экспертизе изобретений ЭЗ-2—74.— *Вопросы изобретательства*, 1974, № 8, с. 29—65.

26. *Капустин Н. М.* Разработка технологических процессов обработки деталей на станках с помощью ЭВМ.— М.: Машиностроение, 1976.— 228 с.

27. А. с. 395181 (СССР). Способ обработки металлов резанием / Н. М. Клементьев и др.— Оpubл. в Б. И., 1973, № 35.

28. *Коновалов Е. Г.* Основы новых способов металлообработки.— Мн.: Наука и техника, 1961.— 296 с.

29. А. с. 384662 (СССР). Способ чистовой обработки наружных шаровых поверхностей / Е. Г. Коновалов, А. И. Голембиевский.— Оpubл. в Б. И., 1973, № 25.

30. *Коновалов Е. Г., Сидоренко В. А.* Чистовая и упрочняющая ротационная обработка поверхностей.— Мн.: Наука и техника, 1968.— 262 с.

31. А. с. 222184 (СССР). Способ чистовой обработки наружных шаровых поверхностей / Е. Г. Коновалов, А. И. Фломенбит.— Оpubл. в Б. И., 1968, № 22.

32. А. с. 848235 (СССР). Способ электроэрозионной обработки / М. В. Коренблюм и др.— Оpubл. в Б. И., 1981, № 27.

33. *Кошкин Л. Н., Бережной Ю. Н.* Вихрь рождает машину.— М.: Молодая гвардия, 1962.— 79 с.

34. *Левинсон Е. М. и др.* Электроэрозионная обработка материалов.— Л.: Машиностроение, 1971.— 255 с.

35. *Лившиц А. Л.* Методика поиска новых процессов формообразования.— *Вестник машиностроения*, 1967, № 9, с. 60—64.

36. *Лившиц А. Л. и др.* Электроимпульсная обработка металлов.— М.: Машиностроение, 1967.— 295 с.

37. *Маталин А. А.* Точность механической обработки и проектирование технологических процессов.— Л.: Машиностроение, 1970.— 320 с.

38. *Матюшин В. М.* Нарезание колес зуборезными долбяками с увеличенными круговыми подачами.— В кн.: Организация процессов обработки металлов резанием, 1961, вып. 31, с. 2—47.

39. А. с. 228463 (СССР). Способ прерывистого течения / Ю. А. Новоселов.— Оpubл. в Б. И., 1969, № 31.

40. Панченко К. П. Определение и классификация схем резания.— Изв. вузов. Машиностроение, 1964, № 12, с. 132—138.
41. Подураев В. Н. Автоматически регулируемые и комбинированные процессы резания.— М.: Машиностроение, 1977.— 304 с.
42. А. с. 339704 (СССР). Механическая передача / И. И. Порошин и др.— Оpubл. в Б. И., 1972, № 17.
43. Развитие науки о резании металлов.— М.: Машиностроение, 1976.— 416 с.
44. Седов Б. Е. Влияние модификации профиля зубьев долбяков на их стойкость.— В кн.: Металлорежущий и контрольно-измерительный инструмент. М., 1972, № 9, с. 15—18.
45. А. с. 844184 (СССР). Способ электронно-лучевой обработки / Б. А. Снедков и др.— Оpubл. в Б. И., 1981, № 25.
46. Патент 475761 (СССР). Способ нарезания цилиндрических колес / М. Тиксье.— Оpubл. в Б. И., 1975, № 24.
47. Тихомиров Р. А., Николаев В. И. Механическая обработка пластмасс.— Л.: Машиностроение, 1975.— 205 с.
48. Федотенок А. А. Кинематическая структура металлорежущих станков.— М.: Машиностроение, 1970.— 408 с.
49. Харлампиев И. С. Обкатывающее протягивание зубьев зубчатых колес.— М.: Машиностроение, 1981.— 212 с.
50. А. с. 833413 (СССР). Способ электрохимического шлифования / М. Я. Чмир и др.— Оpubл. в Б. И., 1981, № 20.
51. Цветков В. Д. Система автоматизации проектирования технологических процессов.— М.: Машиностроение, 1972.— 296 с.
52. Шнейдер Ю. Г. Образование регулярных микрорельефов на деталях и их эксплуатационные свойства.— Л.: Машиностроение, 1972.— 240 с.
53. Этин А. О. Кинематический анализ методов обработки металлов резанием.— М.: Машиностроение, 1964.— 323 с.
54. Ярмолович С. В. Изготовление деталей с износостойким покрытием.— Машиностроитель, 1978, № 8, с. 17—18.
55. А. с. 358089 (СССР). Способ обработки резанием с опережающим пластическим деформированием / Н. А. Ярославцева и др.— Оpubл. в Б. И., 1972, № 34.
56. Ящерицын П. И. Технологическая наследственность и эксплуатационные свойства шлифованных деталей.— Мн.: Наука и техника, 1971.— 210 с.
57. Ящерицын П. И. Основы технологии механической обработки и сборки в машиностроении.— Мн.: Выш. шк., 1974.— 607 с.
58. Bouzakis K. Vermeidung der Kollision beim Wälzstossen.— WDI-Z, Band 120, 1978, N 24, s. 1133—1137.
59. Opitz H. u. a. Verschleissuntersuchungen beim Wälzstossen von Geradverzahnungen.— Bericht des Landes Nordrhein-Westfalen, 1974. N 2401.— 64 s.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение . . . . .	3
Глава 1. Системный характер способов формообразующей обработки поверхностей в машиностроении . . . . .	7
Глава 2. Геометрическая интерпретация воспроизведения реальных поверхностей . . . . .	25
Глава 3. Методика системного описания способов формообразующей обработки . . . . .	47
Глава 4. Общие принципы поиска новых способов формообразующей обработки . . . . .	80
Глава 5. Классификация способов формообразующей обработки . . . . .	101
Глава 6. Синтез кинематической структуры технологических машин . . . . .	121
Заключение . . . . .	160
Литература . . . . .	165

АНАТОЛИЙ ИОСИФОВИЧ ГОЛЕМБИЕВСКИЙ

### ОСНОВЫ СИСТЕМОЛОГИИ СПОСОБОВ ФОРМООБРАЗУЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Заведующая редакцией Н. Т. Ломако. Редактор С. В. Машкан  
Художник А. Ф. Корчагин. Художественный редактор В. В. Савченко  
Технический редактор В. И. Крученюк. Корректор Е. Т. Трусов  
ИБ № 2585

Сдано в набор 24.10.85. Подписано в печать 24.01.86. АТ 17023. Формат 84×108<sup>1/2</sup>. Бум. тип. № 2. Гарнитура литературная. Высокая печать. Усл. печ. л. 8,82. Усл. кр.-отт. 9,03. Уч.-изд. л. 8,4. Тираж 1000 экз. Зак. № 2009. Цена 1 р. 30 к. Издательство «Наука и техника» Академии наук БССР и Государственного комитета БССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 220600. Минск, Ленинский проспект, 68. Типография им. Франциска (Георгия) Скорины издательства «Наука и техника». 220600. Минск, Ленинский проспект, 68.