

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО  
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

КУЙБЫШЕВСКИЙ ордена ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ имени АКАДЕМИКА С. П. КОРОЛЕВА

*В. И. Богданович, В. А. Барвинок, А. Е. Цигулко*

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МЕТОДОВ  
ОБРАБОТКИ,  
ПРИМЕНЯЕМЫХ В ПРОИЗВОДСТВЕ  
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

*Учебное пособие*

УДК 621. 7 (9. 04)

Богданович В. И., Барвинок В. А., Цидулко А. Г. *Системный анализ технологических методов обработки, применяемых в производстве летательных аппаратов*; Учебное пособие; Куйбыш. авиац. ин-т Куйбышев, 1989. — 68 с.

В пособии изложены физико-химические основы технологических методов обработки материалов. Даны понятия о структуре и составляющих технологического метода. Материал изложен с точки зрения системного подхода.

Пособие предназначено для студентов третьего и четвертого курсов.

Ил. 22. Библиогр. — 10 назв.

Рецензенты: В. С. Иванов, А. П. Лебедев

Печатается по решению редакционно-издательского совета Куйбышевского ордена Трудового Красного Знамени авиационного института имени академика С. П. Королёва

## *ПРЕДИСЛОВИЕ*

Повышение надежности и экономичности, улучшение основных параметров различных аппаратов, машин и двигателей, а также уменьшение себестоимости изделий и рост производительности труда достигаются технологией изготовления этих изделий.

Основными направлениями решения задач, стоящих перед технологией производства летательных аппаратов, является разработка оптимальных маршрутных и операционных технологических процессов. В основе каждого частного технологического процесса и каждой технологической операции лежит технологический метод. Именно через него осуществляется связь производства с фундаментальными разработками. Благодаря такой связи модернизируются существующие и разрабатываются принципиально новые технологии, позволяющие обеспечить в процессе производства требуемое качество изделия при его наименьшей себестоимости и максимальной производительности труда.

Разработка, внедрение и освоение технологических методов возможны лишь на базе глубокого и всестороннего изучения физико-химических явлений, происходящих в материалах при их обработке.

На ранних этапах развития технологии достижение целей полностью зависело от опыта и интуиции технолога, его умения выбрать наиболее эффективный метод и режим изготовления детали. Однако в настоящее время из-за отсутствия универсального технологического метода, в равной

степени эффективного для изготовления деталей из различных материалов, а также в связи с непрерывным увеличением количества методов возникает необходимость все более широкого использования ЭВМ для разработки и проектирования технологических процессов. Применение ЭВМ приводит к необходимости разработки математических моделей технологических методов, базирующихся на знании физико-химического механизма обработки.

Надо отметить, что теоретическое описание и практическое применение различных технологических методов достаточно широко освещены только по каждому отдельному методу. В то же время отсутствует литература, в которой достаточно систематизированно и с единых позиций изложены физико-химические основы различных технологических методов. Отсутствие такого комплексного подхода приводит к тому, что не всегда объективно оцениваются относительные возможности каждого метода.

В связи с этим в предлагаемом учебном пособии в краткой форме дается систематизированное изложение физико-химических основ методов обработки материалов. В основу такой систематизации авторами положены основные понятия системотехники и существующие представления о составляющих технологического метода.

Основой пособия являются материалы первого раздела программы курса «Физико-химические основы технологии обработки материалов», читаемого в 6-м и 7-м семестрах студентам Куйбышевского авиационного института.

# 1. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

## 1.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА, ЕГО СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ

Производственный процесс, состоящий из совокупности всех действий, направленных на изготовление и ремонт изделий, выпускаемых на данном предприятии, сложен и многообразен. Он включает в себя изготовление и обработку заготовок для получения из них деталей; сборку из деталей узлов, агрегатов и изделий; их испытание; технический контроль, хранение и перемещение на всех стадиях изготовления деталей, узлов, агрегатов и изделий; организацию снабжения и обслуживания рабочих мест; управление всеми звеньями производства; все работы по технической подготовке производства.

В основе построения производственного процесса лежат исходные положения, предусматривающие наименьшие затраты труда и максимальное его обеспечение при рациональном использовании и непрерывном совершенствовании средств производства. Рациональное построение производственного процесса обеспечивается путем его разделения на три основные составные части: технологический процесс; организация технологического процесса в конкретных производственных условиях; управление технологическим процессом. В производственном процессе наиболее важным звеном является технологический процесс.

*Технологический процесс* — это часть производственного процесса, содержащая целенаправленные действия по изготовлению и (или) определению состояния предмета труда [1]. Причем, *состояние предмета труда* (материала, полуфабриката, заготовки, отливки и т. д.) определяется при помощи меры и (или) измерительного прибора, т. е. путем проведения измерений.

Каждый конкретный технологический процесс состоит из *технологических операций*, представляющих собой законченную

часть технологического процесса, выполненного на одном рабочем месте. Технологические операции, в свою очередь, разделяются на *технологические переходы* — законченную часть технологической операции, выполняемую одними и теми же средствами технологического оснащения при постоянных технологических режимах и установке. Следовательно, технологический переход характеризуется постоянством применяемого инструмента и обрабатываемой поверхности.

Наиболее общее представление о технологическом процессе дает *маршрутное описание* технологического процесса. Под маршрутным описанием понимают сокращенное последовательное описание всех технологических операций в маршрутной карте без указания переходов и технологических режимов. Полное же описание всех технологических операций в последовательности их выполнения с указанием переходов и технологических режимов называется *операционным описанием технологического процесса*. Проектирование и разработка технологического процесса делятся на два этапа:

создание маршрутного технологического процесса, содержащего рациональную последовательность технологических операций;

разработка операционных технологических процессов, содержащих все необходимые сведения для осуществления каждой операции всего технологического процесса.

Каждый технологический процесс изготовления любого машиностроительного изделия является интегральным процессом производства, состоящим из комплекса взаимосвязанных *частных технологических процессов* [2]. Например, в технологии производства летательных аппаратов выделяют следующие частные технологические процессы:

- изготовление заготовок для монолитных объемных деталей;
- механическая обработка резанием;
- заготовительно-штамповочные работы;
- электрофизическая обработка материалов;
- электрохимическая обработка материалов;
- клепально-сборочные работы;
- сварочно-сборочные работы;
- общая сборка и монтажные работы;
- регулирующе-испытательные технологические процессы.

Для других машиностроительных технологий разделение технологического процесса на частные процессы может отличаться от приведенного выше.

Структура общего технологического процесса изготовления изделия имеет в общем случае три передела: получение заго-

говки; ее обработка; сборка; контроль и испытание изделия. В свою очередь, обработка обычно содержит еще четыре переработки (рис. 1.1.). К ним относится черновая обработка, при ко-

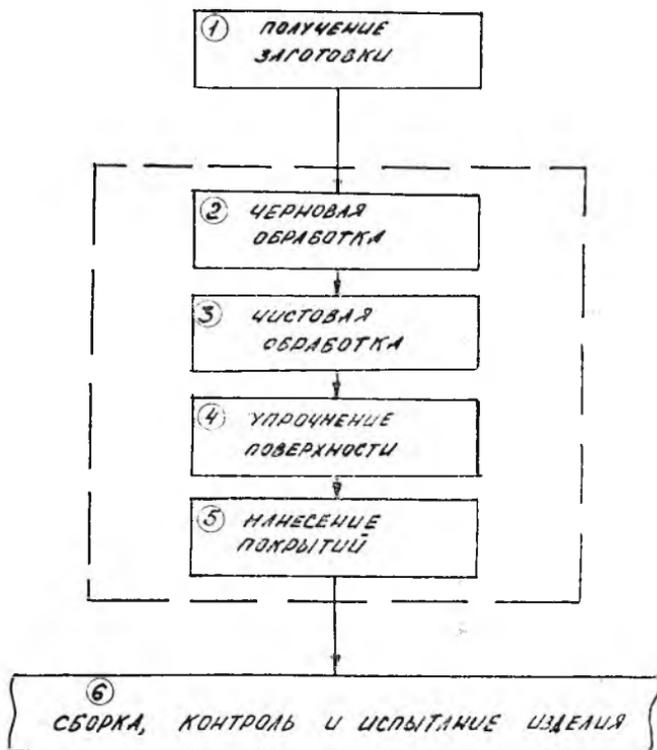


Рис. 1.1. Структура маршрутного технологического процесса

торой снимается и удаляется с заготовки основная часть припуска, и объем детали становится меньше объема заготовки; чистовая обработка, при которой достигается необходимая точность детали и шероховатость поверхности; упрочняющая обработка, изменяющая свойства поверхности детали в нужном направлении, но не изменяющая объема детали; нанесение покрытий.

В современном машиностроении добиваются повышения производительности труда путем сокращения производственного цикла. При этом часто исключаются целые технологические переработки или даже частные технологические процессы. Так, например, совершенствование процессов изготовления заготовок

путем повышения точности литья или заготовительно-штамповочных операций позволяет в ряде случаев исключить процессы обработки. Освоение резания с опережающим пластическим деформированием позволяет также в ряде случаев исключить упрочняющую обработку. Идеальный технологический процесс должен содержать только заготовительные и сборочные процессы, обеспечивая тем самым наиболее короткий производственный цикл и безотходную технологию.

Однако в настоящее время заготовительные процессы в большинстве случаев не обеспечивают заданные требования к точности, качеству поверхности и другим эксплуатационным характеристикам деталей. Возможности заготовительных процессов формообразования обычно ограничиваются достижением шероховатости  $R_a = (6,3 \dots 5,0)$  мкм и 8 — 11 квалитетов, а этого недостаточно для большинства типовых машин. Высокие требования предъявляются к точности внешних обводов современных самолетов. Так, если при скоростях (200...300) км/ч отклонения от номинальной формы, заданной конструктором, допустимы в пределах 5...10 мм, то у сверхзвуковых самолетов — 1...3 мм при резко уменьшенной допустимой волнистости поверхности планера. Поэтому технологи вынуждены применять дополнительные технологические переделы, разрабатывать и внедрять новые технологические методы, обеспечивающие укороченный производственный цикл и нужное качество и точность деталей.

Однако, как показывает практика, при хорошем качестве детали ее усталостная прочность сильно зависит от метода и режима обработки. Так, например, если у стали ( $\sigma_b = 1420$  МПа) предел выносливости при тонком полировании принять за 100%, то после операций суперфиниша предел выносливости составит 90%, при чистовой обработке резцом — 80%, при черновой обработке или шлифовании — 70%, а без мехобработки непосредственно после прокатки (с окалиной) — всего 35% [2]. В связи с этим возникает необходимость введения дополнительных технологий, в том числе упрочнения и нанесения покрытий. Таким образом, закономерность построения технологического процесса производства машин имеет следующий вид: заготовительные операции — операции обработки — упрочнение и нанесение покрытий — сборка — испытания обусловлена тенденцией непрерывного совершенствования характеристик проектируемых изделий и, по-видимому, сохранится в будущем [3].

## 1.2. СРЕДСТВА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОСНАЩЕНИЯ ТЕХПРОЦЕССА

Для осуществления технологического процесса необходимы орудия производства. Совокупность орудий производства, необходимых для осуществления технологического процесса, получила название *средства технологического оснащения*. Средства технологического оснащения подразделяют на оборудование и оснастку.

*Технологическое оборудование* — это средства технологического оснащения, в которых для выполнения определенной части технологического процесса размещаются материалы и заготовки, средства воздействия на них, а также технологическая оснастка [1]. Примерами технологического оборудования служат: литейные машины, прессы, станки, испытательные стенды, гальванические ванны, вакуумные камеры и т. д.

*Технологическая оснастка* дополняет оборудование для выполнения определенной части технологического процесса. В свою очередь, технологическая оснастка подразделяется на инструменты и приспособления. *Инструментом* является технологическая оснастка, предназначенная для воздействия на предмет труда с целью изменения его состояния. *Приспособление* же предназначено для установки или направления предмета труда или инструмента при выполнении технологической операции.

В зависимости от метода обработки функции инструмента могут выполнять резцы, сверла, фрезы, абразивный круг, штамп — при мехобработке; пучок электронов, электрический разряд — при электрофизической обработке; анодный растворитель — при электрохимической обработке. Конструктивно инструмент выполнен в первом случае — в виде твердого тела; во втором — в виде катода электронной пушки или магнитной линзы; в третьем — в виде электрода в среде диэлектрической жидкости или в среде электролита.

## 1.3. ПОНЯТИЕ О ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ МЕТОДЕ

В основе каждой технологической операции лежит технологический метод. В общем случае метод — это совокупность приемов или операций практического или теоретического освоения действительности, подчиненных решению конкретных задач.

ГОСТ 3.1109 — 82 [1] конкретизирует понятия метода применительно к технологии. *Технологический метод* — это совокупность правил, определяющих последовательность и содержание действий при выполнении формообразования, обработки или сборки, перемещения, включая технический контроль, испыта-

ния в технологическом процессе изготовления или ремонта и установленных безотносительно к наименованию, типоразмеру или исполнению изделия.

В соответствии с этим определением все технологические методы разделены на группы формообразования, обработки, сборки, контроля и испытаний (рис. 1.2).



Рис. 1.2. Классификация технологических методов

Группы формообразования делится на подгруппы методов: литье, формование, спекание и гальванопластика. *Литье* — это изготовление заготовки или изделия из жидкого материала заполнением им полости заданных размеров и формы с последующим затвердеванием. *Формование* основано на заполнении полости заданных форм и размеров порошковым или волокнистым материалом с последующим сжатием формовки. При *спекании* осуществляется нагрев и выдержка порошковой формовки при температуре ниже температуры плавления основного компонента с целью обеспечения заданных механических и физико-химических свойств. К *гальванопластике* относится формообразование заготовки или изделия из жидкого материала при помощи осаждения металла из раствора под действием электрического тока.

Технологические методы сборки основаны на образовании соединений составных частей изделия, причем соединение может быть как разъемным, так и неразъемным. Примерами методов образования неразъемных соединений являются методы клепки, склеивания, сварки и пайки.

Учитывая цель настоящего пособия, рассмотрим подробнее технологические методы обработки материалов.

#### 1.4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ И ИХ КЛАССИФИКАЦИЯ

*Обработка* — это действие, направленное на изменение свойств предмета труда при выполнении технологического процесса, причем к свойствам предмета труда относятся его разме-

ры, форма, твердость, шероховатость и другие физико-химические и механические свойства [1].

Для практического использования методов обработки материалов необходима их рациональная классификация, позволяющая, с одной стороны, объединить методы по их применимости к конкретным операциям одного технологического назначения, а с другой стороны, объединить методы по физико-химической природе явлений, происходящих в материалах. Первое направление целесообразно при проектировании маршрутного технологического процесса, так как в зависимости от назначения операции существует возможность выбора наиболее эффективного метода. Второе направление классификации технологических методов имеет преимущества на этапе разработки метода и позволяет с единых позиций анализировать явления, протекающие в материалах, и, следовательно, прогнозировать эксплуатационные свойства обрабатываемых деталей.

В основу классификации технологических методов по физико-химической природе явлений, происходящих в материале, положен вид энергии, вводимой в зону обработки. По этому признаку методы подразделяют на механические, термические, электрохимические, электрофизические, химические и комбинированные (рис. 1.3.).

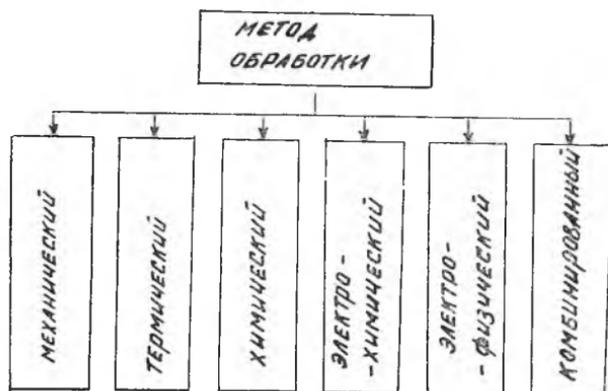


Рис. 1.3. Классификация методов обработки по виду энергии, вводимой в зону обработки

*Механическая обработка* — это обработка резанием и давлением.

*Обработка резанием* заключается в образовании новых поверхностей отделением поверхностных слоев материала с образованием стружки.

*Обработка давлением* заключается в пластическом деформировании или разделении материала, причем разделение материала происходит без образования стружки.

*Термическая обработка* направлена на изменение структуры и свойств материала заготовки вследствие тепловых воздействий.

При *химической обработке* происходит изменение формы, размеров и (или) свойств поверхности заготовки в результате применения химически активных для данного материала сред. Наложение на такую среду электрического тока приводит к новой группе методов, получивших название *электрохимических методов обработки*. Частным случаем электрохимической обработки является обработка, заключающаяся в изменении формы, размеров и (или) шероховатости поверхности заготовки вследствие растворения ее материала в электролите под действием электрического тока.

*Электрофизическая обработка* заключается в изменении формы, размеров и (или) шероховатости поверхности заготовки с применением электрических разрядов, магнитострикционного эффекта, электронного или оптического излучения, плазменной струи.

*Комбинированные методы* основаны на сочетании перечисленных методов, например: химико-термическая, электроконтактная, плазменно-механическая обработка и т. д. Надо отметить, что по сути электрофизическая и электрохимическая обработки являются комбинированными методами, что заключено уже в их названии. Комбинированные методы значительно повышают производительность и точность обработки, увеличивают стойкость инструмента по сравнению с отдельными составляющими методами. Помимо этого, в ряде случаев освоение комбинированных методов позволяет достигнуть новых технических эффектов, не существовавших в составляющих методах.

В зависимости от технологического назначения операции, выполняемой данным методом, методы обработки материалов можно разделить на группы, взяв в качестве критерия для такого подразделения понятие «припуск материала».

*Припуск* — это слой материала, удаляемый с поверхности заготовки в целях достижения заданных свойств обрабатываемой поверхности [1]. При обработке предмета труда с него может сниматься припуск, обработка может проводиться без снятия припуска или на поверхности при обработке может быть образован новый слой из инородного материала (рис. 1.4.).

Обработка, заключающаяся в образовании на заготовке по-

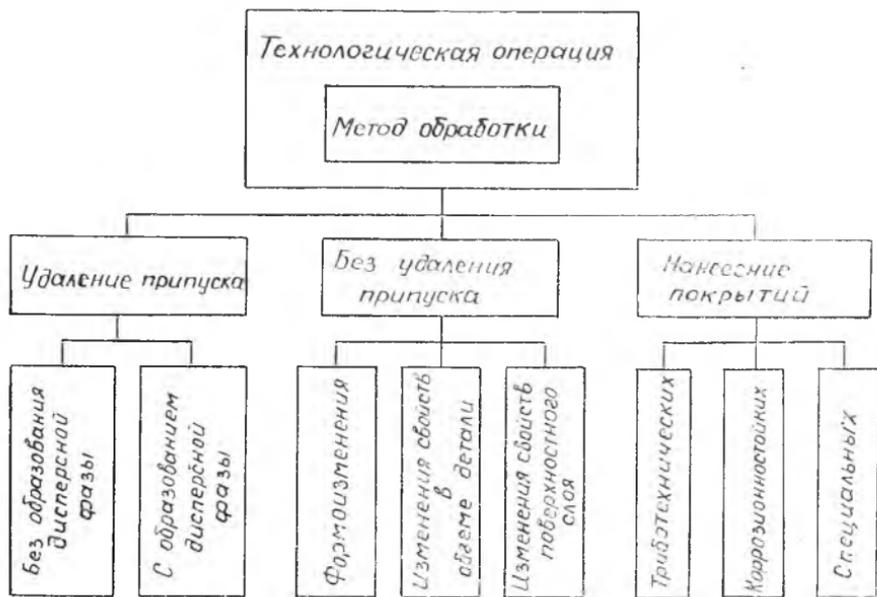


Рис. 14. Классификация методов обработки в зависимости от технологического назначения операции, выполняемой данным методом

верхностного слоя из инородного материала, называется *нанесением покрытий*.

Методы обработки материалов без снятия припуска разделяют на направленные на формоизменение заготовки и направленные на придание нужных свойств либо всему объему заготовки, либо только ее поверхностному слою. Основными современными методами, направленными на формоизменение заготовки без снятия припуска, являются методы пластического деформирования при обработке давлением. Придание нужных свойств параметрам в объеме заготовки осуществляется термической и электромагнитной обработкой, а придание нужных свойств только поверхностному слою может проводиться механическими, электрофизическими, химическими, электрохимическими, термическими и комбинированными методами.

Методы обработки, в результате которых снимается припуск материала, могут осуществляться как с образованием дисперсной фазы материала (в случае резания — стружки), так и без ее образования. В свою очередь, методы обработки, в результате которых снимается припуск с образованием дисперсной фазы материала, бывают черновыми и чистовыми. При *черновой об-*

работке снимается основная часть припуска, а при *чистовой* — достигаются заданные точность размеров и шероховатость поверхности. Снятие припуска может проводиться механическими, электрофизическими, химическими, электрохимическими, термическими и комбинированными методами.

Надо отметить, что методы обработки, в результате которых снимается припуск, часто называют *методами разделения полуфабриката и удаления излишнего материала* [4]. В этом случае также используют название обработки резанием [3]. Причем, термину «резание» придается значение, отличное от регламентируемого ГОСТом [1] — изготовление детали путем снятия с заготовки слоя материала в результате всех возможных видов воздействия. Под стружкой же понимают материал, удаленный с заготовки в любой фазе.

#### 1.5. ОБЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО МЕТОДА

Сущность технологических методов обработки устанавливается безотносительно к наименованию, типоразмеру или исполнению изделия. Однако результаты применения технологического метода зависят от конкретной реализации данного метода обработки в используемом оборудовании и оснастке. Совокупность средств технологического оснащения, предназначенных для выполнения конкретного метода обработки, получила название *обрабатывающей системы* или *технологической системы обработки* [3].

Обрабатывающая система создается для материального осуществления технологического метода в конкретной технологической операции и включает оборудование, приспособления, инструмент, технологическую среду, необходимые измерительные и регулирующие устройства. Часто из обрабатывающей системы выделяют ее механическую часть — станок, приспособление, инструмент и деталь, так называемую систему СПИД.

Как отмечалось (п. 1.1.), одним из этапов проектирования и разработки технологического процесса является разработка операционных технологических процессов, содержащих все необходимые сведения для осуществления каждой операции. При этом последовательность действий технолога выглядит следующим образом:

- выбирает последовательность операций обработки;
- для каждой операции выбирает технологический метод;
- проектирует последовательность выполнения переходов, включая схемы базирования и инструментальных наладок, а затем приступает к разработке эскизного проекта обрабатывающей системы.

Однако указание только вида энергии, вводимой в зону обработки, т. е. технологического метода, является недостаточным для создания эскизного проекта обрабатывающей системы, так как выбранный технологический метод может иметь различные способы подвода энергии, механизмы обработки, рабочие процессы и кинематические схемы.

*Способ подвода* энергии определяется геометрическими параметрами зоны, в которую вводится энергия, взаимным положением заготовки и рабочих поверхностей инструмента в пространстве и характером изменения этого положения во времени. Способ подвода энергии может быть контактным и бесконтактным, стационарным и нестационарным.

В *контактных методах* энергия передается через зону контакта инструмента с заготовкой. Основным недостатком такого метода является износ инструмента, приводящий к потере качества и точности обрабатываемой детали. В случаях же, когда обработка проводится с образованием стружки в контактных методах, необходимо предусматривать специальные схемы выведения стружки из зоны обработки.

В последние годы все чаще стали применяться в обработке *бесконтактные методы* с высококонцентрированными источниками энергии (плазменными, лазерными, электроионичными, магнитно-импульсными, ударными волнами и т. д.). Бесконтактные методы обработки имеют особенно большие преимущества в связи с развитием гибкого автоматизированного производства (ГАП).

Один и тот же вид энергии можно ввести в зону обработки различными способами. Например, электрическую энергию можно подвести контактным методом, бесконтактным или комбинированным. В первом случае (электроконтактная обработка) контакт осуществляется по микронеровностям поверхностей инструмента и заготовки. Во втором случае подвод электрической энергии может осуществляться через канал разряда (электроэрозийная обработка), пучком электронов (электроннолучевая обработка) или электромагнитной волной (магнитно-импульсная обработка).

Контакт инструмента с заготовкой характеризуется *формой контакта*, который может быть точечным, линейным, плоским или пространственным.

Способ подвода энергии бывает *стационарным*, когда обработка материала происходит при неизменных условиях, и *нестационарным* (прерывистый, вибрационный, импульсный и т. д.).

ем оказывает контактное трение, возникающее на поверхности соприкосновения детали с инструментом. Возникновение сил контактного трения не только изменяет схему напряженного состояния деформируемой детали и требует увеличения нагрузки в несколько раз, но и приводит к неоднородности структуры и изменению геометрии детали, а также к повышенному износу обрабатывающего инструмента. В этом же методе обработки из-за остаточной упругой деформации происходит отклонение геометрии детали от рассчитываемой, на основе учета только пластического деформирования — механизма обработки. Для расчета геометрии детали требуется проводить учет и дополнительного явления — пружинения детали.

Таким образом, на этапе выбора технологического метода обработки для выполнения конкретной технологической операции необходимо: рассмотреть вид энергии, вводимой в зону обработки; способ подвода этой энергии; кинематическую схему обработки; физико-химический механизм обработки; рабочий процесс обработки. Только после выбора и анализа технологического метода, а также создания обрабатывающей технологической системы, можно перейти к следующему этапу проектирования операционного процесса — назначению режимов обработки и расчет производительности и экономичности процесса.

Существующее в настоящее время большое количество технологических методов, сложность и многообразие протекающих при обработке физико-химических процессов привело к необходимости применения формализованных математических методов для описания таких систем. В основе такого описания лежат математические модели исследуемых явлений и процессов.

## *2. ОСНОВЫ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ*

### *2.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА*

Технологический процесс, технологическая операция, технологический метод, физико-химический механизм обработки или физико-химическое явление — примеры сложных систем. Основной задачей изучения сложных систем является создание математического способа их описания. Только после создания такого способа описания можно гарантировать предсказание поведения системы с нужной степенью точности и оптимизировать структуру системы в соответствии с заданными требованиями. С точки

зрения задач, стоящих перед технологией, эти цели можно конкретизировать следующим образом — разработать технологический процесс изготовления изделия с нужным качеством при минимальных затратах времени и материальных ресурсов.

Разработка теоретических методов описания сложных систем в соответствии с поставленными целями без привлечения общесистемного подхода к их анализу является практически неразрешимой задачей. Поэтому такие системы анализируют на основе *системного* подхода, в котором основным является понятие *большая система* (большая технологическая система, сложная система). Она включает совокупность происходящих технологических и физико-химических процессов, объектов обработки и средств для их реализации [5].

Анализ любой системы проводится на основе общетеоретического принципа, суть которого заключается в следующем. Если систему как единое целое можно разделить на части, то и всю систему можно сложить или восстановить из тех же частей. Указанное разделение можно проводить как материально, так и мысленно.

Применимость этого принципа зависит от двух условий:

1. Взаимодействие между частями должно отсутствовать или, по крайней мере, быть столь слабым, чтобы им можно было пренебречь для определенных целей исследования. Только в этих условиях части можно сначала отделить фактически, логически и математически, а затем соединить вновь.

2. Соотношения, описывающие поведение частей, должны быть линейны, так как только при этом условии соблюдается правило аддитивности.

Однако в реальных сложных системах пренебречь взаимодействием отдельных частей нельзя. Для изучения сложных нелинейных систем требуется вводить дополнительные ограничения.

Все системы обладают различным уровнем сложности, поэтому иерархию систем анализируют исходя из следующих правил:

1. Системы принадлежат к классам различных уровней (рангов) сложности.

2. Все законы, справедливые для системы низшего уровня, применимы также к любой системе высшего уровня.

3. Чем выше уровень, тем больше неизвестных элементов определяет работу конкретной системы.

Для иллюстрации понятия системы и принципа иерархического порядка систем рассмотрим, например, технологический процесс (рис. 2.1.). Технологический процесс в данном случае является сложной системой наивысшего ранга. Сложными сис-

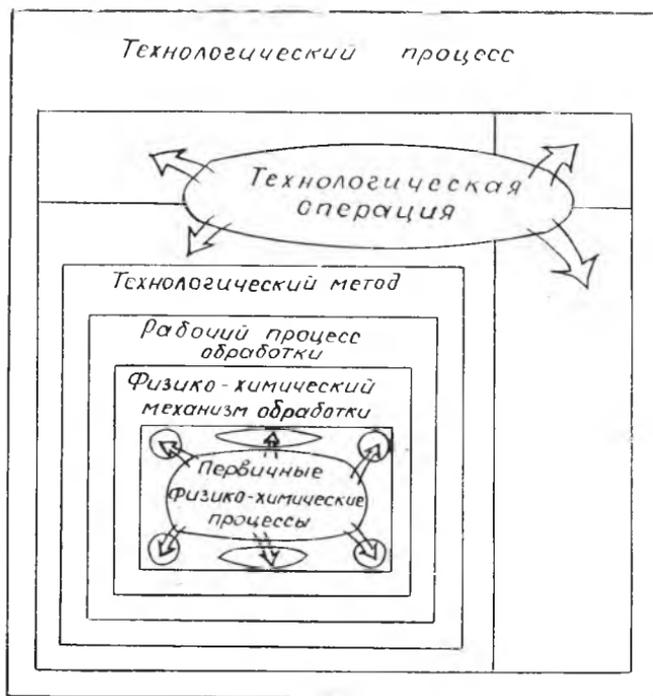


Рис. 2.1 Иерархическая структура технологического процесса как большой технологической системы

темами низшего ранга являются технологические операции (на рис. 2.1 их показано четыре), отделенные одна от другой «оболочками» - гипотетическими поверхностями, разделяющими рассматриваемые объекты. В основе технологической операции лежит технологический метод — система еще более низкого уровня. Далее, в порядке уменьшения уровня сложности систем, можно рассмотреть рабочий процесс обработки; физико-химический механизм обработки; первичные физико-химические процессы.

Каждая из приведенных систем может быть рассмотрена изолированно, но с учетом влияния воздействий на нее окружающих систем.

В результате выполнения технологического процесса или операции, воздействия рабочего или любого физико-химического процесса на деталь происходит преобразование параметров, характеризующих исходную заготовку, в параметры, характери-

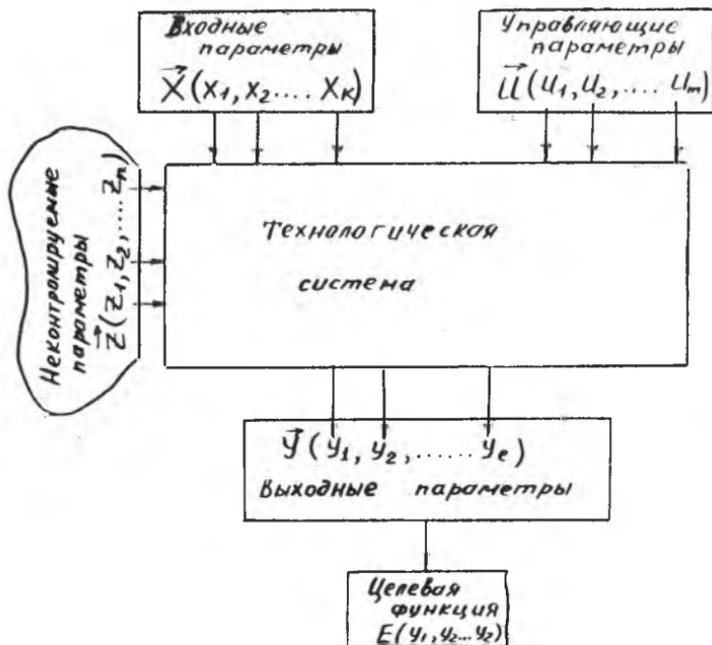


Рис. 2.2. Структурная схема технологической системы

зующие готовое изделие. Причем, преобразование этих параметров происходит под воздействием факторов, характеризующих саму систему. Всю совокупность этих параметров и факторов в зависимости от степени и характера их воздействия на технологическую систему, можно разделить на группы (рис. 2.2.).

1. Входные параметры  $x_i$ . К ним относятся те параметры, которые характеризуют исходный предмет обработки (физико-механические и химические свойства обрабатываемой заготовки, ее геометрические размеры, допуски на обработку и т. д.). Вся совокупность входных параметров  $x_i$  описывается вектором входных параметров  $\vec{x}$ .

2. Управляющие параметры  $u_i$ . Это все те основные параметры, которые характеризуют влияние системы на процессы, протекающие при обработке материалов (режимы обработки, параметры оборудования и технологической оснастки, допускаемые отклонения в процессе обработки). Управляющие параметры  $u_i$  описываются вектором управляющих параметров  $\vec{u}$ . Управляющие параметры могут быть регулируемые и нерегулируемые. Нерегулируемые управляющие параметры часто

также называют *параметрами состояния системы*. Разделение параметров на регулируемые и нерегулируемые определяется теми задачами, которые выполняет система. Например, в случае оптимизации режима обработки на конкретной обрабатывающей системе регулируемые будут режимы обработки, а параметры оборудования, технологической оснастки и технологической среды — нерегулируемыми. В случае, когда проектируется и оптимизируется операция обработки, все перечисленные параметры будут регулируемые.

3. Неконтролируемые (возмущающие) параметры  $z_i$ . Это те параметры, величины которых изменяются случайно с течением времени протекания процесса (вибрации, колебания твердости, пульсации тока и т. д.).

4. Выходные параметры  $y_i$ . К ним относятся две группы параметров, определяющих технический уровень изготовленных деталей и характеризующих технико-экономический уровень процесса.

Если технологическая система (рис. 2.2) охватывает слишком большой комплекс процессов, то ее обычно по определенному признаку разбивают на ряд подсистем, взаимодействующих друг с другом через свои границы. Если получающиеся таким образом подсистемы все еще сложны, то каждую из них расчленяют (с сохранением связей) на конечное число подсистем более низкого иерархического уровня. Процедуру расчленения подсистем продолжают до получения таких подсистем (элементов), которые в условиях рассматриваемой задачи являются простыми и удобными для непосредственного математического описания. Поэтому в общем случае сложная система является многоуровневой конструкцией из взаимодействующих элементов, объединенных в подсистемы различных уровней (рис. 2.3.). Все эти подсистемы условно обозначают прямоугольниками, а их взаимодействия — стрелками. Вид взаимодействия и вид подсистемы представляется на схеме условными обозначениями. Представление сложной системы в виде многоуровневой конструкции из взаимодействующих элементов называют *структуризацией* системы, а ее графическое изображение — *структурной схемой*.

На рис. 2.3 приведена в качестве примера структурная схема условной технологической системы. Большая технологическая система  $S$  состоит из двух подсистем более низкого уровня  $S_1$  и  $S_2$ . В свою очередь, система  $S_1$  состоит из трех подсистем  $S_{11}$ ,  $S_{12}$  и  $S_{13}$  различного уровня. Системы  $S_{11}$  и  $S_{12}$  действуют параллельно, причем их выходные параметры являются входными параметрами системы  $S_{13}$ . Если отдельные подсистемы в опре-

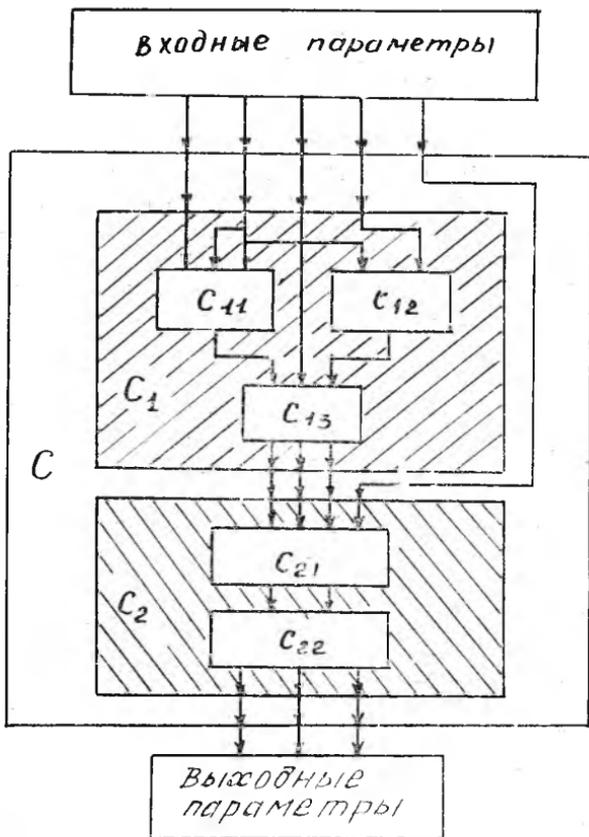


Рис. 2.3. Структурная схема многоуровневой технологической системы

деленных условиях относительно слабо связаны, т. е. одна система практически не влияет на другую, то с определенной степенью идеализации можно рассматривать подсистемы независимо (например  $C_{11}$  и  $C_{12}$ ).

Формализация технологической системы осуществляется путем разработки содержательного описания процесса, построения его формализованной (структурной) схемы и создания математической модели процесса [5].

Содержательное описание процесса представляет собой словесное изложение закономерностей, характерных для исследуемого процесса, и постановку прикладной задачи. Кроме этого,

В содержательное описание включаются исходные данные, необходимые для исследования. Содержательное описание составляется, как правило, специалистами соответствующей прикладной области техники, практически без непосредственного участия математиков, поэтому постановка прикладной задачи может и не иметь строгой математической формулировки.

*Формализованная (структурная) схема процесса* является промежуточным звеном между содержательным описанием и математической моделью. Она разрабатывается не во всех случаях, а лишь тогда, когда из-за сложности исследуемого процесса или трудностей формализации некоторых его элементов непосредственный переход от содержательного описания к математической модели оказывается невозможным или нецелесообразным. Формализованная схема полностью подводит итог изучению и экспериментальному исследованию процесса. Все сведения о процессе, которые мы имеем возможность почерпнуть из эксперимента или технической документации, должны быть использованы на этапе построения формализованной схемы.

Дальнейшее преобразование формализованной схемы в математическую модель выполняется математическими методами без притока дополнительной информации о процессе. Для выполнения этого преобразования необходимо записать в аналитическом виде все соотношения, выразить логические условия в виде системы неравенств, а также придать аналитическую форму по возможности всем другим сведениям, содержащимся в формализованной схеме.

Математическое моделирование состоит в том, что непосредственное исследование процесса заменяется исследованием его модели, представляющей собой совокупность зависимостей (аналитических, графических или табличных) выходных параметров системы от входных управляющих и возмущающих параметров, а также от параметров состояния системы.

Для каждого реального процесса можно построить сколько угодно математических моделей, которые будут по-разному соответствовать целям, поставленным при математическом моделировании. При выборе конкретного вида модели невозможно указать какие-либо формальные правила. Однако стараются, чтобы модель удовлетворяла следующим требованиям: была простой, целенаправленной, надежной в смысле гарантии от абсурдных результатов, удобной в управлении, полной с точки зрения возможностей решения главных задач, адаптивной, допускающей постепенное усложнение.

В качестве главного из требований можно выделить *целенаправленность*. Всякая модель должна разрабатываться только

для каких-то определенных целей, отражать адекватно только некоторые стороны процесса. Нельзя получить универсальную модель процесса на все случаи жизни — такой моделью может служить только сам процесс.

В случае, когда сложная система подвергается структуризации на элементы, для каждого из элементов строится своя математическая модель. Математическая модель сложной системы состоит из математических моделей ее элементов и математических моделей взаимодействия между элементами.

## 2.2. ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ И ЭТАПЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

С методологической точки зрения можно выделить два основных подхода к моделированию сложных систем — статистический и детерминированный [5, 6].

*Статистический подход*, так называемый метод «черного ящика», связан с отказом от попыток анализировать структуру системы, физику процесса [7]. Он применяется для систем, строение которых изучено недостаточно полно. Сущность этих методов заключается в том, что вся область используемых значений входных параметров системы обследуется экспериментально и на основе данных эксперимента устанавливаются математические соотношения между входными и выходными параметрами. При этом используются методы дисперсного регрессионного и корреляционного анализ, а также методы планирования эксперимента.

Обработка результатов эксперимента при помощи дисперсного анализа позволяет для сложного (многофакторного) процесса определить уровень влияния изучаемого технологического фактора на выходные параметры. Однако дисперсный анализ не позволяет определить ни степень этого влияния, ни его характер. Для решения этих вопросов можно использовать методы корреляционного и регрессионного анализа.

Регрессионный анализ применяется, когда трудно или невозможно расшифровать механизм тех или иных явлений в ходе процесса. В этом случае зависимость выходных параметров от входных представляют в виде какой-нибудь функции (обычно полинома):

$$E(y_1, y_2, \dots, y_n) = \sum_{i=1}^k a_i x_i + \sum_{i=1}^k b_i x_i^2,$$

где  $E$  — обобщенный выходной параметр (целевая функция);  $x_i$  и  $y_i$  — входные и выходные параметры;  $a_i$  и  $b_i$  — коэффициенты регрессии.

Применение методов регрессионного анализа для обработки эксперимента позволяет определить коэффициенты уравнения регрессии. Этот анализ применим лишь при условии, что исследуемые факторы (параметры) независимы и не являются случайными величинами. Нахождение же связи между случайными или взаимосвязанными величинами является задачей корреляционного анализа.

Корреляционный анализ позволяет выявить зависимость или независимость параметров и применяется, как правило, на первом этапе моделирования, когда стоит задача выявления независимых параметров, наиболее влияющих на выходные параметры процесса.

Методы планирования эксперимента широко применяются в экспериментальных исследованиях, если имеется возможность активно влиять на условия опыта, изменять входные параметры. При этом решается задача, как при минимально возможном числе опытов получить наибольшее количество информации об изучаемом процессе для описания его с наибольшей точностью.

В качестве главных достоинств методов «черного ящика» можно выделить простоту, разработанность и гарантированную результативность. Наряду с этим методы «черного ящика» обладают рядом недостатков, в основном связанных с малой информативностью получаемых моделей и ограниченностью области, подвергнутой экспериментальному исследованию. Получаемые модели не вскрывают истинных причин явлений. Такие математические модели невозможно использовать в САПР ТП, поскольку характеристики оборудования не будут входить в число входных параметров модели (при проведении эксперимента они не варьируются).

Вторым основным подходом к моделированию является *детерминированный*, при котором модель строят исходя из внутренней структуры, знания природы физико-химических и механических явлений, протекающих в системе. В этом случае входные и выходные параметры модели связываются друг с другом на основании известных законов физики, химии, теории массового обслуживания и т. д. Такой подход к моделированию обладает рядом преимуществ. Полученное математическое описание процесса имеет высокую информативность, широкую область применения, универсальность. К недостаткам детерминированного подхода следует отнести сложность аппарата моделирования и недостаточную изученность ряда физико-химических явлений.

В чистом виде оба подхода допускают эффективное их применение только по отношению к небольшому классу задач.

В большинстве случаев целесообразно применять различные комбинированные подходы, которые позволяют соединить преимущества обоих методов.

Применение комбинированного подхода к моделированию сложных систем можно описать следующим алгоритмом, включающим в себя ряд этапов.

**Постановка задачи моделирования.** На этом этапе формулируются цели, для которых создается модель и исходя из которых проводится содержательное описание сложной системы; определяются входные и выходные параметры и необходимая точность их определения. В качестве выходных параметров при создании модели технологической системы целесообразно выбирать такие величины, которые обеспечивали бы удобство определения технико-экономических показателей и давали бы возможность получить достаточно простую математическую модель. Выбор входных параметров определяется системой выходных параметров и требуемой точностью расчета. Этот этап работ играет исключительно важную роль при моделировании, поскольку ошибки могут привести либо к чрезмерному увеличению входных параметров, либо к тому, что полученная модель будет неадекватна реальному процессу.

Надо отметить, что невозможно указать какие-либо формальные правила для выбора параметров. Нередко используют методы экспертных оценок. При выборе параметров процесса часто может привести к успеху применение методов теории подобия и размерностей.

**Структуризация сложной системы.** Построение математической модели сложной системы в целом часто оказывается практически невозможным из-за сложности происходящих в ней процессов. В этом случае сложную систему расчленяют на конечное число подсистем. В общем случае сложная система является многоуровневой конструкцией из взаимодействующих подсистем различных уровней. Соответственно математическая модель сложной системы включает в себя математические модели подсистем и математическую модель взаимодействия между подсистемами. После этого анализируется каждая из подсистем в отдельности. В зависимости от структуры и сложности подсистемы может быть три варианта ее дальнейшего исследования.

Если подсистема позволяет описать ее функционирование законами физики, химии и т. д., то процесс структуризации для этой подсистемы заканчивается и можно переходить к построению математической модели.

Если подсистема позволяет провести дальнейшее разбиение

на подсистемы более низкого уровня, то после этого опять выясняются функциональные связи между получившимися подсистемами, и каждая из подсистем анализируется отдельно по излагаемой методике.

Если нельзя применить предыдущие приемы или если современный уровень знаний не даст возможности применить детерминированный подход, то такая подсистема рассматривается как «черный ящик», и процесс структуризации для данной подсистемы прекращается. Далее эта подсистема должна исследоваться экспериментальными методами.

Как правило, процесс разбиения на подсистемы можно осуществлять по-разному, избирая в качестве основы для такого разбиения различные принципы. Никаких общих рекомендаций по выбору принципа разбиения на подсистемы без конкретизации самой системы дать нельзя. От того, насколько удачно будет проведена структуризация, существенно зависит сложность связи между подсистемами. Обычно в качестве функции связи двух подсистем выступают параметры, которые для одной подсистемы являются входными, а для другой — выходными (рис. 2.3). Сложность связи двух подсистем также зависит от количества обратных связей.

Конечным результатом этого этапа является создание общей структуры модели, которая является основой для математической модели.

Математическое моделирование подсистем. Содержание этого этапа предопределено этапом структуризации и может как содержать, так и не содержать этап формализации подсистемы.

Как уже отмечалось, подсистемы двух типов (детерминированные и типа «черный ящик») анализируются по-разному. Для подсистем типа «черный ящик» проводятся эксперименты и строится уравнение регрессии. Для детерминированных подсистем записывается система уравнений и, если надо, проводится экспериментальное исследование необходимых коэффициентов уравнения. После этого разрабатывается аналитический метод или программное обеспечение для решения полученной системы уравнений относительно выходных параметров подсистемы.

Этот этап моделирования заканчивается объединением моделей подсистем в общую модель на основании модели взаимодействия между ними.

Проверка адекватности модели. После построения модели следует проверить, способна ли она удовлетворять целям, для которых строилась. Обычно адекватность модели проверяют по ее способности предсказать с нужной вероят-

ностью и точностью значения выходных параметров. Для этого разработан стандартный математический аппарат, позволяющий использовать результаты уже проведенных экспериментов. В других случаях ответ об адекватности можно получить только в результате специальных экспериментов и в ходе практического использования модели.

Конечно, приведенная последовательность этапов построения математических моделей является условной. На практике это сложный итерационный процесс, допускающий возвраты к предыдущим этапам моделирования и их повторное проведение. Тем не менее указанные этапы в той или иной степени должны присутствовать при построении любой модели.

### *2.3. ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ*

С ростом сложности технологических процессов и в связи с развитием автоматизированных систем управления (АСУ) математические модели все больше и больше используются при управлении и проектировании технологических процессов и операций. Рассмотрим некоторые распространенные схемы применения математических моделей в технологии.

**Замкнутая АСУ ТП.** В замкнутых системах управления цель математической модели — помочь выбрать управляющее воздействие при появлении различия между реальным значением выходного параметра и требуемым. Поэтому перед математической моделью в этом случае может быть поставлена либо простая задача — как изменяется знак производной выходного параметра по входному, либо сложная — на сколько надо изменить входной параметр, чтобы выходной принял требуемое значение.

**Разомкнутые АСУ ТП.** В разомкнутых системах управления при помощи модели рассчитываются изменения входных параметров, с тем чтобы выходные параметры изменялись в соответствии с технологической задачей.

**САПР технологических режимов.** Рассматривает вопросы оптимального выбора технологических режимов, обеспечивающих снижение временных, энергетических или материальных затрат, повышение качества и надежности изделий.

**САПР технологических процессов.** В ряде случаев, прежде чем запустить изделие в производство, бывает экономически выгоднее спроектировать технологическую оснастку, позволяющую более эффективно производить данное изделие.

Поэтому в САПР ТП средства технологического оснащения перестают рассматриваться как строго определенные. Изменению могут подвергаться как установки, так и их отдельные части.

Проектирование новых технологических процессов. В последние годы перед производством встает задача использования новых физических и химических явлений. Поиск и разработку технологий на основе новых технологических методов также целесообразно автоматизировать. В основе автоматизации проектирования лежит вычислительный эксперимент над математической моделью явления, позволяющий проанализировать возможность применения в технологии того или иного явления, не прибегая к дорогостоящим натурным экспериментам.

#### 2.4. СТРУКТУРИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

Рассмотрим применение системного подхода к исследованию технологической системы на примере технологической системы обработки материалов. В технологии машиностроения такое исследование проводится в общем случае с целью проектирования оптимального операционного технологического процесса. Однако, учитывая цели и задачи курса «Физико-химические основы технологии обработки материалов», остановимся на решении более узкой задачи — методом системного анализа выделим основные и дополнительные физико-химические процессы, протекающие в зоне обработки материала, и установим их влияние на рабочий процесс технологического метода.

Технологическая схема обработки, представляющая собой конкретную реализацию данного метода, предназначена для материального осуществления технологической операции. Следовательно, технологическая система, рассматриваемая в рамках системного подхода как *сложная система*, определяет взаимосвязь между входными и выходными параметрами.

Входные параметры системы задаются конструктором и технологом (рис. 2.4.). Обычно конструктором задается деталь, ее материал  $M$  и размеры  $P$ . Технолог выбирает метод обработки, обрабатывающую систему — оборудование Обр, технологическую оснастку  $T_{осн}$ , технологическую среду  $T_{ср}$  и допуски на обработку  $\Delta$ .

Выходные параметры формируются в результате выполнения рабочего процесса и определяют количественные показатели результатов обработки: точность, качество поверхности, стойкость инструмента, производительность, экономичность.

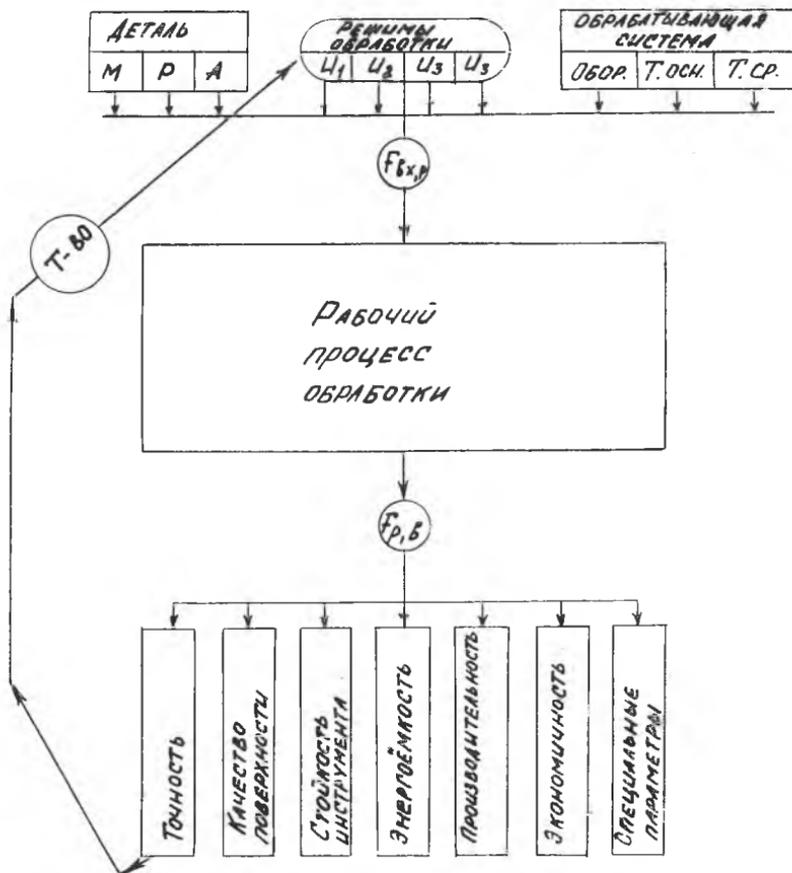


Рис. 2.4. Структурная схема технологической системы обработки материалов

В последние годы в число выходных параметров все чаще вводятся энергетические показатели обработки. Так, для черновой обработки вводится энергия  $\epsilon_в$ , затраченная на снятие единицы объема удаляемого слоя, а для чистовой обработки—энергия  $\epsilon_с$ , затраченная на образование единицы площади, обработанной с нужным качеством поверхности. В связи с освоением ГАП решающее значение приобретает форма и размеры продуктов разрушения, образующихся в результате обработки и подлежащих обязательному удалению из зоны обработки, а также износ обрабатывающего инструмента.

Формирование выходных параметров происходит в результате воздействия регулируемых параметров режимов обработки и неконтролируемых (возмущающих) параметров, имеющих статистическую природу. Таким образом, технологическую систему обработки можно представить в виде структурной схемы, приведенной на рис. 2.4. Структурная схема построена из подсистем технологической системы в следующей последовательности: входные параметры — рабочий процесс обработки — выходные параметры. На схеме представлены стрелками связи в технологической системе:  $F_{вх, р}$  характеризуют влияние входных параметров на рабочий процесс обработки;  $F_{рв}$  характеризуют влияние рабочего процесса на выходные параметры. На основе связей  $F_{вх, р}$  и  $F_{рв}$  устанавливается связь  $F_{вх, в}$  между входными и выходными параметрами процесса.

Структурная схема может быть представлена как разомкнутая система автоматизированного управления (нет обратной связи выходные параметры — входные параметры) или как замкнутая АСУ. На рис. 2.4 структурная схема является замкнутой. Обратная связь осуществляется путем корректировки режима обработки (Р.о.) в зависимости от точности Т изготовления детали.

Представленная в таком виде структурная схема технологической системы обладает большей общностью — она применима к самым различным технологическим методам обработки. Дальнейшее детальное изучение технологической системы требует проведения конкретизации рабочего процесса, т. е. рассмотрения вида энергии, вводимой в зону обработки; способа подвода энергии; кинематической схемы обработки; физико-химического механизма.

### **3. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ**

#### **3.1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О МЕТОДАХ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ ДАВЛЕНИЕМ**

Механическая обработка осуществляется резанием и давлением. Она применяется для разделения материала и снятия припуска с заготовки; формоизменения заготовки; придания нужных свойств поверхности; подготовки поверхности детали под напыление.

В производстве многих типов машин удельная трудоемкость механической обработки составляет 40...80%.

Механическая обработка давлением заключается в пластическом деформировании или разделении материала. Пластическое деформирование, происходящее без разделения заготовки, бывает холодное и горячее. Эти процессы подразделяются на листовую и объемную штамповку, а также на поверхностное пластическое деформирование (ППД). Основные сведения об обработке материалов давлением приведены в табл. 3.1.

Обработка давлением является одним из наиболее прогрессивных методов изготовления деталей. Высокая производительность труда, низкая себестоимость изделий, изготавливаемых большими партиями, и высокий коэффициент использования материала способствуют широкому применению этих процессов в различных отраслях машиностроения.

Пластическое деформирование заготовки, происходящее без ее разделения, приводит к формоизменению заготовки и перераспределению материала в ее объеме. В случае же разделения материала заготовки происходит также ее механическое разрушение.

В металлах процесс пластической деформации в основном осуществляется путем скольжения тонких слоев монокристалла относительно друг друга. Скольжение охватывает ряд плоскостей или тончайших слоев (полосы скольжения), в промежутках между которыми элементы пластической деформации отсутствуют [8]. Многочисленными исследованиями установлено, что сдвигающее (касательное) напряжение, необходимое для начала пластической деформации скольжения для данного металла, при данной температуре и скорости деформации есть величина постоянная, не зависящая от ориентировки плоскостей скольжения относительно действующих на тело сил.

Процесс обработки давлением представляет собой сложную систему взаимосвязанных физико-химических явлений, оказывающих существенное влияние на основной механизм обработки. Выходные параметры этого технологического метода зависят в основном от геометрических параметров обрабатываемого инструмента и заготовки, свойств материала, развиваемых удельных усилий, скоростей деформирования и деформации, процессов контактного трения между обрабатываемой поверхностью и поверхностью инструмента.

Обработка давлением может осуществляться за счет использования механической энергии перемещающихся жесткого пуансона, эластической среды, ударной волны воздуха или жидкости, а также за счет перемещения самой заготовки. Сообщение ки-

Основные характеристики механического метода обработки

Таблица 3.1

Подгруппа	Вид обработки	Технологическая среда	Основной физико-химический механизм обработки	Типичные технологические операции
Резанием	Лезвийная	Воздух, СОЖ	Пластическое деформирование	Точение, сверление, фрезерование, резьбонарезание
	Абразивная	То же	Разрушение	Шлифование, полирование, притирка
Давлением	Ультразвуковая	Суспензия	Хрупкое разрушение	Прошивка, шлифование
	Разделение заготовки	Воздух	Пластическое деформирование и разрушение	Резка ножницами и штампами, прошивание, вырубка, пробивка
	Формоизменительная	Воздух, специальная среда	Пластическое деформирование	Штамповка, ковка, осадка, прокатка
Поверхностное пластическое деформирование	заготовочная листовая	То же	То же	Гибка, вытяжка, формовка, отбортовка, обжим
	штамповочная	Воздух, жидкость	То же	Виброударное упрочнение, обкатывание, обжатие кромок

нетической энергии этим средам может происходить в результате взрыва высоковольтного разряда, за счет энергии импульсного электромагнитного поля (магнитно-импульсная обработка), а также с помощью механических жестких и гидравлических устройств.

### 3.2. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О МЕТОДАХ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ РЕЗАНИЕМ

Механические методы обработки резанием подразделяются на лезвийную, абразивную и ультразвуковую обработку (см. табл. 3.1). Некоторое представление об объеме работ по резанию в масштабе нашей страны дает следующая цифра — в стружку переводится около 8 млн. тонн при общей массе заготовок (прокат и поковки) более 20 млн. тонн, т. е. около 30% первоначальной массы заготовок.

Механическая лезвийная обработка (МЛО) лежит в основе следующих технологических операций: точение, отрезка, распиловка, фрезерование, сверление, зенкерование, развертывание, парезание резьб и т. д.

Процесс лезвийной обработки представляет собой внедрение режущего клина инструмента в материал обрабатываемой детали (рис. 3.1). Различают свободное и несвободное, прямоуголь-

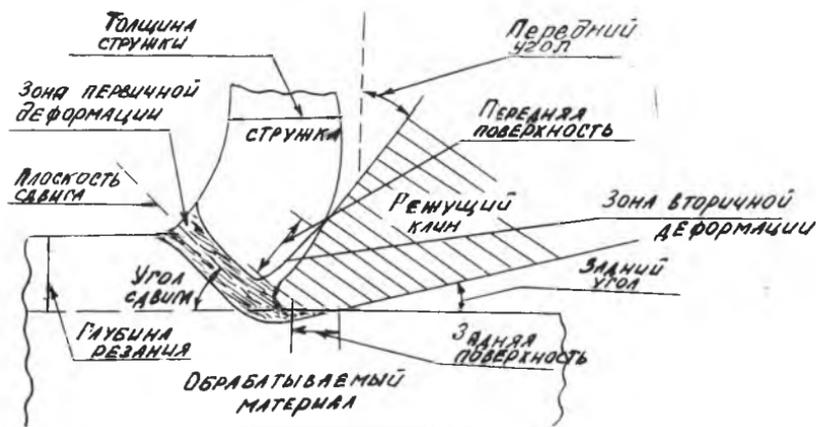


Рис. 3.1. Схема зоны резания

ное и косоугольное резание. Зона резания в сечении, перпендикулярном режущей кромке, изображена на рис. 3.1.

Под действием силы резания в обрабатываемом материале возникает поле напряжений, которое приводит к упругому и

пластическому деформированию, а затем к разрушению материала. Механическая энергия, вводимая в зону обработки, расходуется на пластическое деформирование, разрыв межзатомных связей, отделение слоя материала в виде стружки, нагрев детали и инструмента, а также на образование остаточного пластически деформированного слоя на некоторой глубине под обработанной поверхностью.

Преобразование частиц поверхностного слоя детали в стружку происходит тогда, когда эти частицы пересекают переходную пластически деформируемую область, называемую *зоной первичной деформации*. Свежеобразованная поверхность стружки скользит по передней поверхности режущего клина и подвергается при этом значительному нормальному давлению, достаточному, чтобы вызвать дополнительную пластическую деформацию. Зона такой деформации называется *зоной вторичной деформации*. Эта область является важной не только потому, что в ней рассеивается энергия, но также и потому, что она влияет на угол наклона первичной зоны и угол сдвига, где потребляется большая часть энергии резания.

Взаимодействие вновь образующихся при резании поверхностей стружки и обрабатываемой детали с изнашивающимися, а поэтому также постоянно обновляющимися поверхностями на передней и задней гранях инструмента, является сложным и многосторонним. Существенное влияние на качество обработанных деталей и на технико-экономические показатели технологической операции оказывают механические, теплофизические и физико-химические процессы, протекающие в зоне резания на поверхностях контактного взаимодействия.

Таким образом, основным физико-химическим механизмом, в результате которого происходит резание с образованием стружки, является механическое разрушение с предварительным пластическим деформированием. Вместе с тем, наряду с основным механизмом обработки процесс резания сопровождается целым комплексом взаимосвязанных физико-химических и механических явлений, оказывающих существенное влияние на рабочий процесс обработки.

Механическая абразивная обработка используется в основном для чистовой обработки деталей. Типичными технологическими операциями, основанными на абразивной обработке, являются шлифование, полирование, хонингование, суперфиниш и т. д.

В основе физико-химического механизма абразивной обработки лежит микрорезание поверхности детали абразивными частицами. Снятие припуска поверхности детали происходит

в результате механического разрушения поверхностного слоя материала как с предварительным пластическим деформированием, так и без него. Таким образом, физическая природа лезвийной и абразивной обработки близки друг к другу, поэтому абразивная обработка характеризуется тем же комплексом явлений, которые протекают при лезвийной обработке. Однако абразивная обработка очень часто является окончательным этапом изготовления детали, поэтому к ней предъявляются дополнительные и высокие требования по обеспечению качества поверхностного слоя. Качество поверхностного слоя формируется в результате взаимодействия детали с абразивом и технологической средой в условиях воздействия интенсивных температурных и силовых факторов. Особенно большое влияние на обработанную поверхность оказывают тепловые явления, протекающие в зоне обработки.

При шлифовании в зоне контакта круга с деталью возникают высокие температуры, которые могут превышать критические значения для шлифуемых материалов. Такая температура сохраняется доли секунд, так как подавляющая часть возникшей теплоты отводится нижележащим слоям холодного металла. Однако несмотря на кратковременность нагрева, в материале появляются структурные изменения (прижоги). Кроме того, на поверхности детали после шлифования в результате действия остаточных и температурных напряжений, возникающих вследствие неоднородного нагрева и неоднородной пластической деформации в разных зонах поверхностного слоя, часто наблюдаются трещины.

Ультразвуковая механическая обработка основана на выкрашивании твердых и хрупких материалов при импульсном вдавливании в них частиц абразива, колеблющихся под действием акустических волн.

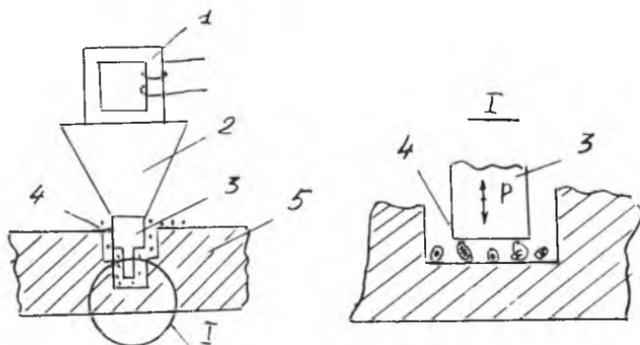


Рис. 3.2. Схема размерной ультразвуковой обработки

Сущность размерной ультразвуковой обработки заключается в следующем (рис. 3.2). Ультразвуковой инструмент 3 соединен с концентратором 2, припаянным к ультразвуковому преобразователю 1. Инструмент периодически ударяет по зернам абразивной суспензии 4, заполняющей зазор между инструментом и обрабатываемой заготовкой 5. Зерна скалывают небольшие частицы материала обрабатываемой заготовки. Инструмент имеет продольную подачу и прижимается к заготовке с усилием  $P$ . Продукты обработки выводятся из-под торца инструмента вместе с суспензией, в которой подаются абразивные частицы. Сообщая инструменту и заготовке различные виды подач и меняя профиль сечения инструмента, можно прошивать глухие и сквозные отверстия, обрабатывать плоскости, углубления, пазы, разрезать заготовки больших размеров, обрабатывать криволинейные и кольцевые пазы по копиру, производить шлифование и полирование и т. д. Ультразвуковую обработку используют при обработке очень твердых и хрупких материалов — бронестекла, керамики, твердых сплавов и т. д.

Ультразвуковой метод находит в последние годы широкое применение также для интенсификации различных технологических процессов — механической лезвийной и абразивной обработки, сварки, формовки, очистки поверхностей от загрязнений и других. В основе такой интенсификации лежат следующие процессы: знакопеременные напряжения ускоряют движение дислокаций и их образование, обеспечивая возникновение пластической деформации при более низких напряжениях; циклическое перемещение контактных поверхностей вызывает периодический поворот векторов сил трения, значительно облегчая перемещение двух поверхностей друг относительно друга; ультразвуковые колебания контактных поверхностей приводят к нагреву микровыступов. Так например, исследования показали, что ультразвуковые колебания, налагаемые на режущий клин в направлении вектора  $\vec{v}$  (рис. 3.3), оказывают большое влияние на процесс формирования стружки, а следовательно и на качество поверхности и производительность процесса МЛО. При обычных условиях обработки сплава ЭИ 437Б стружка имеет непрерывный вид, а наложение ультразвуковых колебаний с частотой  $f = 20$  кГц и амплитудой  $A = 3$  мкм приводит к тому, что стружка трансформируется в элементобразную. Причем это превращение связано с появлением хорошо видимой опережающей трещины (см. рис. 3.3). Возникновение опережающей трещины в условиях наложения ультразвуковых колебаний связано с изменением направления силы трения на передней поверхности, что, в свою очередь, оказывает влияние на положение

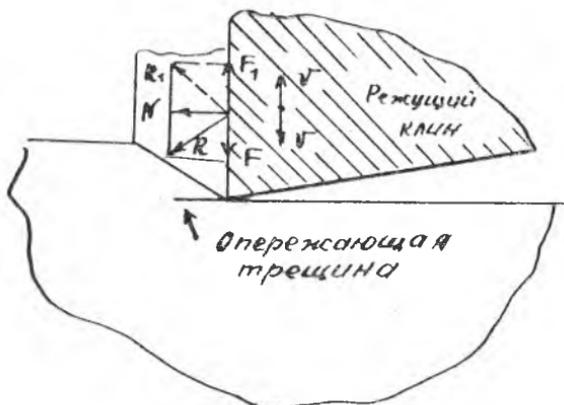


Рис. 3.3. Схема влияния ультразвуковых колебаний на процесс МЛО

ние равнодействующей. Если до наложения колебаний сила трения имела направление  $\bar{F}$ , а равнодействующая  $\bar{R}$ , то после наложения колебаний сила трения изменяется от положения  $\bar{F}$  до  $\bar{F}_1$ , а равнодействующая изменяется от положения  $\bar{R}$  до  $\bar{R}_1$  с частотой 20 кГц. В момент, когда равнодействующая занимает положение  $\bar{R}_1$ , у режущей кромки возникают значительные растягивающие напряжения, которые приводят к появлению микротрещины, облегчающей условия резания.

### 3.3. СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К АНАЛИЗУ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО МЕТОДА МЕХАНИЧЕСКОЙ ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКИ

Рассмотрение явлений, возникающих при механической обработке (п. 3.2), показало, что физико-химический механизм обработки, определяющий взаимосвязь между входными и выходными параметрами процесса, представляет собой сложный комплекс взаимосвязанных физических и химических процессов. Разработать математическую модель такого механизма без привлечения методов системного анализа является практически невозможной задачей. Рассмотрим системный подход к анализу технологического метода механической обработки на примере обработки резанием лезвийным инструментом. В этом случае энергия, вводимая в зону обработки, будет механической, а способ ее подвода — контактным.

Структуризацию механизма обработки можно провести различными способами. Обычно для технологических методов ис-

пользуют два подхода — либо анализ сложной системы, либо синтез простых систем. В первом случае из механизма обработки выделяются комплексные процессы, определяющие механизм резания, качество и точность изготовления детали. К ним прежде всего относят: механику стружкообразования, механику и физическую химию формирования поверхности и поверхностного слоя, кинетику изнашивания и разрушения обрабатываемого инструмента. Далее, путем постепенного расчленения комплексного явления, переходят к первичным физико-химическим процессам, либо выделяют структурные элементы типа «черный ящик», которые не подвергаются дальнейшей структуризации. Во втором случае сначала рассматривают все первичные физико-химические процессы и на основе их синтеза определяют доминирующие из них, а также выбирают комплексные процессы, определяющие взаимосвязь входных и выходных параметров системы.

Однако наиболее эффективным направлением является сочетание этих двух подходов — синтез первичных физико-химических процессов и анализ комплексных явлений.

Любой из рассмотренных вариантов изучения механизма обработки основывается на изучении первичных физико-химических процессов, протекающих в зоне обработки. Какие же первичные процессы надо рассматривать, чтобы изучить механизм обработки лезвийным инструментом?

Чтобы получить деталь заданной формы и размеров, надо знать траекторию перемещения инструмента относительно детали. Построение такой траектории основывается на изучении *кинематических явлений* (п. 2.4). При этом систему СПИД принимают абсолютно жесткой и не зависящей от всех видов физико-химических воздействий, протекающих в зоне обработки. Однако из-за возникающих динамических и статических нагрузок на инструмент поверхность детали, полученная в результате рассмотрения только кинематических явлений, в общем случае может не совпадать с той поверхностью, которую надо получить. Кроме того, явления, протекающие в зоне обработки, определяют не только точность изготовления детали, но и качество поверхностного слоя. Следовательно, возникает необходимость рассмотрения механики процесса резания.

*Механика процесса резания* изучает условия механического взаимодействия рабочих граней инструмента с обрабатываемым материалом. Изучение основывается на определении закономерностей упругих и пластических деформаций, протекающих в материале заготовки, а также закономерностей разрушения материала с учетом явлений трения на контактных поверхностях.

Полученные закономерности позволяют построить схему стружкообразования, найти действующие напряжения, величины деформаций, силы и работу резания. Однако при взаимодействии граней инструмента с поверхностью детали наблюдаются не только механические, но и тепловые явления, оказывающие влияние на механику процесса резания и качество получаемой детали. Поэтому следующим этапом является изучение теплофизики процесса резания.

*Теплофизика процесса резания* изучает закономерности превращения механической энергии в тепловую и закономерности распространения тепла в детали и инструменте. В результате изучения теплофизических явлений определяют распределение температуры в системе. Например, даже при охлаждении детали с помощью СОЖ в зоне резания температуры достигают 800... 1100 К при очень большом градиенте по сечению детали и режущему клину. Полученные распределения температур используются для учета влияния тепловых явлений на механику процесса резания и для определения зон структур и фазовых превращений. Кроме того, анализ тепловых явлений позволяет рациональным подводом тепла к зоне обработки интенсифицировать процесс резания (например плазменно-механическая обработка).

Следующим этапом является изучение изменения строения и свойств материала под действием возникающих в зоне обработки сил и температур. Например, при плазменно-механической обработке многих сталей происходит формирование аустенитной фазы, а стружка становится немагнитной.

Качество поверхностного слоя детали после обработки во многом определяется *химическими явлениями* при резании. Химические явления при резании протекают особенно интенсивно вследствие активации химических реакций высокими температурами, а также из-за образования в зоне отделения стружки от детали химически чистых (ювенильных) поверхностей. Ювенильные поверхности находятся в активном состоянии и, взаимодействуя с технической средой, существенно влияют на протекание процесса резания. Так, например, если скорость резания такова, что на ювенильной поверхности успевает образовываться окисная или полимерная пленка, то режущий клин скользит с малым трением, в противном случае происходит интенсивное наростообразование на инструменте за счет налипания материала обрабатываемой поверхности на грани инструмента. Однако возникающая окисная пленка ухудшает эксплуатационные характеристики поверхностного слоя многих сталей и сплавов. На титановых сплавах кроме окисления наблюдается

интенсивное наводораживание, приводящее к охрупчиванию поверхностного слоя детали после обработки.

Исследованиями было установлено, что *электромагнитные явления*, протекающие в зоне обработки, также оказывают влияние на качество детали (шероховатость) и производительность процесса. Это связано с тем, что из-за интенсивного разогрева материалов детали и инструмента в зоне обработки возникает схватывание поверхностей (микросварка) по пятнам контакта и в замкнутой цепи станок — приспособление — инструмент — заготовка — станок возникает термоЭДС. Поэтому рациональный ввод электрического тока в эту цепь приводит к повышению производительности обработки.

Таким образом, обработка резанием (впрочем, как и любой другой метод) — это сложный процесс, совмещающий большое число механических, тепловых, химических и электромагнитных явлений. Системный подход к изучению физико-химического механизма обработки заключается в следующем.

На первом этапе выделяются *первичные физико-химические явления* — кинематические, механические, тепловые, химические и электромагнитные. Эти явления рассматриваются как простые элементы сложной технологической системы, т. е. представляют собой *первый уровень* структурной схемы. Их изучение строится путем постепенного усложнения как вглубь самого первичного явления, так и за счет установления связей с другими первичными явлениями. Например, сначала изучаются кинематические закономерности, затем — механические, далее механические с учетом кинематики перемещения или механические с учетом пластического деформирования, трения и разрушения. Затем изучаются тепловые явления и взаимосвязь тепловых явлений с механическими и со структурными превращениями. Такое исследование проводится, пока не будет исчерпан комплекс всех первичных процессов.

На втором этапе на основе синтеза первичных процессов изучаются явления *второго уровня* — основные физико-химические явления, протекающие в специфических для резания условиях. К ним относятся кинематика и механика процесса резания с учетом всего комплекса первичных явлений.

К явлениям *третьего уровня* относятся комплексные процессы, определяющие механизм обработки и формирующие качество и точность изготовления детали. В случае резания это механика стружкообразования, механика и физическая химия формирования поверхностного слоя, кинетика изнашивания и разрушения инструмента.

Каждый этап и уровень исследования характеризуется определенной структурной схемой и математической моделью, которые строятся по иерархическому принципу. Комплекс таких моделей и структурных схем дает структурную схему и математическую модель физико-химического механизма и рабочего процесса обработки. На рис. 3.4 приведена структурная схема физико-химического механизма обработки материалов лезвийным инструментом.

#### 3.4. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ МЕХАНИКИ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ ЛЕЗВИЙНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

Фрикционные процессы при лезвийной обработке. В общем случае процесс резания представляет внедрение режущего клина инструмента в материал обрабатываемой детали. В большинстве моделей, описывающих механику процесса резания, рассматривают идеальный случай свободного резания, т. е. когда резание производится прямолинейной (без закругления) режущей кромкой, а вектор скорости резания направлен перпендикулярно этой кромке (см. рис. 3.1). В этом разделе будут рассмотрены механические закономерности в зоне обработки только для случая свободного резания.

Под действием силы резания в обрабатываемом материале возникает поле напряжений, энергия которого расходуется на пластическое деформирование и отделение от изделия слоя материала в виде стружки, а также на образование остаточного пластически деформированного слоя на обработанной поверхности. Превращение частиц поверхностного слоя детали в частицы стружки происходит тогда, когда они пересекают переходную пластически деформируемую область, называемую *зоной первичной деформации* (см. рис. 3.1). В большинстве теоретических моделей эта область рассматривается как плоскость сдвига, т. е. ее толщину принимают равной нулю. Плоскость сдвига характеризуют углом сдвига  $\beta_1$ . Свежеобразованная поверхность стружки скользит по передней поверхности резца и подвергается при этом значительному нормальному давлению.

На практике различают три вида стружки: сливная, у которой слабо заметны элементы, сдвинутые друг относительно друга; элементную, состоящую из отдельных, не связанных между собой блоков элементов стружки; стружку надлома, получаемую при резании хрупких материалов. Тип стружки, получаемый при резании, зависит от материала детали и резца, геометрии режущей кромки, скорости резания и наличия смазки.

Когда обрабатываются вязкие материалы, то на режущей

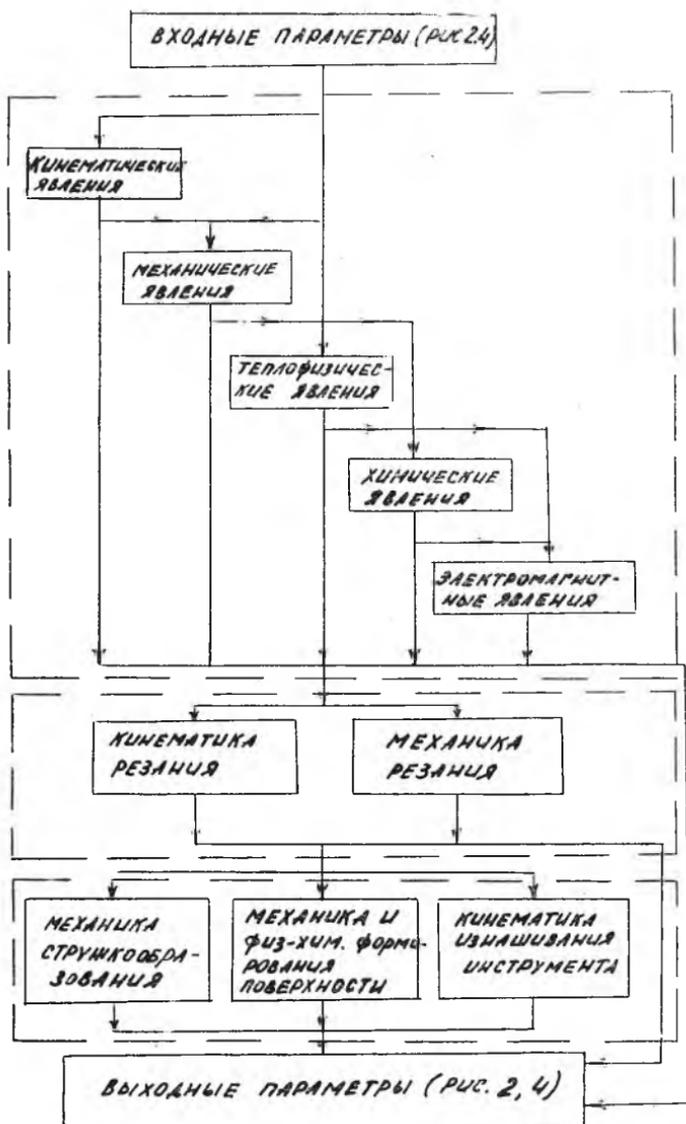


Рис. 3.4. Структурная схема физико-химического механизма лезвийной обработки

кроме образуется нарост. Нарост — это часть обрабатываемого материала, задержанная и перемещающаяся вместе с резцом. При этом резание начинает происходить внутри самой стружки. При резании контактные явления наблюдаются на передней и части задней поверхности резца. Передняя поверхность контактирует со стружкой и воспринимает большую долю суммарного усилия при резании. Задняя поверхность контактирует со свежееобразованной поверхностью металла. Причем контакт по режущей кромке относят часто к контакту по задней поверхности.

В условиях резания металлов контактные процессы сложны по причине очень высоких нормальных нагрузок. Рост нормальной нагрузки на контактных поверхностях вызывает возрастание фактической (реальной) площади контакта, которая по своей величине начинает приближаться к номинальной площади контакта. При этом из-за взаимодействия микровыступов поверхности наблюдается сильная адгезия между поверхностями и начинается приповерхностное течение в обрабатываемом материале. Сила трения  $F$  до определенного уровня нормальной нагрузки  $N$  подчиняется закону Амонтона — Кулона

$$F = \mu N, \quad (3.1)$$

но в дальнейшем с ростом  $N$  зависимость становится нелинейной и достигает своего предельного значения. Выражая  $N$  через нормальное напряжение  $\sigma_n$ , а  $F$  через касательное напряжение  $\tau$  на контактной поверхности, получим

$$\tau = \mu \sigma_n. \quad (3.2)$$

По энергетическому условию пластичности (условию Губера — Мизеса) максимальная величина касательных напряжений не может быть больше, чем  $\sigma_T/3$  при плоском деформируемом состоянии и  $\sigma_T/2$  при равенстве любых двух главных нормальных напряжений. При объемном напряженном состоянии главное касательное напряжение также ограничено условием  $\tau \leq \tau_{\max} = \pm \beta \sigma_T/2$ , вытекающим из приближенного условия пластичности. Величина  $\beta$  в этом случае изменяется от 1 до 1,155. Таким образом, контактное трение может возбудить на контактной поверхности металла касательное напряжение, величина которого определяется соотношением

$$\tau = \mu \sigma_n \leq \beta \sigma_T/2. \quad (3.3)$$

Использование закона Амонтона—Кулона (3.1) не является единственно возможным способом описания контактного трения при расчетах напряженного состояния пластически деформируемых материалов. Ряд исследователей считают целесообразным,

особенно при горячей обработке давлением, принимать трение независимым от нормальной нагрузки и выражать его в долях  $\beta \sigma_T$  максимального главного касательного напряжения, обуславливающего пластическую деформацию:

$$\tau = \mu_T \beta \sigma_T, \quad (3.4)$$

где  $\mu_T$  отличается от коэффициента трения в формуле (3.1) и носит название *коэффициент трения по напряжению текучести*.

Поля напряжений и деформаций в изделии при свободном резании. Рассмотрим математическую модель, позволяющую найти поля напряжений и деформаций в изделии при его лезвийной обработке. С целью наглядности анализа и упрощения расчета рассмотрим схему свободного резания пластины шириной  $b$ , приведенную на рис. 3.5 [9]. Основные

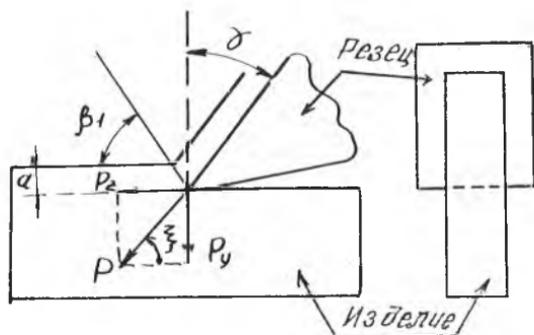


Рис. 3.5. Схема свободного резания

параметры, определяющие процесс резания, следующие: передний угол резца  $\gamma$ ; угол сдвига  $\beta_1$ , толщина среза  $a$ ; главная и нормальная составляющие силы резания  $P_z$  и  $P_y$ ; угол между направлением вектора скорости и равнодействующей силой резания  $\xi$ .

Схема свободного резания, представленная на рис. 3.5, может быть приведена к условной схеме (рис. 3.6). Напряжения в точке  $M$ , расположенной на расстоянии  $r$  от вершины режущего клина, описываются системой [9]:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= -K \frac{\cos \alpha}{br} \\ \sigma_{\theta} = \tau_{r\theta} &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (3.5)$$

где  $\sigma_r$  — радиальные напряжения;  $b$  — ширина пластины;  $\alpha$  — угол между полярной осью и радиусом, проведенным в точку  $M$ ;  $K$  — постоянная.

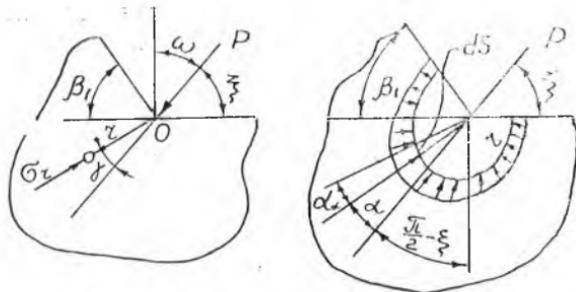


Рис. 3.6. Схема напряженного основания

Для того, чтобы найти постоянную  $K$ , выделим сектор радиуса  $r$  (рис. 3.6, б) и удалим оставшуюся часть, приложив к границе сектора эквивалентные напряжения. Составляя уравнение равновесия, получим

$$P = - \int_{(\xi+\beta_1)}^{(\pi-\xi)} \sigma_r b \cos \alpha dS,$$

где  $dS$  — величина дуги границы сектора, соответствующая углу  $d\alpha$ .

Учитывая, что  $dS = r d\alpha$ , подставляя систему (3.5) и проводя интегрирование по  $\alpha$ , получим

$$K = \frac{4P}{2(\pi + \beta_1) - \sin 2\xi + 2\sin(\xi + \beta_1)}$$

Таким образом, радиальные напряжения будут выражаться как

$$\sigma_r = - \frac{CP \cos \alpha}{br}, \quad (3.6)$$

где

$$C = \frac{4}{2(\pi + \beta_1) - \sin 2\xi + \sin 2(\xi + \beta_1)},$$

$$\operatorname{tg} \xi = \frac{P_y}{P_z}, \quad P = \sqrt{P_y^2 + P_z^2}.$$

Анализ соотношений (3.6) показывает, что линии уровня постоянных напряжений (изохромы) расположены на окружности (рис. 3.7) с центром, лежащим на линии действия равнодействующей силы  $P$ , проходящей через точку  $O$  и имеющей диаметр

$$d = \frac{CP}{\sigma_r b} \quad (3.7)$$

Окружностей равных напряжений в зависимости от значения  $\sigma_r = \text{const}$  можно провести бесконечно много. Однако сущест-

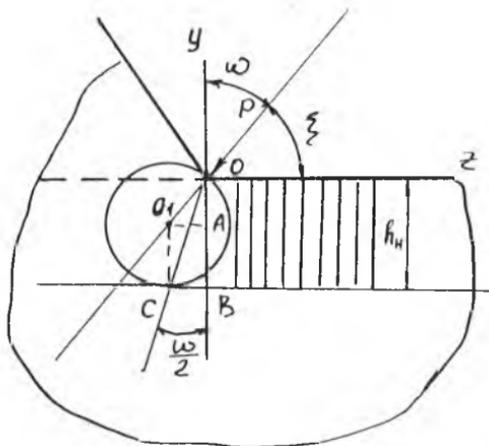


Рис. 3.7. Схема определения глубины упрочнения

вует только одна окружность, внутри которой напряжения равны пределу текучести, а вне ее материал находится в упругом состоянии.

Известно, что материал переходит в пластическое состояние в тех точках, где интенсивность напряжений достигает предела текучести  $\sigma_T$ . Учитывая, что интенсивность напряжений, выраженная через главные напряжения, определяется зависимостью

$$\sigma_i = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2},$$

а в нашем случае  $\sigma_1 = \sigma_r$ ,  $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ , получаем  $\sigma_i = \sigma_r$ . Таким образом, диаметр окружности, разделяющей упругую и пластическую область, будет даваться соотношением (3.7) при  $\sigma_r = \sigma_T$ , т. е.

$$d_T = \frac{CP}{b \sigma_T}. \quad (3.8)$$

При относительном перемещении резца вместе с ним перемещается поле напряжений. В итоге на поверхности пластины останется слой толщиной  $h_n$  с остаточными деформациями (наклепом). Из построения на рис. 3.7 следует, что

$$h_n = OA + AB = \frac{d_T}{2} \cos \omega + \frac{d_T}{2} = \frac{d_T}{2} (1 + \cos \omega) = d_T \cos^2 \frac{\omega}{2} \quad (3.9)$$

Используя соотношение (3.8), получим выражение для глубины наклепанного слоя

$$h_n = \frac{CP}{b \sigma_T} \cos^2 \frac{\omega}{2} \quad (3.10)$$

Таким образом, глубина наклепанного слоя при свободном резании слоя малой толщины пропорциональна результирующей силе резания.

Рассмотрим изменение деформации материала по глубине пластины. На рис. 3.8 приведена схема формирования остаточных деформаций. Выделенная окружность равных напряжений

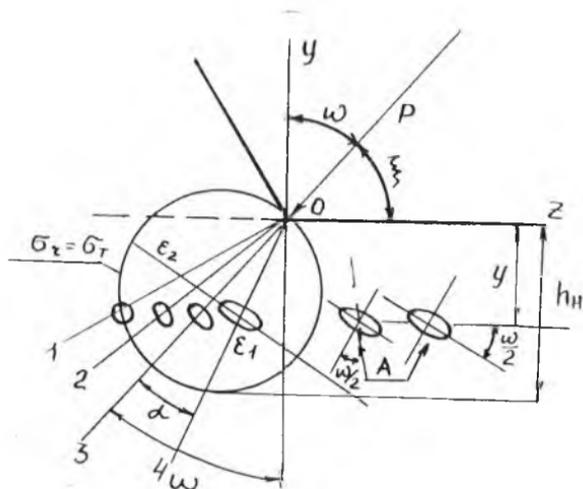


Рис. 3.8. Схема формирования главных деформаций

соответствует условию  $\sigma_r = \sigma_i = \sigma_T$ , т. е. металл внутри этой окружности под действием силы  $P$  находится в пластическом состоянии. Глубина деформационного упрочнения  $h_n$ . На глубине  $y$  от поверхности проведем линию, параллельную поверхности, рассмотрим деформацию материала в произвольных сечениях 1, 2, 3, 4. Деформация материала на рис. 3.8 представлена в виде эллипса тензора деформаций, главные оси которого совпадают с главными осями деформаций после снятия приложенной нагрузки  $P$ . Поскольку после снятия  $P$  эллипс тензора деформации вырождается в окружность, т. е. деформация в этой точке изотропна. В сечениях 2, 3, 4 первоначально изотропный материал находится в пластическом состоянии под действием напряжений  $\sigma_r$ , направленных, соответственно, вдоль осей 2, 3, 4. Поэтому эллипсоид тензора деформаций в этих точках имеет вид, показанный на рисунке. Одна из главных осей деформаций  $\epsilon_1$  совпадает по направлению с  $\sigma_r$  в точках 2, 3, 4, т. е.  $\epsilon_1 = \epsilon_r$ . Вторая главная ось перпендикулярна ей. В случае плоской деформации (широкая пластина)  $\epsilon_1 = \epsilon_r$ ,  $\epsilon_2 = -\epsilon_1 = -\epsilon_r$ ,  $\epsilon_3 = 0$ . В случае плоского напряженного состояния (тонкая пластина)  $\epsilon_1 = \epsilon_r$ ,  $\epsilon_2 = \epsilon_3 = -\mu \epsilon_r$ , где  $\mu$  — коэффициент Пуассона. Ось  $\epsilon_3$  направлена перпендикулярно плоскости рисунка. Деформация выделенных участков материала будет в различных сечениях различной, и главные оси деформаций будут иметь разное направление.

Однако вдоль линии, проведенной на расстоянии  $y$  от поверхности, существует точка, в которой деформация максимальна. Поэтому по мере перемещения резца деформация в произвольной точке на этой оси будет нарастать и после достижения максимального значения останется практически неизменной. Останется неизменным и угол наклона оси  $\epsilon_1$  к оси  $y$ . В результате после окончания обработки наклепанный слой имеет анизотропную остаточную деформацию, изображенную на рис. 3.8 в виде эллипса тензора деформаций  $A$ . Найдем направление главной оси этого тензора. Для этого найдем, при каком угле  $\alpha$  напряжения  $\sigma_r$  достигают максимального значения на оси, проведенной на произвольной глубине  $y$ . Из выражения (3.6) имеем  $\sigma_r = -\frac{CP \cos \alpha}{br}$ . Выражая  $r$  через  $y$ , имеем  $r = y/\cos(\omega - \alpha)$ , и приравняв производную  $\sigma_r^1$  по  $\alpha$  нулю, получаем

$$\frac{d\sigma_r}{d\alpha} = \sin\alpha \cos(\omega - \alpha) - \cos\alpha \sin(\omega - \alpha) = 0,$$

или  $\sin(2\alpha - \omega) = 0$ , т. е.  $\alpha = \omega/2$ . Таким образом, максимальные напряжения, а стало быть и деформации, возникают в сечении, для которого полярный угол равен  $\omega/2$ . Надо отметить, что этот угол соответствует углу СОВ (см. рис. 3.7), получаемому при касании окружности  $\sigma_r = \text{const}$  линии, параллельной оси  $z$ .

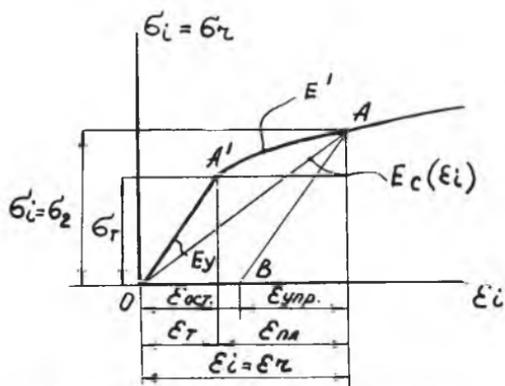


Рис. 3.9. Диаграмма деформирования

материал деформируется пластически с упрочнением. Этот участок принято характеризовать секущим модулем упругости  $E_c(\epsilon_i)$ . Однако формально связь между деформациями и напряжениями имеет прежний вид:  $\sigma_r = E_c(\epsilon_r)\epsilon_r$ . После разгрузки материала (линия АВ) упругая часть деформации снимается и остается только остаточная  $\epsilon_{ост}$ , поэтому при произвольном деформировании материала

Величину деформации можно найти, используя следующий подход [9]. Рассмотрим диаграмму «интенсивность деформаций — интенсивность напряжений» (рис. 3.9). В нашем случае  $\epsilon_i = \epsilon_r$ ,  $\sigma_i = \sigma_r$ . На участке ОА' материал деформируется упруго и характеризуется обычным модулем Юнга  $E_y$ , т. е.  $\sigma_r = E_y\epsilon_r$ . На участке А'А

$$\varepsilon_{ост} = \varepsilon_r - \varepsilon_{упр}, \quad (3.11)$$

где полная деформация  $\varepsilon_r = \sigma_r/E_c$ , упругая деформация  $\varepsilon_{упр} = \sigma_r/E_y$ . Отсюда получаем

$$\varepsilon_{ост} = \left( \frac{1}{E(\varepsilon_r)} - \frac{1}{E_y} \right) \sigma_r. \quad (3.12)$$

При  $\sigma_r \in [0, \sigma_T]$   $E(\varepsilon_r) = E_y$  и из формулы (3.12) следует, что  $\varepsilon_{ост} = 0$ , а при  $\sigma_r > \sigma_T$   $\varepsilon_{ост} \neq 0$ .

Часто диаграмму  $\sigma_i - \varepsilon_i$  аппроксимируют двумя прямыми линиями так, что участок  $OA'$  характеризуется по-прежнему модулем упругости  $E_y$ , а участок  $A'A -$  модулем упругости  $E'$ . В этом случае связь напряжений деформаций на участке упрочнения выражается как  $\sigma_r = A + E'\varepsilon_r$ . Константу  $A$  найдем из условия, что  $\sigma_r = -\sigma_T$  (материал работает в нашем случае на сжатие) при  $\varepsilon_r = -\sigma_T/E_y$ . Отсюда получаем  $A = -\sigma_T + (E'/E_y)\sigma_T$ , поэтому

$$\varepsilon_r = \frac{\sigma_r + \sigma_T}{E'} - \frac{\sigma_T}{E_y}. \quad (3.13)$$

Подставляя уравнение (3.13) и значение  $\varepsilon_{упр} = \sigma_r/E_y$  в формулу (3.11), найдем

$$\varepsilon_{ост} = (\sigma_r + \sigma_T) \left( \frac{1}{E'} - \frac{1}{E_y} \right) = - \left( \frac{CP \cos^2 \frac{\omega}{2}}{by} - \sigma_T \right) \left( \frac{1}{E'} - \frac{1}{E_y} \right), \quad (3.14)$$

где  $\sigma_r$  подставлена из выражения (3.6) при  $\alpha = \omega/2$ , а полярный радиус  $r$  заменен на координату по глубине из соотношения  $r = y/\cos \omega/2$ .

Таким образом, зная параметры материала  $E_y$ ,  $E'$  и  $\sigma_T$ , а также условия резания  $P_z$ ,  $P_y$ ,  $\omega$ ,  $\beta_1$  и ширину пластины  $b$ , можно по соотношению (3.14) рассчитать изменение остаточной деформации по глубине наклепанного слоя. Естественно, что при  $y \rightarrow 0$  соотношение (3.14) неприменимо, так как в исходном уравнении (3.5) в этой точке существует неопределенность. Это связано с тем, что уравнение (3.5) было получено для силы  $P$ , действующей в точке. В реальном случае у любого резца существует конечный радиус закругления режущей кромки, по которой и распределяется усилие  $P$ . Однако при значениях  $y \geq 0,05 h_n$  соотношение (3.14) согласуется с экспериментальными данными.

Для того, чтобы по соотношениям, приведенным в этом разделе, можно было теоретически рассчитывать напряжения и деформации при обработке резанием, необходимо иметь связь величин  $P_z$ ,  $P_y$ ,  $\omega$  и  $\beta_1$  с величинами, задаваемыми при назначении режима резания. В настоящее время величины  $P_z$ ,  $P_y$  и  $\omega$

устанавливаются в основном экспериментально на основании изучения соответствующих структурных элементов типа «черный ящик». Рассмотрим порядок определения величины угла сдвига  $\beta_1$ .

Определение угла сдвига стружки. Исследованиями установлено, что при резании металлов стружка формируется за счет последовательных сдвигов в определенном направлении, характеризуемом углом  $\beta_1$ . Это направление может быть определено из принципа минимальной энергии.

Касательные напряжения, возникающие в условной плоскости сдвига, необходимые для сдвига элемента стружки, являются результатом воздействия силы резания и силы трения на передней поверхности. Проектируем силу резания  $P$  на направление, перпендикулярное передней поверхности резца (рис. 3.10). Про-

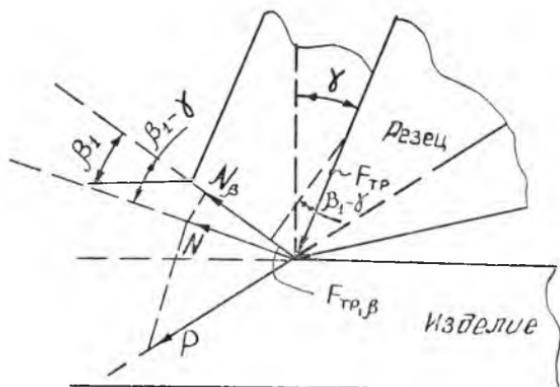


Рис. 3.10. Схема определения угла сдвига стружки

екция  $N$  будет силой нормального давления. Считаем, что сила трения на этой поверхности подчиняется закону Амонтона—Кулона, т. е.  $F_{тр} = \mu N$ . Проектируя силы  $N$  и  $F_{тр}$  на направление плоскости сдвига и перпендикулярное направление, получаем

$$P_{\beta} = N \cos(\beta_1 - \gamma) - \mu N \sin(\beta_1 - \gamma), \quad (3.15)$$

$$P_N = N \sin(\beta_1 - \gamma) + \mu N \cos(\beta_1 - \gamma). \quad (3.16)$$

Сила  $P_{\beta}$  будет создавать касательное напряжение  $\tau_s$  на плоскости сдвига, определяемое выражением

$$\tau_s = \frac{P_{\beta}}{S} = \frac{\sin \beta_1}{ab} N [\cos(\beta_1 - \gamma) - \mu \sin(\beta_1 - \gamma)]. \quad (3.17)$$

Сила  $P_N$  будет создавать нормальное давление на плоскости сдвига

$$\sigma_n = \frac{P_N}{S} = \frac{\sin \beta_1}{ab} N [\sin(\beta_1 - \gamma) + \mu \cos(\beta_1 - \gamma)], \quad (3.18)$$

где  $S = ab/\sin \beta_1$  — площадь плоскости сдвига,  $a$  — толщина среза,  $b$  — ширина пластины.

Полное касательное напряжение на плоскости сдвига  $\tau$  определяется разностью напряжений  $\tau_s$  и напряжений внутреннего трения  $\mu_1 \sigma_n$ , возникающих на этой плоскости:  $\tau = \tau_s - \mu_1 \sigma_n$ , где  $\mu_1$  — коэффициент внутреннего трения по плоскости сдвига.

Используя выражения (3.17) и (3.18), получаем

$$\tau = \frac{N}{ab} [(1 - \mu_1 \mu) \sin \beta_1 \cos(\beta_1 - \gamma) - (\mu + \mu_1) \sin \beta_1 \sin(\beta_1 - \gamma)].$$

Сдвиг материала будет проходить по такому углу  $\beta_1$ , при котором  $\tau$  максимально. Поэтому находим максимум  $\tau$  по углу  $\beta_1$ :

$$\frac{d\tau}{d\beta_1} = \frac{N}{ab} [(1 - \mu_1 \mu) \cos(2\beta_1 - \gamma) - (\mu + \mu_1) \sin(2\beta_1 - \gamma)] = 0.$$

$$\text{Отсюда получаем } \operatorname{tg}(2\beta_1 - \gamma) = \frac{1 - \mu_1 \mu}{\mu + \mu_1}.$$

Вводим вместо коэффициентов трения  $\mu$  и  $\mu_1$  соответствующие углы трения  $\rho = \operatorname{tg} \rho$ ,  $\rho_1 = \operatorname{tg} \rho_1$ , тогда

$$(1 - \operatorname{tg} \rho_1 \operatorname{tg} \rho) / (\operatorname{tg} \rho_1 + \operatorname{tg} \rho) = \operatorname{ctg}(\rho_1 + \rho) = \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{2} - \rho_1 - \rho\right).$$

Подставляя полученное соотношение в формулу (3.5) будем иметь

$$\beta_1 = \gamma + \frac{\pi}{4} - \frac{\rho_1 + \rho}{2}.$$

Полученное выражение для направления сдвига стружки достаточно хорошо согласуется с опытными данными.

Таким образом, направление сдвига стружки определяется направлением максимальных касательных напряжений.

### 3.5. КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПОСЛЕ ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКИ

На параметры поверхностного слоя оказывают влияние режимы резания, геометрия инструмента и его износ, СОЖ, жесткость и вибрации системы СПИД, физико-химические свойства материалов детали и режущего инструмента. Установлены следующие закономерности влияния отдельных факторов на параметры поверхностного слоя.

Зависимость высоты неровностей поверхности от скорости резания имеет экстремальный характер. Максимальное значение

шероховатости наблюдается в интервале скоростей с интенсивным наростообразованием. Высота неровностей также возрастает с увеличением подачи, а глубина резания при 0,5...2 мм на шероховатость влияет незначительно. В то же время применение СОЖ снижает шероховатость из-за уменьшения величины контактного трения.

Глубина наклепа после обработки резанием и абразивным инструментом возрастает с увеличением подачи, глубины резания, радиуса скругления и износа режущего лезвия. Применение СОЖ ведет к снижению величины наклепа. Степень наклепа поверхностного слоя, равная отношению разности максимальной и исходной микротвердости поверхностного слоя к исходной микротвердости, при обработке резанием близка предельному значению 0,3...0,4 и мало зависит от изменения режимов резания.

#### *4. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ХИМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ*

Процессы, основанные на химическом взаимодействии поверхности заготовки со специальной технологической средой, нашли широкое применение при обработке материалов. Химические методы применяются как самостоятельно, так и в комбинации с другими технологическими методами. Химические методы обработки применяются для разделения заготовки, локального глубокого травления (химического фрезерования), снятия припуска, придания поверхности нужных физико-химических свойств, нанесения покрытий.

Разделение заготовки, химическое фрезерование происходит в результате растворения металла (травления) заготовки в кислотных и щелочных средах. Так, например, скорость травления титановых сплавов в смеси плавиковой и серной кислот достигает 0,6 м/ч при комнатной температуре, скорость травления алюминиевых сплавов в щелочном растворе едкого натра—2 м/ч при температуре 70...90°С. Химическое травление может быть общим (металл удаляется со всей поверхности) и локальным (металл удаляется с части поверхности, не покрытой лаком).

К преимуществам химического травления по сравнению с другими методами относится высокая производительность обработки, не зависящая от площади обрабатываемой поверхности и ее формы, а также возможность одновременной обработки большого числа заготовок.

Придание поверхности заготовки требуемых физико-химических свойств и нанесение на эти поверхности покрытий химическими методами происходит в результате химических реакций и диффузионного насыщения при взаимодействии материала поверхности со специальной средой. При этом специальная среда может быть раствором, расплавом, газом, плазмой, твердой фазой и пастой. Из растворов на поверхность детали осаждают покрытия на основе никеля ( $Ni - P$ ,  $Ni - B$ ), на основе кобальта ( $Co - P$ ,  $Co - B$ ), меди, серебра, золота, палладия, платины, олова, хрома и т. д. Эти процессы протекают при температурах  $30 \dots 90^\circ C$ . В случаях использования для осаждения газов, твердой фазы, пасты, расплава химические и диффузионные процессы активируют нагревом. Такие методы являются комбинированными и называются *химико-термическими методами обработки материалов*.

При использовании в качестве технологической среды плазмы на поверхности протекают плазмохимические реакции. Плазму для обработки получают обычно в различных видах электрических разрядов, поэтому эти методы относят к электрофизическим методам обработки [1].

Кроме растворения материала заготовки, ее диффузионного насыщения и химических реакций на поверхности детали, в обработке материалов широко применяется снижение поверхностной прочности материала заготовки вследствие адсорбционного взаимодействия химической среды с поверхностью детали.

Было установлено [10], что некоторые жидкости (вода, уксусная кислота и т. д.), являясь плохими смазочными материалами, обладают способностью сильно снижать удельную работу резания некоторых металлов. И наоборот, жидкости, сильно снижающие трение (например этиловый спирт), слабо влияют на уменьшение удельной работы резания. Это объясняется адсорбционным эффектом снижения прочности поверхностного слоя материала. Адсорбционный эффект, с одной стороны, снижает свободную энергию поверхности и создает благоприятные условия для зарождения пластических сдвигов при меньших напряжениях. С другой стороны, технологическая среда, проникая в микротрещины, образующиеся на обрабатываемой поверхности, создает раскливающее действие. При этом активные молекулы жидкости, адсорбируясь на поверхности микротрещин, препятствуют их смыканию после снятия нагрузки. В результате происходит процесс разрыхления поверхностного слоя, облегчающий его деформирование при обработке.

Адсорбционная активность технологической среды зависит от ее физико-химических свойств и температуры. Органические

поверхностно-активные технологические среды нашли широкое применение в качестве СОЖ при обработке материалов резанием. В последние годы для повышения эффективности резания все большее применение находят также легкоплавкие металлы, соли и стекло.

## *5. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕРМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ*

Термические методы широко применяются в обработке материалов для разделения заготовки, придания ее поверхности и объему требуемых физико-химических свойств и для нанесения покрытий. При этом механизмы обработки весьма разнообразны — от единственно теплового до комплексного. Разделение заготовки термическим методом происходит вследствие нагрева материала, его плавления, превращения в окислы или пары и удаления этих продуктов газовой струей или испарением. Такой физико-химический механизм характеризует газопламенную, плазменную, лазерную и электронно-лучевую обработку. По существующей классификации технологических методов [1] плазменную, лазерную и электронно-лучевую обработку относят к электрофизическим методам, а газопламенную к термическим методам обработки.

В технологии машиностроения для разделения литых заготовок и снятия припуска все более широко начинает применяться фрикционная обработка. Например, фрикционное отрезание материала осуществляется либо стальным диском, вращающимся со скоростью 100 м/с, либо ленточной пилой, перемещающейся со скоростью 13...100 м/с. При соприкосновении диска с обрабатываемым металлом в результате интенсивного трения выделяется большое количество теплоты. Металл детали в контакте с диском плавится. Наиболее крупные капли металла под воздействием центробежной силы отрываются от диска, а мелкие капли остаются на поверхности и, охлаждаясь, привариваются к диску, образуя шероховатость, подобную зернам абразива. Шероховатая поверхность, соприкасаясь с деталью, снимает с нее слой за слоем металл.

Высокие технические качества фрикционного метода легли в основу создания автоматических линий для обработки литых заготовок трением. Эксплуатация этих линий показала их большие преимущества перед обработкой литых заготовок абразивными кругами.

Придание материалу поверхности заготовки и материалу в объеме нужных физико-химических свойств термическими методами происходит в результате фазовых и структурных превращений в материале при его нагреве и охлаждении. Практически все современные материалы после различных видов обработки подвергаются термообработке. Это связано с тем, что большая часть работы (до 90%), затрачиваемая на деформацию металла, превращается в теплоту, оставшая часть энергии аккумулируется в металле в виде повышенной плотности несовершенств строения (вакансий и дислокаций). В связи с этим состояние наклепанного металла термодинамически неустойчиво. При нагреве такого металла в нем протекают процессы возврата, полигонизации и рекристаллизации, обуславливающие возвращение всех свойств к свойствам металла до деформации.

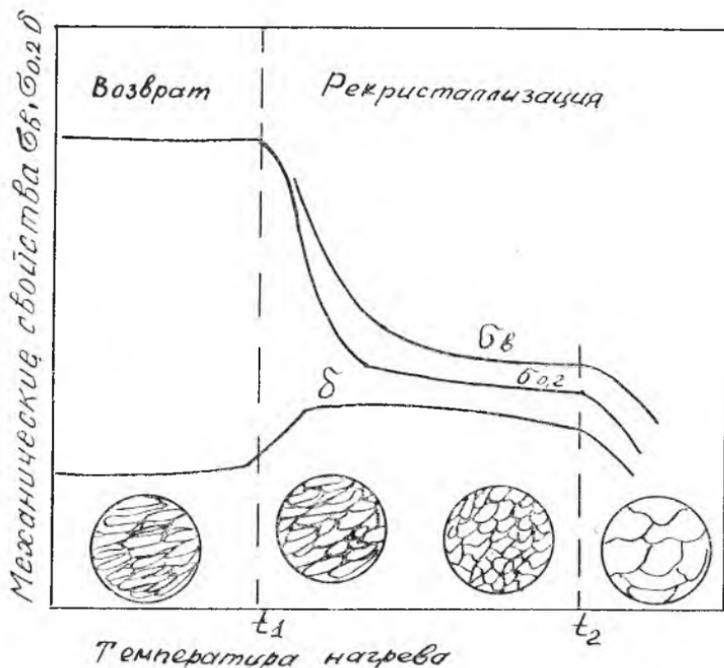


Рис. 5.1. Влияние нагрева на механические свойства и структуру металла, упрочненного холодной деформацией

На рис. 5.1 показано влияние нагрева на механические свойства и структуру металла, упрочненного холодной деформацией. Из рис. 5.1 видно, что при нагреве до  $(0,2 \dots 0,3) T_{пл}$  начинается процесс возврата, под которым понимают повышение структурного совершенства наклепанного материала в резуль-

тате уменьшения плотности дефектов строения, однако при этом не наблюдается заметных изменений структуры, видимой в световом микроскопе, по сравнению с деформированным состоянием. При более высоких температурах начинается процесс раскристаллизации, заключающийся в образовании равноосных зерен вместо ориентированной волокнистой структуры.

Кроме этих процессов термообработка применяется для закалки, отпуска, отжига и других процессов, позволяющих создать оптимальную структуру конструкционного материала. Термическая обработка материалов широко применяется в сочетании с другими методами обработки, а тепловой фактор присутствует практически во всех физико-химических механизмах, оказывая как положительное, так и отрицательное влияние на качество изготовляемых деталей. Поэтому исследование и моделирование тепловых процессов проводится при оптимизации режимов обработки различных технологических методов.

## *6. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРО-ХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ*

### *6.1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ МЕТОДАХ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ*

К числу прогрессивных технологических методов относятся методы электрохимической обработки. Электрохимические методы используются для снятия припуска и разделения материала, для получения на поверхности детали нужного уровня шероховатости и для нанесения покрытий.

Основными преимуществами электрохимической обработки являются:

практически неограниченные возможности формообразования наружных и внутренних поверхностей заготовок любой формы из любых сталей и сплавов при относительно простой кинематике процесса;

существенно меньшая, чем при обработке резанием, зависимость основных технологических параметров процесса от физико-химических свойств материала заготовки;

отсутствие износа электрода-инструмента;

минимальное силовое и температурное воздействие на обрабатываемую заготовку;

высокая производительность процесса.

Электрохимическая размерная обработка эффективно применяется, например, при получении профилей части заготовок

лопаток турбин и компрессоров, полостей рабочей части штампов и пресс-форм, сквозных и глухих отверстий и щелей различной формы и размеров. Применяют ее и для прошивки отверстий диаметром 2 мм и менее и глубиной до 400 м в жаропрочных сплавах, а также отверстий большого диаметра и большой глубины. С помощью электрохимической обработки производится точное формообразование фасонных элементов заготовок типа тел вращения с малым сечением, которые изготовить другими методами, например лезвийной обработкой, невозможно. Электрохимическая обработка широко применяется для отделочных операций, позволяя получать на сложных поверхностях шероховатость до  $R_a = (0,04 \dots 0,16)$  мкм.

Удаление металла при размерной электрохимической обработке (ЭХО) происходит под действием электрического тока в среде электролита без непосредственного контакта между инструментом и заготовкой. Схема и последовательность протекания процесса при ЭХО показана на рис. 6.1. Электролит 3 подается обычно через инструмент 1 в межэлектродный зазор. Между заготовкой 2 и инструментом приложена разность потенциалов. По мере выработки отверстия в заготовке инструмент перемещают поступательно таким образом, чтобы величина межэлектродного зазора оставалась постоянной.

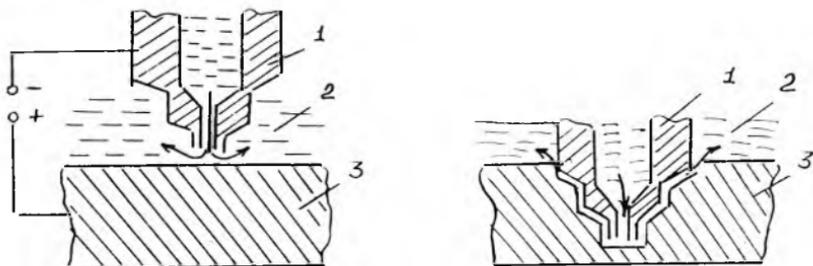


Рис. 6.1. Схема электрохимической обработки

Основным физико-химическим механизмом обработки является анодное растворение металла. Анодное растворение может протекать в электролитах различного состава, в том числе в неагрессивных электролитах — водных растворах хлорида натрия, нитрата натрия и др. Эти соли дешевы и недефицитны.

Под действием тока металл анода растворяется в электролите и в виде продуктов обработки выносится из промежутка потоком электролита. В результате реакции на катоде образуются газообразные соединения, которые удаляются в атмосферу. Катод, который служит инструментом, не изнашивается, что является одной из положительных особенностей метода ЭХО.

## 6.2. АНОДНОЕ РАСТВОРЕНИЕ МЕТАЛЛОВ

Сущность механизма анодного растворения заключается в следующем. При растворении в воде молекул с ионной связью, например соли  $\text{NaCl}$ , наблюдается явление диссоциации. Диссоциация  $\text{NaCl}$  на катионы  $\text{Na}^+$  и анионы  $\text{Cl}^-$  возникает из-за того, что молекула воды так же, как и молекула  $\text{NaCl}$ , является полярной и обладает дипольным электрическим моментом. Поэтому, когда молекула  $\text{NaCl}$  оказывается между двумя молекулами воды, то все три полярные молекулы стремятся ориентироваться с учетом их знака (рис. 6.2, а). Но в этом случае молекулы воды ослабят связь между ионами  $\text{Na}^+$  и  $\text{Cl}^-$  и энергия

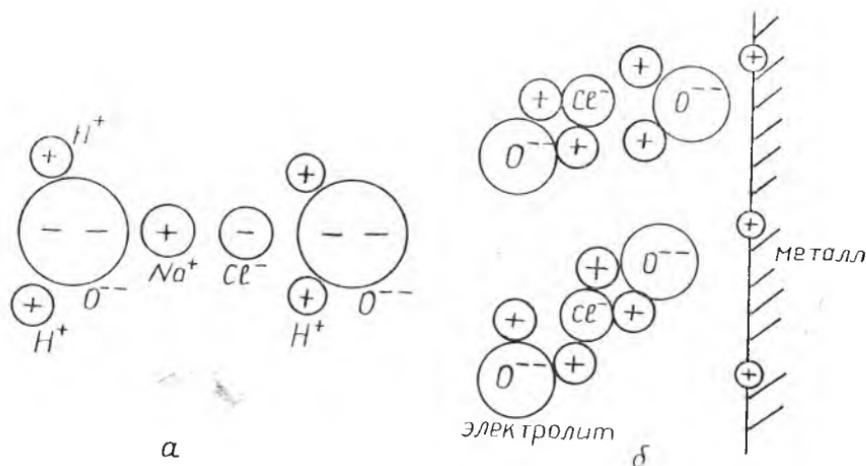


Рис. 6.2. Схема поляризации молекул при ЭХО

теплового движения может оказаться достаточной для диссоциации  $\text{NaCl}$  на ионы. Когда ионы разойдутся на достаточно большое расстояние, молекулы воды, образовавшие вокруг ионов оболочку, уменьшат силу взаимодействия между  $\text{Na}^+$  и  $\text{Cl}^-$  в  $\epsilon$  раз ( $\epsilon = 81$  — диэлектрическая проницаемость воды), что уменьшит вероятность рекомбинации рассмотренных ионов. Таким образом, при растворении солей в воде образуются положительные и отрицательные ионы, вокруг которых располагаются поляризованные молекулы воды (см. рис. 6.2, а).

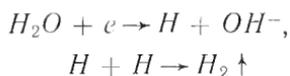
Если теперь в такой электролит опустить металлическую пластинку, то ионы кристаллической решетки начнут взаимодействовать с ионами раствора. Причем, если работа выхода ионов из металла пластины в раствор больше работы выхода ионов из раствора в металл, то катионы металла будут переходить из раствора в кристаллическую решетку пластины. При

этом пластина заряжается положительно, а раствор — отрицательно. При обратном соотношении между работами выхода знаки пластины и раствора сменятся на противоположные.

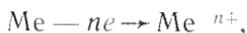
Таким образом, на границе раздела фаз металл-раствор образуется двойной электрический слой, который можно уподобить электрическому конденсатору. Обкладками конденсатора являются, с одной стороны, избыточные заряды на металле (положительные или отрицательные), с другой стороны — ионы в растворе у поверхности пластины. Толщина двойного слоя имеет размеры порядка атома  $10^{-10}$  м, поэтому при скачке потенциала всего в 1 В напряженность электрического поля достигает  $10^{10}$  В/м (рис. 6.2, б).

При использовании электролита на основе NaCl на поверхностях двух металлических электродов наблюдается переход ионов металла в раствор, т. е. протекает реакция  $Me \rightleftharpoons Me^{n+} + ne$ , где  $Me$  — атом в металле,  $n$  — его валентность,  $Me^{n+}$  — ион в растворе,  $e$  — электрон. На каждом из электродов возникает двойной электрический слой с определенной разностью потенциалов  $\varphi_a$  и  $\varphi_k$  ( $\varphi_a, \varphi_k$  — разность потенциалов на электроде, который в дальнейшем будет использован как анод и как катод, соответственно). Без наложения внешнего электрического поля в системе наступает динамическое равновесие, и процесс прекращается.

Протекание процесса ЭХО станет возможным, если приложить внешнее электрическое поле с разностью потенциалов, большей  $\varphi_a - \varphi_k$ . При этом начнется упорядоченное перемещение ионов в электролите. При этом на катоде будет проходить разложение воды с выделением молекулярного водорода по схеме



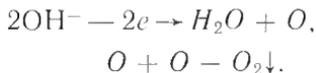
На аноде металл, удаляемый с поверхности по схеме



будет переходить в нерастворимый гидроксид



Кроме того, на аноде будет выделяться кислород



Таким образом, при проведении процесса ЭХО на катоде будет выделяться газ (водород), а сама поверхность катода (инструмента) не будет растворяться. В то же время поверхность

анода будет растворяться с выделением осадка (гидроксида металла) и газа (кислорода). При большой силе тока в электролите возможны также и другие реакции, в ходе которых на поверхности анода могут образовываться оксиды. Они уменьшают скорость анодного растворения. Этот процесс используется для оксидирования металлов.

Если на электроде протекает только один электрохимический процесс, например растворение металла, то он описывается законом Фарадея

$$m = \kappa It, \quad (6.1)$$

где  $m$  — масса материала, растворенного с анода,  $I$  — сила тока,  $t$  — время,  $\kappa = An/F$  — электрохимический эквивалент,  $A$  — атомная масса,  $n$  — валентность металла,  $F = 965000$  (число Фарадея).

Электрохимический эквивалент сплава  $\kappa$  выражается через эквиваленты компонентов сплава  $K_i$  и их массовое содержание  $C_i$  по формуле

$$\kappa = \left( \sum_i c_i / \kappa_i \right)^{-1}.$$

Так как электрохимические эквиваленты компонентов сплава различны, то и скорость анодного растворения этих компонентов будет различной. За счет этого в процессе обработки возникают углубления и выступы, формирующие макропрофиль и шероховатость поверхности.

Если в уравнении (6.1) выразить массу материала через площадь обрабатываемого участка  $S$ , перемещение  $l$  электрода-инструмента к поверхности и плотность материала  $\rho$  и, кроме того, учесть, что  $I = jS$ , а линейная скорость анодного растворения  $v = l/t$ , получим  $v = j\kappa/\rho$ . Используя закон Ома для зазора с электролитом  $j = \sigma U/d$ , получаем

$$v = \kappa \sigma U / \rho d, \quad (6.2)$$

где  $d$  — величина зазора между инструментом и деталью,  $U$  — величина падения напряжения на этом участке.

Таким образом, скорость линейного растворения материала анода пропорциональна электропроводности электролита и приложенной разности потенциалов и обратно пропорциональна величине зазора между поверхностями детали и инструмента. Скорость растворения зависит и от свойств растворяемого материала. Она прямо пропорциональна величине электрохимического эквивалента и обратно пропорциональна плотности материала.

Необходимым для осуществления стационарного режима обработки является условие удаления продуктов обработки из

прианодной и прикатодной областей. Это обычно достигается принудительной прокачкой электролита через зазор. Следовательно, помимо электрохимических явлений определяющее влияние на механизм обработки оказывают гидродинамические явления в зоне обработки.

На рис. 6.3 схематически показана зависимость силы тока от разности потенциалов при постоянной площади обрабатываемой поверхности. Участок АБ, получивший название *активной области*, характеризует анодное растворение элементов сплава заготовки с низкой валентностью. На этом участке сила тока

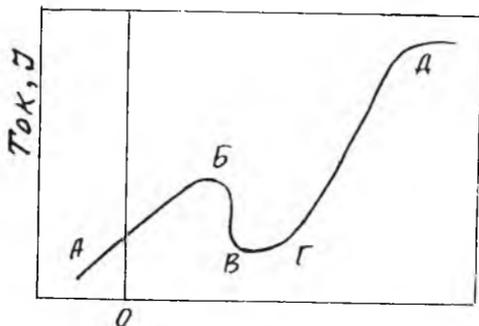


Рис. 6.3. Сила тока при ЭХО в зависимости от разности потенциалов

мала, а, следовательно, мала и скорость обработки, поэтому в процессе ЭХО эта область практически не используется. На участке БВ начинается уменьшение силы тока при возрастании напряжения, которое объясняется образованием на поверхности заготовки оксидной пленки — пассивация поверхности. При дальнейшем увеличении напряжения сила тока сначала остается неизменной (участок ВГ), а затем вновь возрастает (участок ГД). Этот участок называется *перепассивной областью* и как правило используется для ЭХО. Рост силы тока объясняется химическими превращениями в пленке и ее разрушением. В перепассивной области атомы металла переходят в ионы высшей валентности. Часто для устранения явления пассивации при ЭХО обработку ведут при повышенных температурах или с наложением ультразвуковых колебаний. В этом случае эффективность разрушения оксидной пленки резко возрастает, что способствует возникновению скорости растворения металла.

### 6.3. КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ ПОСЛЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Формирование микрорельефа поверхности после ЭХО зависит от структуры материала заготовки, химического состава и скорости прокатки электролита, температуры процесса и электрических параметров режима обработки. Характер микронеровностей поверхности формируется в результате преимущественного растравливания материала по границам кристаллического зерна, а в случае наличия в материале нескольких фаз — по фазе с большей величиной электрохимического эквивалента. При этом в материале возникает структура микронеровностей, существенно отличающихся по характеру от структуры микронеровностей после механической обработки. Это отличие в основном характеризуется наличием в поверхности после ЭХО узких, глубоких каналов, возникающих на междокристаллической границе. Надо отметить, что существующие методы контроля шероховатости позволяют только частично оценить глубину таких каналов, так как игла профилографа не достигает крайней точки углубления. Чем меньше зерно, тем меньше глубина междокристаллического растравливания. Поэтому шероховатость поверхности у крупнозернистых сплавов обычно выше, чем у сплавов с мелким зерном. По этой причине при обработке в электролитах на базе хлорида натрия шероховатость поверхности конструкционных сталей  $R_a = (0,32 \dots 0,10)$  мкм, нержавеющей сталей и сплавов  $R_a = (1,25 \dots 0,32)$  мкм, титановых сплавов  $R_a = (2,5 \dots 1,25)$  мкм, алюминиевых  $R_a = (2,5 \dots 0,63)$  мкм.

Для большинства сплавов с увеличением плотности тока шероховатость поверхности уменьшается, что связано с повышением скорости анодного растворения зерна. При высоких плотностях тока наблюдается преимущественное растравливание поверхности по зерну, а не по междокристаллической границе. Так, например, при изменении плотности тока от  $0,05 \text{ А/мм}^2$  до  $0,2 \text{ А/мм}^2$  величина  $R_z$  никелевого сплава изменяется от  $(5 \dots 6)$  мкм до  $(0,4 \dots 0,3)$  мкм. В связи с этим ЭХО часто проводят не в стационарном, а в импульсном режиме, характеризуемом большей плотностью тока в импульсе, при этом шероховатость снижается до 30%.

Повышение температуры электролита увеличивает не только скорость обработки, но и шероховатость поверхности из-за интенсификации диффузионных процессов.

Большое влияние на шероховатость поверхности на начальном этапе ЭХО оказывает вид предшествующей обработки поверхности. После точения, например, необходимо удалить с помощью ЭХО припуск в 6 — 10 раз больший, чем начальная вы-

сота неровностей. Только после этого перестает сказываться влияние обработки, предшествующей ЭХО, и стабилизируется величина шероховатости поверхности.

После ЭХО в поверхностном слое не наблюдается снижение содержания углерода и изменение твердости. В отличие от механической обработки после ЭХО отсутствует наклеп, однако из-за растравливания остаточные напряжения в поверхностном слое возрастают. Как отмечалось, при анодном растворении на поверхности катода выделяется водород. Из-за малого зазора между катодом и анодом наблюдается наводороживание поверхности заготовки. Особенно сильно наводороживание влияет на титановые сплавы, повышая их хрупкость и снижая усталостную прочность.

ЭХО оказывает различное влияние на изменение механических свойств детали. Более низкая шероховатость поверхности после ЭХО по сравнению с поверхностью после мехобработки, а также отсутствие следов инструмента на поверхности способствуют повышению технических свойств материала. Отсутствие же наклепа, наводороживание и наличие микрорастравливания по границам зерен ухудшает механические свойства. Так, предел прочности образцов из конструкционных сталей при статических и ударных нагрузках практически не изменяется из-за взаимной компенсации положительных и отрицательных факторов. В то же время, у образцов из сплавов, склонных к межкристаллитному растравливанию (никелевых, титановых и др.), предел прочности на растяжение после ЭХО снижается по сравнению с механической обработкой на 10 -- 15%. Поэтому у тяжелонагруженных деталей из таких сплавов после ЭХО необходимо механически удалить припуск — дефектный слой. Для никелевых сплавов этот припуск составляет 0,15 мм, а для титановых — не менее 0,3 мм.

По значению предела выносливости образцы из конструкционных сталей и алюминиевых сплавов после ЭХО близки к шлифованным образцам. Детали из никелевых, титановых и некоторых других сплавов имеют пониженное сопротивление усталости из-за наличия концентраторов напряжений в зонах растравливания. Такие детали подвергаются последующей механической обработке — полированию. Обычно используется виброполирование, которое позволяет снять растравленный слой и выполнить наклеп поверхности.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 3.1109 — 82. Единая система технологической документации. Термины и определения основных понятий.
2. *Пытьев П. Я.* Структура, содержание и общие принципы проектирования технологических процессов изготовления летательных аппаратов: Учебное пособие; Куйбыш. авиац. ин-т. Куйбышев, 1985. 91 с.
3. *Подураев В. Н.* Технология физико-химических методов обработки. М.: Машиностроение, 1985. 263 с.
4. *Абибов А. Л.* и др. Технология самолетостроения. М.: Машиностроение, 1982. 426 с.
5. *Бусленко Н. П.* Моделирование сложных систем. М.: Наука, 1978. 400 с.
6. *Рыкалин Н. Н., Углов А. А., Анищенко Л. М.* Высокотемпературные технологические процессы. М. Наука, 1986. 171 с.
7. *Бордаков П. А.* Планирование эксперимента в технических исследованиях производства летательных аппаратов; Куйб. авиац. ин-т. Куйбышев; 1986. 37 с.
8. *Сторожев М. В., Попов Е. А.* Теория обработки металлов давлением. М.: Машиностроение, 1977. 423 с.
9. *Кравченко Б. А.* Теория формирования поверхностного слоя деталей машин при механической обработке; Куйб. авиац. ин-т. Куйбышев, 1981. 90 с.
10. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов. Учебное пособие (в 2-х томах)./ Под ред. *В. П. Смоленцева.* М.: Высшая школа, 1983. Т1. 247 с., Т2. 208 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
1. Структура и содержание технологических методов обработки материалов	5
1.1. Основные понятия технологического процесса, его структура и содержание	5
1.2. Средства технологического оснащения техпроцесса	9
1.3. Понятие о технологическом методе	9
1.4. Технологические методы обработки материалов и их классификация	10
1.5. Общие характеристики технологических методов	14
2. Основы системного анализа технологических и физико-химических процессов	18
2.1. Основные понятия системного анализа	18
2.2. Основные методы и этапы моделирования сложных систем	25
2.3. Применение математических моделей для управления и проектирования технологических процессов	29
2.4. Структуризация технологической системы обработки материалов	30
3. Физико-химические основы механической обработки материалов	32
3.1. Основные сведения о методах обработки материалов давлением	32
3.2. Основные сведения о методах обработки материалов резанием	35
3.3. Системный подход к анализу технологического метода механической лезвийной обработки	39
3.4. Основные закономерности механики процесса резания лезвийным инструментом	43
3.5. Качество поверхностного слоя после лезвийной обработки	53
4. Физико-химические основы химических методов обработки материалов	51
5. Физико-химические основы термических методов обработки материалов	56
6. Физико-химические основы электрохимической обработки материалов	58
6.1. Основные сведения об электрических методах обработки материалов	58
6.2. Анодное растворение металлов	60
6.3. Качество поверхности после электрохимической обработки	64
Б и б л и о г р а ф и ч е с к и й   с п и с о к	66

*Валерий Иосифович Богданович,  
Виталий Алексеевич Барвинок,  
Аркадий Григорьевич Цидулко*

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МЕТОДОВ  
ОБРАБОТКИ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ПРОИЗВОДСТВЕ  
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Редактор Е. Д. Антонова  
Техн. редактор Н. М. Каленюк  
Корректор Н. С. Куприянова

Свод. тем. пл. № 124

Сдано в набор 21.08.89 г. Подписано в печать 27.09.89 г.  
ЕО 00298. Формат 60 × 84 1/16. Бумага оберточная.  
Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. п. л. 4,1.  
Уч.-изд. л. 4,0. Т. 500 экз. Заказ 725.  
Цена 20 коп.

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени авиационный институт имени академика С. П. Королёва, 443086, Московское шоссе, 34.

---

Тип. ЭОЗ Куйбышевского авиационного института, 443001,  
г. Куйбышев, ул. Ульяновская, 18.