Министерство образования и науки Российской Федерации
Омский государственный технический университет

А.П. Моргунов, И.В. Ревина

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ОТРАСЛИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

Учебное пособие

ОМСК- 2017

1. ОСНОВЫ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ…….5
1.1. Место САПР ТП в системе технологической подготовки ……..5 производства и жизненном цикле изделия
1.1.1. Понятие о технологическом процессе……5
1.1.2. Состав технической подготовки производства……6
1.1.3. Блок-схема функций технологической подготовки производства……8
1.1.4. Средства автоматизации функций и задач технологической подготовки производства……11
1.1.5. Место САПР технологической подготовки производства в системе комплексной автоматизации процессов проектирования и производства ……12
1.2 Место САПР ТП в жизненном цикле изделия ……19
1.2.1. Классификация САПР в литературе……19
1.2.2. Связи этапов жизненного цикла изделий и автоматизированных систем……19
1.2.3. Метод использования аналогов……20
1.2.4. Метод проектирования на основе типизации……21
1.2.5. Метод синтеза……21
1.3. Установление маршрутов обработки отдельных поверхностей……..22
1.3.1 Основные факторы, влияющие на маршрут обработки поверхности детали……22
1.3.2 Определение вариантов обработки поверхности с применением графов……23
1.3.3 Выбор оптимального маршрута обработки поверхности ……26
1.4 Проектирование ТП в пределах этапа обработки……27
1.4.1 Уточнение методов обработки и выбор оборудования……27
1.4.2 Выбор технологических баз и типа приспособления…… 30
1.4.3. Формирование последовательности операций……32
1.4.4 Формирование структуры операций……33
2. ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ……35
2.1. Электроэрозионная обработка ……35
2.1.1. Основные понятия……35
2.1.2 Протекание электрического разряда в диэлектрической жидкой среде……37
2.1.3 Генераторы импульсов……38
2.1.4 Форма и параметры импульсов……39
2.1.5 Электрические параметры электроэрозионного процесса ……41
2.1.6. Электроискровая и электроимпульсная обработка. ……42
2.1.7 Классификация импульсов по признаку прохождения через межэлектродный промежуток……42

2.1.8 Эрозионная обрабатываемость материалов. Критерий Палатника …….44
2.1.9 Полярный эффект. Относительный износ электродов……..44
2.1.10 Технологические характеристики электроэрозионной обработки ……45
2.1.11 Термохимические процессы в межэлектродном промежутке……50
2.1.12 Гидродинамические процессы, происходящие в межэлектродном промежутке в результате электрических разрядов……51
2.1.13 Способы интенсификации процесса эвакуации продуктов эрозии из зоны обработки……52
2.1.14 Рабочие среды……53
2.1.15 Электрод-инструмент……55
2.1.16 Оборудование……57
2.2. Лазерная обработка……59
2.2.1 Общие сведения о лазерах ……59
2.2.2 Принцип работы лазеров……60
2.2.3 Основные свойства лазерного излучения ……65
2.2.4 Промышленные лазерно-технологические системы (комплексы), применяемые для обработки материалов……65
2.2.5 Лазерная резка материалов……67
2.2.6 Лазерная сварка……71
2.2.7 Лазерная маркировка……72
2.2.8. Лазерное упрочнение……73
2.3. Электрофизические методы упрочнения……74
2.3.1. Методы детонационного и плазменного нанесения покрытия ……74
2.3.2. Упрочнение методами воздействия магнитного поля…… 76
2.3.3. Вакуумное ионно-плазменное упрочнение……78
2.3.4.. Ионное распыление……79
2.3.5. Магнетронное распыление……80
2.3.6. Ионное осаждение покрытий……82
2.3.7. Ионно-диффузионное насыщение……82
2.3.8. Ионное легирование (имплантация……83
3. ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ……84
3.1. Основные процессы и явления при взаимодействии ускоренных электронов с твердым телом……84
3.1.1. Общая характеристика процессов при взаимодействии электронов с твердым телом……84
3.1.2. Распределение поглощенной энергии электронов в мишени……92
3.1.3. Тепловые процессы в зоне электронно-лучевого воздействия……94
3.1.4 Мощность и ее распределение……101
3.1.5. Нетермические воздействия электронного луча……102
3.2. Технологические процессы электронно-лучевой обработки……104
3.2.1. Электронно-лучевая плавка……104

3.2.2. Электронно-лучевая сварка……..…109
3.2.3 Электронно-лучевое испарение материалов……..…121
3.2.4. Электронно-лучевая размерная обработка……135
3.2.5. Электронно-лучевая термообработка……141
4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СОВРЕМЕННЫХ АВИАЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ……..…145
4.1. Общие сведения…….145
4.2. Материалы для планера самолетов и вертолетов……..…..145
4.2.1. Алюминиевые сплавы…….……..146
4.2.2. Высокопрочные титановые сплавы……..…147
4.2.3. Конструкционные стали……..…148
4.2.4. Полимерные композиционные материалы (ПКМ) …….....149
4.3. Материалы для газотурбинных двигателей (ГТД) …….…152
4.4. Материалы для приборов и агрегатов……...156
5. НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ……..……..158
5.1. Исторические предпосылки развития нанотехнологий
и наносистем…….158
5.2 Общая классификация нанообъектов……..162
5.3 Наноматериалы……..164
5.3.1. Материалы на основе фуллеренов и нанотрубок. Графен……164.
5.3.2. Биомитетические материалы…….……..168
5.3.3. Нанокерамика…….……...172
5.3.4. Квантовые точки и программируемая материя…….……..173
5.4. Физико-химические основы формирования нанопористых структур…175
5.4.1. Общие сведения……175
5.4.2.Получение и применение нанопористых материалов…….……..176
5.4.3.Нанопористые углеродные материалы из химически модифицированных антрацитов ……183
5.5. Методы получения и свойства углеродных нанотрубок……184
5.5.1.Методы получения……....…184
5.5.2.Структура…….…….…186
5.5.3. Электрические свойства……187
5.5.4. Механические свойства……..……..189
5.6..Проблема безопасности нанотехнологии……...……191
5.7. Постановка задач развития нанотехнологий в России……..…..…192

1. ОСНОВЫ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

1.1. Место САПР ТП в системе технологической подготовки производства и жизненном цикле изделия

1.1.1. Понятие о технологическом процессе

Под системой автоматизированного проектирования понимается комплекс средств автоматизации проектирования, взаимосвязанных с необходимыми подразделениями проектной организации или коллективом специалистов (пользователем системы), выполняющей автоматизированное проектирование. САПР классифицируются по нескольким признакам, наиболее важным из которых является тип объекта проектирования. Таким образом, в САПР ТП объектом проектирования является технологический процесс.

Технологический процесс (ТП) – это часть производственного процесса, содержащая целенаправленные действия по изменению и (или) определению состояния предмета труда (заготовки) и получению изделия с заданными свойствами. Технологический процесс может быть отнесен к изделию, его состав-ной части или к методам обработки, формообразования и сборки. Частным случаем технологического процесса является ТП механической обработки, под которым понимают часть производственного процесса, включающую в себя последовательные действия по преобразованию исходной заготовки в готовую деталь путем изменения формы, размеров, состояния поверхностей обработкой металлообрабатывающими инструментами. Цель проектирования ТП (цель разработки его описания) – получение для инженерно-технического персонала и рабочих производственных подразделений (цехов, участков) достаточно подробного описания технологических приемов изготовления изделия, с указанием порядка их выполнения и расчетными значениями норм расхода материалов, времени, режимов обработки.

При выполнении ТП происходит изменение состояния предмета труда (заготовки), приводящее к получению изделия. При этом к «предметам труда» в равной степени относятся заготовки, детали и изделия.

Описание ТП – это представленное на некотором языке изложение способа изготовления изделия. Оно состоит из упорядоченного набора описаний технологических приемов, включающего в себя сведения о типах и режимах работы, используемых средствах технологического оснащения, технологических инструкциях, нормах времени и нормах расхода материалов.

Описание ТП содержится в технологических документах, объединенных в комплект. Состав комплекта зависит от степени детализации описания, регламентированной нормативными документами и зависящей от типа производства. Чем тип производства ближе к крупносерийному и массовому, тем подробнее описание и тем большее количество документов входит в комплект.

Для подготовки предприятия к выпуску новой продукции необходимо выполнить комплекс работ. Эти работы называют технической подготовкой производства.

1.1.2. Состав технической подготовки производства

Подготовка производства способствует непрерывному техническому прогрессу, выпуску высокоэффективной новой техники, созданию условий для эффективной работы предприятия. Техническая подготовка производства состоит из следующих трех частей:

- конструкторская подготовка;
- организационная подготовка;
- технологическая подготовка.

Рис. 1.1 Структура технической подготовки производства

Конструкторская подготовка производства – это совокупность работ по проектированию новой или совершенствованию конструкции выпускаемой продукции.

Организационная подготовка производства предусматривает комплекс мер по планированию и организации производства новой продукции, а также обеспечению процесса ее изготовления всеми необходимыми ресурсами. Этот этап подготовки производства зависит от новизны, объема производства, сложности и других параметров новой продукции и потому является очень ответственным.

Технологическая подготовка производства (ТПП) представляет собой совокупность мероприятий, обеспечивающих технологическую готовность производства. При этом под технологической готовностью производства понимается наличие на предприятии полных комплектов конструкторской и технологической документации и средств технологического оснащения, необходимых для осуществления заданного объема выпуска продукции с установленными технико-экономическими показателями.

Задачей технологической подготовки производства является законченная часть работ в составе определенной функции технологической подготовки производства.

Выявленные в результате структуризации видов деятельности функции и задачи системы ТПП приведены в табл. 1.1

Таблица 1.1.

Состав задач по функциям ТПП

Функции	Задачи
Обеспечение технологичности изделия	Разработка: ✓ карты проработки изделия на технологичность (КПИТ) ✓ протокола согласования конструкции на технологичность (ПСКТ)
Технологический анализ производства	Разработка: ✓ ведомости производственной характеристики ✓ планировки размещения оборудования Расчет производственной мощности Разработка плана модернизации производства
Структурный анализ изделия	Разработка ведомостей: ✓ классификационной структуры конструкции и состава изделия ✓ заимствованных деталей и сборочных единиц ✓ деталей и сборочных единиц собственного изготовления ✓ покупных изделий
Организация и управление ТПП	Разработка: ✓ ведомости работ по функциям ТПП ✓ графика выполнения функций ТПП
Проектирование технологических процессов	Разработка: ✓ комплектов технологической документации ✓ управляющих программ и документации на операции, выполняемые на оборудовании с ЧПУ ✓ заданий на проектирование средств технологической оснастки ✓ норм расхода материалов для деталей собственного изготовления
Разработка технологических нормативов	Разработка ведомостей: ✓ потребности в заимствованных и покупных изделиях ✓ потребности в средствах технологического оснащения ✓ сводных норм расхода материалов ✓ трудозатрат по профессиям и разрядам
Проектирование технологической оснастки и технологических процессов ее изготовления	Разработка: ✓ конструкций средств технологической оснастки ✓ технологических процессов изготовления технологической оснастки ✓ норм расхода материалов на технологическую оснастку ✓ ведомости трудозатрат по профессиям и разрядам на изготовление технологической оснастки

Блок-схема функций технологической подготовки производства представлена на рис. 1.2, где представлены внешние и внутренние связи.

1.1.3. Блок-схема функций технологической подготовки производства

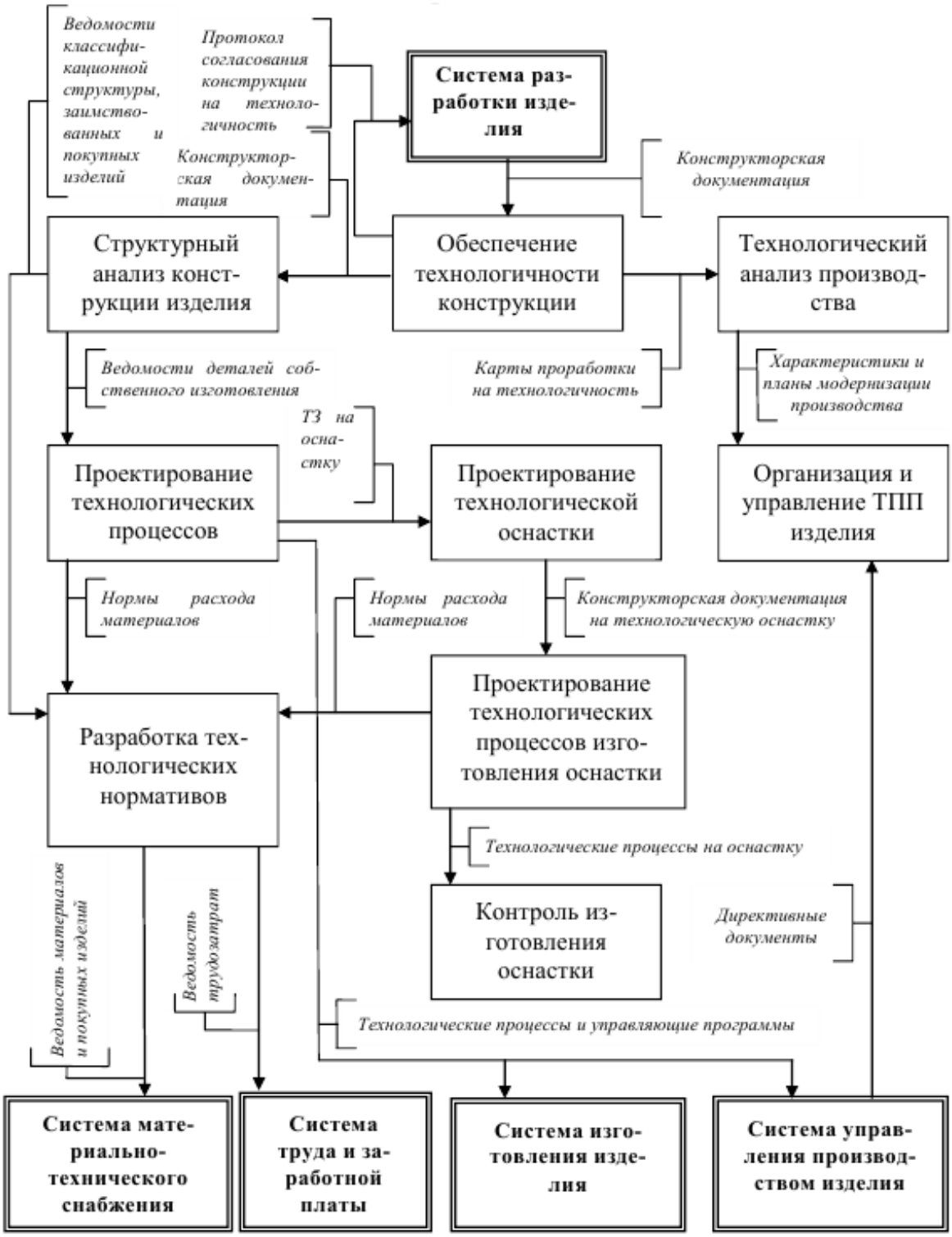


Рис. 1.2. Блок-схема функций технологической подготовки производства

Внешние связи системы ТПП организуются следующим образом.

По первому каналу связи система управления производством оказывает управляющее воздействие на систему ТПП, которое поступает в виде директивных документов с оперативно-управленческой информацией. На ее основании реализуется функция организации и управления ТПП, вырабатывается график последовательности их выполнения. В обратном направлении, т.е. из системы ТПП в систему управления производством, поступает информация о структуре технологических процессов, в виде маршрутных и операционных описаний.

Второй канал – связь с системой разработки конструкций изделий. По нему информация в виде конструкторской документации поступает в систему ТПП. В результате выполнения функции обеспечения технологичности в системе ТПП вырабатывается информация в виде протокола согласования конструкции на технологичность, который возвращается в систему разработки конструкции и служит основанием для доработки конструкции и карты проработки изделия на технологичность, используемой при выполнении функции технологического анализа производства.

Третий канал – связь с системой материально-технического снабжения – построен на базе трех направлений. По первому ведомости норм расхода материалов и покупных изделий поступают из системы ТПП после выполнения функции разработки технологических нормативов в систему материально-технического снабжения. По второму направлению информация о нормах расхода материалов, комплектующих и покупных изделий для изготовления средств технологического оснащения, поступает из системы ТПП после выполнения функции проектирования технологических процессов изготовления средств технологического оснащения в систему материально-технического снабжения. По третьему направлению материалы, комплектующие и покупные изделия, необходимые для изготовления изделия и средств технологического оснащения поступают из системы материально-технического снабжения в системы изготовления изделия и средств технологической оснастки.

Четвертый канал – связь с системой труда и заработной платы. По этому каналу информация о трудозатратах на изготовление изделий, в виде ведомости с указанием профессий и разрядов поступает из системы ТПП после выполнения функции разработки технологических нормативов в систему труда и заработной платы.

Пятый канал – связь с системой изготовления. По нему из системы ТПП передается информация о структуре технологических процессов в виде комплекта технологической документации и программ для оборудования с ЧПУ, а также средства технологического оснащения.

Внутренних связей и функции системы ТПП

Функция обеспечения технологичности конструкций выполняется на основании анализа документации, поступающей из системы разработки конструкций. При ее реализации осуществляется взаимосвязанное решение конструкторских и технологических задач, направленных на повышение производительности труда, достижение оптимальных трудовых и материальных затрат. Результатами этой работы являются протокол согласования и карта технико-экономической проработки изделия на технологичность. Протокол отражает взаимодействие по каналу связи между системой ТПП и системой разработки конструкций. Карта технико-экономической проработки используется при технологическом анализе производства с целью его совершенствования.

Получаемая в результате выполнения функции технологического анализа производства информация в виде ведомости производственной характеристики цеха (завода), планировки размещения оборудования и результатов расчета производственной мощности используется при выполнении функции организации и управления ТПП при планировании модернизации производственной структуры.

Функция структурного анализа изделия выполняется на основании информации, поступающей в виде конструкторской документации, проанализированной на технологичность. На этом этапе классифицируются структурные составляющие конструкции изделия. В результате выполнения функции в системе ТПП генерируется информация о структурных составляющих конструкций и входящих в них покупных изделиях в виде следующих ведомостей: классификационной структуры изделия; его состава; заимствованных деталей и сборочных единиц; покупных изделий; деталей собственного изготовления. Эта информация используется при выполнении функций разработки технологических нормативов и технологических процессов, а также функции организации и управления ТПП.

Функция организации и управления ТПП выполняется на основании информации, поступающей из системы управления производством. При этом генерируются управляющие воздействия в виде графика выполнения функций и ведомости объемов работ по каждой функции.

Функция проектирования технологических процессов выполняется на основании информации, поступающей после выполнения функций структурного анализа изделий, технологического анализа производства, а также организации и управления ТПП. В результате выполнения функции генерируется информация о технологических процессах. Помимо этого, при выполнении функции проектирования технологических процессов генерируется информация об обработке деталей на оборудовании с ЧПУ в виде управляющих программ и технологической документации, а также

технические задания для выполнения функции проектирования средств технологического оснащения.

Функция разработки технологических нормативов выполняется на основании информации, поступающей после выполнения функций проектирования технологических процессов, структурного анализа изделия, проектирования технологических процессов изготовления технологической оснастки, а также функции организации и управления ТПП. При выполнении функции разработки технологических нормативов информация генерируется в виде ведомостей: потребности в заимствованных и покупных изделиях, потребности в средствах технологического оснащения, сводных норм расхода материалов и трудозатрат по профессиям и разрядам. Эта информация передается из системы разработки технологических нормативов в систему управления производством и систему труда и заработной платы.

Функция проектирования средств технологического оснащения (СТО) выполняется на основании информации о технических требованиях, предъявляемых к этим средствам в технических заданиях на проектирование. При выполнении данной функции генерируется информация о конструкции СТО в виде конструкторской документации.

Функция проектирования технологических процессов изготовления СТО выполняется на основании информации о конструкции технологической оснастки, получаемой в результате выполнения функции проектирования СТО и функции управления и организации ТПП. При выполнении данной функции генерируется информация о технологии изготовления СТО в виде маршрутных карт, нормах расхода материалов, а также информация о трудозатратах по профессиям и разрядам при изготовлении СТО.

Функция контроля изготовления СТО выполняется на основании информации о технологии изготовления и графика работ по ТПП. При выполнении функции осуществляется контроль изготовления СТО на участке подготовки производства или на специализированном предприятии .

В результате выполнения функций система ТПП создает информационный базис в виде нормативно-технических данных, необходимых для организации управления производственным процессом, включая экономику и материально-техническое снабжение. Таким образом, от качества управляющей информации, создаваемой в системе технологической подготовки производства, в большой степени зависят технико-экономические показатели и эффективность всего производства

1.1.4. Средства автоматизации функций и задач технологической подготовки производства

Автоматизировать ТПП – это в комплексе автоматизировать выполнение ее функций и задач.

По своим свойствам функции и задачи неоднородны и автоматизируются с использованием различных методов и средств.

На рис. 1.3 указаны основные системы, с помощью которых реализуется автоматизация функций ТПП. К средствам автоматизации относятся:

- ИПС – информационно-поисковые системы;
- АССА – автоматизированная система структурного анализа;
- САПР ТП – система автоматизированного проектирования ТП;
- САПР СТО – система автоматизированного проектирования конструкций СТО;
- САП – система автоматизированного программирования управляющих программ для программно-управляемого оборудования;
- АСУ ТПП – автоматизированная система управления ТПП.

Данные системы входят в состав САПР при ТПП и являются ее подсистемами.

Рис. 1.3 Средства автоматизации функций и задач технологической подготовки производства

Исследования показывают, что затраты времени (трудоемкость), приходящиеся на ТПП для различных типов производства составляют для серийного производства – 40-50% и 60-70% – для крупносерийного. Из этого можно заключить, что ТПП является основной частью технической подготовки производства.

1.1.5. Место САПР технологической подготовки производства в системе комплексной автоматизации процессов проектирования и производства

Одним из направлений повышения конкурентоспособности отечественных предприятий является переход от отдельных замкнутых САПР и их частичного объединения к полной интеграции технической и организационной сфер производства. Такая интеграция связывается с разработкой системы комплексной автоматизации процессов проектирования, изготовления и испытания изделий, для которой характерны:

− переход к крупномасштабным автоматизированным системам конструкторско-исследовательским отделам, автоматизированным участкам и испытательным стендам,

− постепенная интеграция системы проектирования и изготовления в целостные научно-производственные комплексы.

Структурная схема системы комплексной автоматизации процессов проектирования, изготовления и испытания изделий представлена на рис. 1.4.

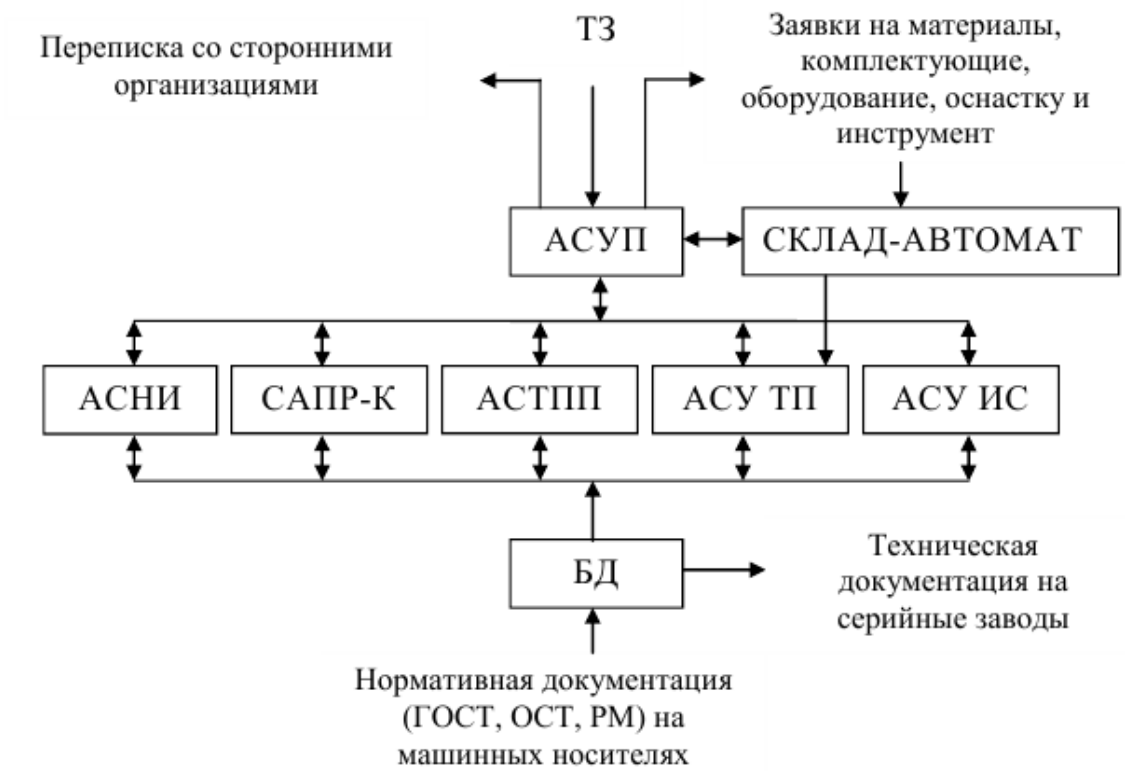


Рис. 1.4 Структурная схема системы комплексной автоматизации процессов проектирования, изготовления и испытания изделий

Анализ структурной схемы однозначно определяет соответствие между автоматизированными системами и подразделениями-пользователями. Например, управленческие подразделения являются пользователями автоматизированной системы управления предприятием (АСУП), конструкторско-исследовательские подразделения − автоматизированной системы научных исследований (АСНИ) и системы автоматизированного проектирования конструкции изделия (САПР-К), технологические подразделения − системы

автоматизированного проектирования в ТПП (САПР в ТПП); производственные подразделения − автоматизированной системы управления технологическими процессами (АСУ ТП), испытательные подразделения − автоматизированной системы испытаний (АСУ ИС); подразделения стандартизации и технической документации − информационной поисковой системы, работающей с базой данных (БД).

1.2 Место САПР ТП в жизненном цикле изделия

1.2.1. Классификация САПР в литературе.

В зависимости от объекта проектирования САПР принято делить, по крайней мере, на два основных вида:

1) САПР изделий;

2) САПР технологических процессов.

САПР изделий. В зарубежной литературе эти системы называют CAD (*Computer-Aided Design*). Здесь *Computer* – компьютер, *Aided* – с помощью, Design – проект, проектировать. Таким образом, термин CAD можно перевести как «проектирование с помощью компьютера». Эти системы выполняют объемное и плоское геометрическое моделирование, инженерные расчеты и анализ, оценку проектных решений, изготовление чертежей.

Современные САПР используются совместно с системами автоматизации инженерных расчетов и анализа *CAE*, либо внутри себя содержат интегрированные средства автоматизации инженерных расчетов и анализа. Данные из *CAD*-системы передаются в *CAM*-систему автоматизированной разработки управляющих программ для оборудования с ЧПУ или ГАПС (Гибких автоматизированных производственных систем). Работа с САПР обычно подразумевает создание геометрической модели изделия (двумерной или трехмерной, твердотельной), генерацию на основе этой модели конструкторской документации (чертежей изделия, спецификаций и проч.) и последующее его сопровождение.

Следует отметить, что русский термин «САПР» по отношению к промышленным системам имеет более широкое толкование, чем CAD – он включает в себя CAD, CAM и CAE.

САПР технологии изготовления. В странах бывшего Советского Союза эти системы принято называть САПР ТП или АС ТПП. В зарубежной литературе их называют CAPP (*Computer Automated Process Planning*). Здесь *Automated* – автоматический, *Process* – процесс, *Planning* – планировать, планирование, составление плана. С помощью этих систем разрабатывают технологические процессы и оформляют их в виде маршрутных, операционных, маршрутнооперационных карт, проектируют технологическую оснастку, разрабатывают управляющие программы (УП) для станков с ЧПУ.

Более конкретное описание технологии обработки на оборудовании с ЧПУ (в виде кадров управляющей программы) генерируется автоматизированной системой управления производственным оборудованием (АСУПР),

которую в зарубежной литературе принято называть *CAM* (*Computer-Aided Manufacturing*). Здесь *Manufacturing* – производство, изготовление. Техническими средствами, реализующими данную систему, могут быть системы ЧПУ станков, компьютеры, управляющие автоматизированными станочными системами. В некоторых источниках под термином *CAM* понимают подготовку технологического процесса производства изделий, ориентированную на использование средств вычислительной техники, и включающую не только сам процесс компьютеризированной подготовки производства, но и программно-вычислительные комплексы, используемые технологами-проектировщиками. Фактически же технологическая подготовка сводится к автоматизации разработки управляющих программ для оборудования с ЧПУ (2- осевые лазерные станки), (3- и 5-осевые фрезерные станки с ЧПУ; токарные станки; обрабатывающие центры; автоматы продольного точения и токарно-фрезерной обработки). Как правило, большинство программно-вычислительных комплексов совмещают в себе решение задач *CAD/CAM, CAE/CAM, CAD/CAE/CAM.*

Научно-исследовательский этап проектирования иногда выделяют в самостоятельную автоматизированную систему научных исследований (АСНИ) или, используя зарубежную терминологию, автоматизированную систему инжиниринга – *CAE* (*Computer Aided Engineering*). В более узком понимании *CAE* – общее название для программ или программных пакетов, предназначенных для инженерных расчетов, анализа и симуляции физических процессов. Расчетная часть пакетов чаще всего основана на численных методах решения дифференциальных уравнений (метод конечных элементов, метод конечных объемов, метод конечных разностей и др.). Современные системы автоматизации инженерных расчетов (*CAE*) применяются совместно с *CAD*-системами (зачастую интегрируются в них, в этом случае получаются гибридные *CAD/CAE*-системы). *CAE*-системы –это разнообразные программные продукты, позволяющие оценить, как поведёт себя компьютерная модель изделия в реальных условиях эксплуатации. Они позволяют проверить работоспособность изделия, без привлечения больших затрат времени и средств.

Помимо этого различают: систему производственного планирования и управления *PPS (Productions plans system),* что соответствует отечественному термину АСУП (автоматизированная система управления производством).

CAQ (Computer Aided Quality Control) – автоматизированная система управления качеством.

PDM (Product Data Management) – автоматизированная система управления производственной информацией. Аналог системы электронного документооборота.

CAD/CAM/CAE/PDM – комплексная система автоматизированного проектирования и производства.

CIM (*Computer Integrated Manufacturing*) – система интегрированного производства.

1.2.2. Связи этапов жизненного цикла изделий и автоматизированных систем

В международных стандартах серии ISO 9004 (управление качеством продукции) введено понятие «Жизненный Цикл Изделия» (ЖЦИ). Данное понятие включает в себя следующие этапы:

- Маркетинг (поиск и изучение рынка);
- Формулирование служебного назначения;
- Разработка концепции и технического задания (разработка технических требований к создаваемой продукции);
- Конструирование (проектирование и/или разработка конструкции создаваемой продукции);
- Технологическая подготовка производства (подготовка и разработка технологических процессов);
- Производство (изготовление изделия, контроль, проведение испытаний и обследований, упаковка и хранение, реализация и/или распределение продукции);
- Доставка изделий потребителю (монтаж);
- Эксплуатация (техническая помощь в обслуживании);
- Утилизация после завершения использования продукции

Интегрированная система *CAD/CAM*, схема которой представлена на рис. 1.5, на информационном уровне поддерживается единой базой данных. В ней хранится информация о структуре и геометрии изделия (как результат проектирования в системе *CAD*), о технологии изготовления (как результат работы системы САРР) и управляющие про граммы для оборудования с ЧПУ (как исходная информация для обработки в системе *CAM* на оборудовании с ЧПУ).

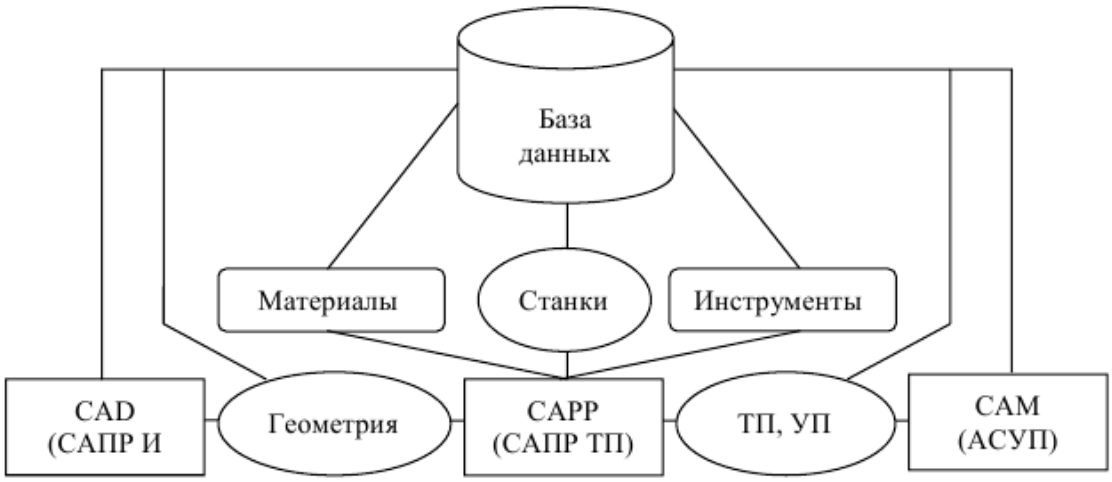


Рис. 1.5 Схема взаимосвязей элементов интегрированной системы

Этапы создания изделий могут перекрываться во времени, т.е. частично или полностью выполняться параллельно. На рис. 1.6 показаны связи этапов жизненного цикла изделий и автоматизированных систем, входящих в состав комплексного интегрированного производства (КИП) или в зарубежной версии *CIM (Computer Integrated Manufacturing).*

В структуре комплексного интегрированного производства, информационная модель которого представлена на рис. 1.7, выделяются три основных иерархических уровня:

1 Верхний уровень (уровень планирования), включающий в себя подсистемы, выполняющие задачи планирования производства.

2 Средний уровень (уровень проектирования), включающий в себя подсистемы проектирования изделий, технологических процессов, разработки управляющих программ для станков с ЧПУ.

3 Нижний уровень (уровень управления) включает в себя подсистемы управления производственным оборудованием.

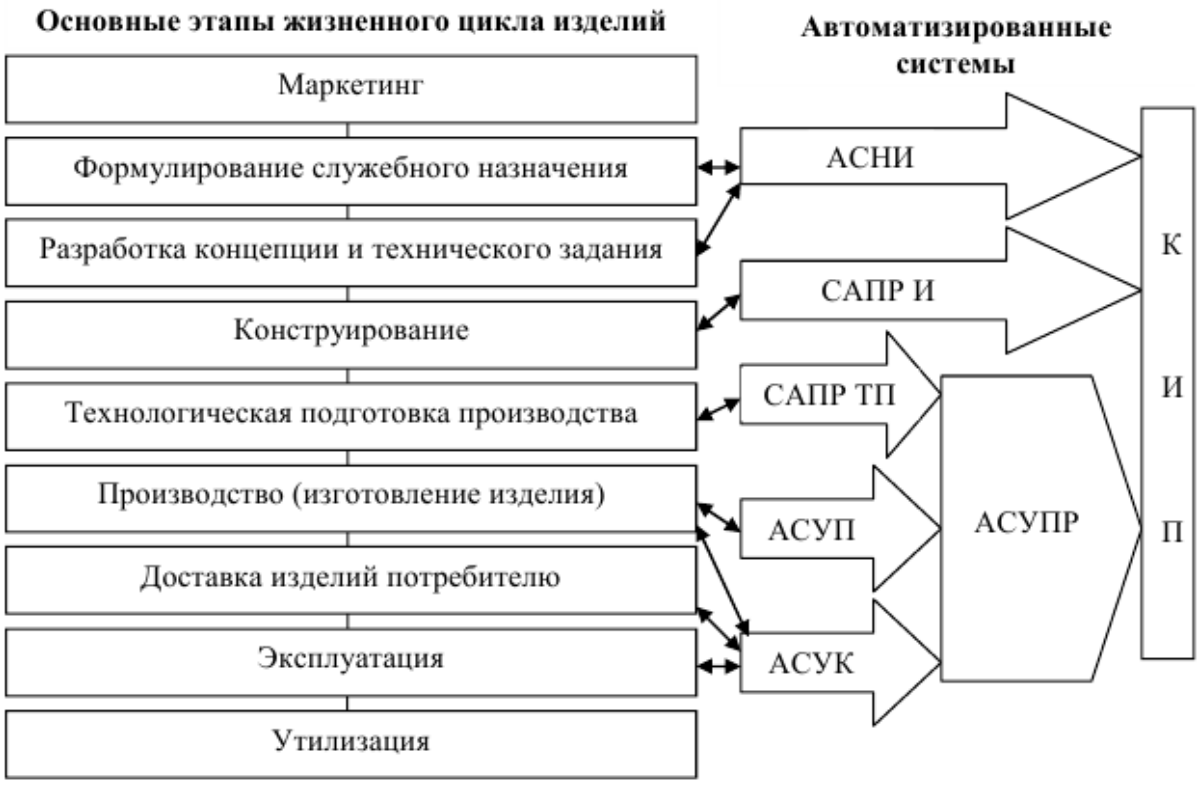


Рис. 1.6. Основные системы комплексного интегрированного производства

Построение комплексного интегрированного производства включает в себя решение следующих проблем:

− *информационного обеспечения* (отход от принципа централизации и переход к координированной децентрализации на каждом из рассмотренных

уровней как путем сбора и накопления информации внутри отдельных подсистем, так и в центральной базе данных);

− *обработки информации* (стыковка и адаптация программного обеспечения различных подсистем);

− *физической связи подсистем* (создание интерфейсов, т.е. стыковка аппаратных средств ЭВМ, включая использование вычислительных систем).

Внедрение комплексного интегрированного производства значительно сокращает общее время прохождения заказов за счет:

− уменьшения времени передачи заказов с одного участка на другой и уменьшения времени простоя при ожидании заказов;

− перехода от последовательной к параллельной обработке;

− устранения или существенного ограничения повторяемых ручных операций подготовки и передачи данных (например, машинное изображение геометрических данных можно использовать во всех отделах, связанных с конструированием изделий).

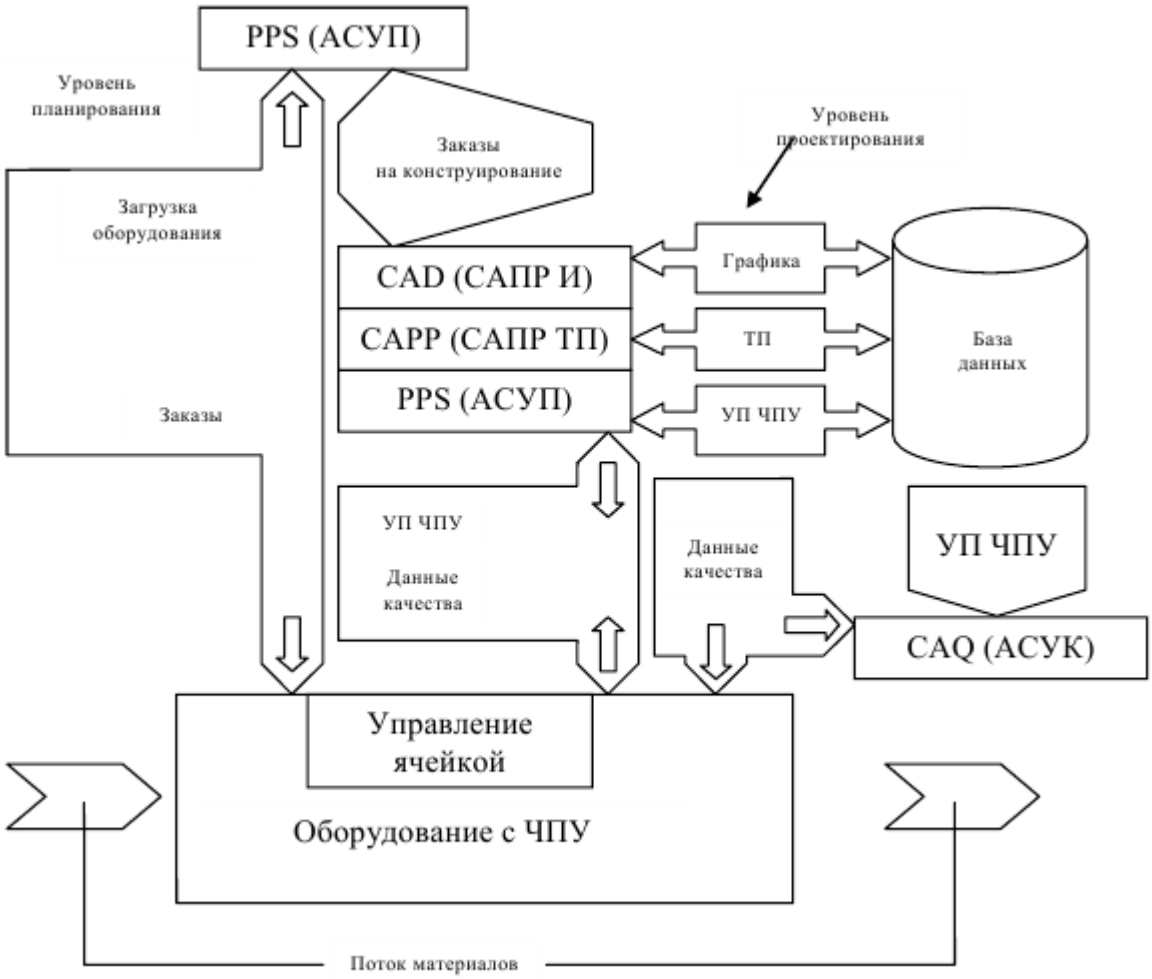


Рис. 1.7 Информационная модель комплексного интегрированного производства

1.2 Методы проектирования технологического процесса с использованием ЭВМ

1.2.1. Метод прямого документирования

Этот метод использует средства оформления документации, отбора информации из базы данных и предоставляет технологу следующие возможности:

− набора и корректировки текста проектного документа в специализированном редакторе;

− просмотра и распечатки данных, копирования, удаления записей по одной и блоками, нумерации переходов и операций;

− обращения к справочникам, базам данных средств оснащения, типовых текстов, нормативов;

− подключения новых справочных информационных массивов;

− формирования архива и работы с ним;

− автоматического формирования технологической документации.

Из перечня выполняемых функций видно, что уровень автоматизации очень низкий, а проектирование – трудоемкий процесс. При данном методе не требуется специальное описание информации о детали. Технолог работает с чертежом детали, как и в случае ручного проектирования, и все решения принимает сам. Данным методом можно получить ТП на любую деталь.

1.2.2. Параметрический метод

Сущность параметрического метода заключается в разделении функций между ЭВМ и человеком. Технологическое проектирование в этом случае состоит из двух этапов.

Первый этап – безмашинное проектирование ТП. На этом этапе вручную решаются следующие трудноформализуемые творческие по характеру задачи:

− формирование структуры ТП (технологического маршрута и последовательности переходов в операциях);

− выбор модели оборудования и методов обработки;

− выбор технологических баз, схем установки и типов приспособлений;

− установление размерной структуры ТП и технических требований на расположение поверхностей.

Второй этап – автоматизированное проектирование параметров ТП и отдельных операций. Он начинается с ввода в ЭВМ информации о детали (наименование, материал, твердость, покрытие и т.д.), структуре ТП (номер, наименование операций, переходов), размерной структуре. Затем в автоматическом режиме решаются следующие задачи проектирования:

− расчет припусков на обработку, операционных размеров и допусков на них;

− выбор средств технологического оснащения (режущего, вспомогательного и измерительного инструментов);

− расчет режимов резания и норм времени;

− формирование документации;

− формирование информации для АСУП.

Системы автоматизированного проектирования рассматриваемого типа легко адаптируются к производственным условиям, требуют введения небольшого объема исходных данных и легко воспринимаются технологами. С их помощью можно проектировать ТП для широкой номенклатуры деталей, включая и сложные. Однако эффективность решений в таких системах во многом зависит от квалификации технолога.

Как и в случае прямого документирования, здесь не требуется специальное описание информации о детали. Данные о детали и заготовке, необходимые для выполнения расчетов, вводятся по запросу системы в диалоговом режиме.

Системы параметрического проектирования являются автоматизированными системами низкого уровня, с которых целесообразно начинать автоматизацию технологического проектирования. Они помогают быстрее снять так называемый психологический барьер, существующий между технологом и вычислительной техникой, отработать организацию работ на предприятии при проектировании ТП с помощью ЭВМ, создать, отладить и освоить базы данных технологического назначения.

1.2.3. Метод использования аналогов

В основу метода использования аналогов положен принцип заимствования ранее принятых технологических решений. В процессе эксплуатации системы проектирования накапливаются типовые, групповые и единичные технологии, унифицированные операции, планы обработки конструктивных элементов и поверхностей. При формировании текущей технологии пользователю предоставлен доступ к соответствующим архивам и библиотекам, хранящим накопленные решения. Схема автоматизированного получения ТП в этом случае будет следующая: деталь → деталь-аналог → процесс на детальаналог → процесс на деталь.

Для нахождения детали-аналога необходимы анализ чертежа детали и определение класса, группы детали по конструктивным и технологическим признакам. Выбор детали-аналога и ТП на эту деталь производится по сформированному коду или текстовому описанию детали. ТП на деталь-аналог подвергается преобразованию на основе информационной модели текущей детали: структура ТП преобразовывается путем исключения лишних структурных элементов ТП (операций, переходов) или внесения необходимых элементов, если в ТП детали-аналога такие элементы структуры отсутствуют. Все эти действия выполняются по методике прямого документирования. Метод аналога чаще применяется при проектировании

ТП для деталей типовых форм, отличающихся только размерами (например, одновенцовые зубчатые колеса, валы-шестерни).

Метод требует ввода информации о детали на уровне конструкторско-технологического кода. Уровень автоматизации низкий, повышается производительность труда технолога, сокращаются сроки и трудоемкость технологической подготовки производства.

1.2.4. Метод проектирования на основе типизации

Метод проектирования на основе типизации и метод использования аналогов называют также методом анализа, или адресации. После ввода описания детали находится технологический процесс на аналогичную деталь или унифицированный ТП на комплексную деталь. Комплексная деталь – это абстрактная деталь, включающая все поверхности деталей, входящих в группу подобных деталей. Далее для формирования индивидуального ТП необходимо организовать вторую процедуру – анализ и доработку найденного аналогичного или унифицированного ТП на комплексную деталь в соответствии с чертежом текущей детали. В методе типизации используются все три уровня унификации обработки, и метод воплощает идею «от общего к частному».

Проектирование на основе унифицированных ТП является основным методом проектирования ТП при эксплуатации гибких производственных систем. Применение этого метода дает наибольший эффект при наличии на производстве групповых и типовых ТП, т.к. метод не нарушает существующей специализации производственных подразделений, упрощает процесс проектирования САПР, не требует трудноформализуемых процедур синтеза новых структур.

1.2.5. Метод синтеза

Этот метод используется для оригинальных деталей. Его нельзя причислить к методам, значительно сокращающим трудоемкость проектирования, но вместе с тем его использование оправдано в случаях изготовления уникальных для данного производства деталей. Базу метода составляют локальные типовые решения. Технологический процесс в целом формируется (синтезируется) из решений частных задач, определяющих элементы ТП. Частные задачи решаются поразному: в диалоге (автоматизированное проектирование) или по алгоритмам из базы знаний экспертной системы. Это деление определяется уровнем участия человека при принятии решения в процессе проектирования. При диалоговом проектировании технолог все определяющие решения (о структуре и параметрах ТП, операций, переходов, об оборудовании и оснащении) принимает самостоятельно, а ЭВМ оказывает ему методическую, организационную и информационную помощь.

Метод прямого документирования, параметрический и, как видно уже из названия, синтез ТП относятся к группе методов проектирования синтезом. В этих случаях ТП создается, составляется, синтезируется из типовых решений либо с использованием, либо без использования баз знаний.

1.3. Установление маршрутов обработки отдельных поверхностей

1.3.1 Основные факторы, влияющие на маршрут обработки поверхности детали

Установление маршрутов обработки отдельных поверхностей – первая стадия проектирования ТП методом синтеза.

Ряд операций обработки (или технологических переходов), необходимых для получения каждой поверхности детали и расположенных в порядке повышения точности, образует маршрут обработки поверхности (МОП). МОП, как правило, совпадает со стадией обработки, так как в маршруте еще не отражена термическая обработка. Когда определится место термической обработки в ТП, МОП уточняются в следующих стадиях разработки ТП.

На этой стадии разработки ТП для каждой поверхности должны быть определены число ступеней обработки (операций, переходов), методы выполнения каждой ступени и их последовательность.

Отдельная (или элементарная) поверхность – это цилиндр, конус, криволинейная поверхность (в частности сфера) и плоскость. Поверхности вращения подразделяются на наружные и внутренние элементарные поверхности.

Знать МОП необходимо для последующего расчета промежуточных и общих припусков на обработку, промежуточных размеров заготовки и допусков на размеры.

Рассмотрим основные факторы, влияющие на маршрут обработки поверхности детали:

1. *Точность исходной заготовки*: чем заготовка точнее, тем меньшее число ступеней обработки потребуется для достижения требуемых чертежом точности поверхности детали.

2. *Требуемая по чертежу точность формы и размеров рассматриваемой поверхности:* чем выше требуемая точность, тем большее число ступеней ее обработки потребуется.

3. *Наличие и характер термообработки детали*. Большинство методов термической и химико-термической обработки (закалка, цементация, азотирование) связано с потерей достигнутой на предшествующих ступенях механической обработки точности формы и размеров поверхности. Поэтому наличие термообработки увеличивает число ступеней обработки ответственных поверхностей детали.

4. *Точность относительного расположения поверхностей*. В ряде случаев требуется вводить дополнительные ступени обработки для обеспечения жестких допусков на параллельность и соосность поверхностей.

5. *Число ступеней обработки установочной базы*. Если рассматриваемая поверхность в ТП играет роль установочной базы, то число ступеней ее обработки может быть больше по сравнению с тем, которое требуется для получения заданных по чертежу точности формы и размеров этой поверхности. Обычно базирующие поверхности с самого начала обрабатываются точно, а перед каждым новым этапом и после термообработки производится обновление баз.

6. *Требования к качеству поверхностного слоя данной поверхности.* В определенных случаях метод окончательной обработки, используемый для получения размера в пределах заданного по чертежу допуска, не обеспечивает заданного качества поверхностного слоя (по шероховатости, физико-механическим свойствам). Тогда вводят еще одну-две ступени обработки – отделочные или упрочняющие операции (полирование, хонингование, суперфиниширование, алмазное выглаживание и т.п.).

1.3.2 Определение вариантов обработки поверхности с применением графов

Как было отмечено, МОП назначают на основании технических

требований чертежа детали и чертежа заготовки. Ориентируясь на таблицы точности и качества поверхностных слоев при обработке и учитывая конфигурацию обрабатываемой поверхности, материал, массу и другие факторы, устанавливают метод окончательной обработки. При известном способе получения заготовки определяют первоначальный метод обработки. Выбрав окончательный и первый методы, назначают промежуточные. При этом возможны несколько видов обработки примерно с одинаковыми показателями. Такие виды обработки объединены в одну стадию. Характеристики операций обработки наружных поверхностей вращения представлены в табл. 1.2. Для элементарных поверхностей обычно стадия обработки совпадает с операцией или переходом.

Требуемые по чертежу точность и качество поверхности можно получить обработкой по различным маршрутам. Для их описания наиболее удобно использовать теорию графов. В графе вершины соответствуют кодам операций с характеристиками точности, шероховатости поверхности, и себестоимости операции, а ребра – последовательности операций согласно табл. 1.2. На рис. 1.8 показан граф возможных вариантов обработки наружных поверхностей вращения. Нулевая стадия – это стадия получения заготовки. Аналогично можно построить графы для плоских поверхностей и внутренних поверхностей вращения.

Таблица 1.2

Операции обработки наружных поверхностей вращения

Стадии	Наименование операции	Код операции	Точность, квалитет	Параметры шероховатости, мкм	
				R_z	R_a
1	Черновая токарная	1	14	160	–
2	Получистовая токарная	2	12	60	–
3	Чистовая токарная	3	10	–	2,50
	Черновая шлифовальная	4	10	–	2,50
4	Тонкая токарная	5	7	–	0,80
	Однократное шлифование	6	7	–	1,25
5	Чистовая шлифовальная	7	7	–	0,63
6	Тонка шлифовальная	8	6	–	0,25
7	Полировальная	9	6	–	0,40
	Накатная	10	5	–	0,16
	Суперфиниширование	11	5	–	0,08

Анализ графа показывает, что для каждого типа элементарной поверхности существует различное число маршрутов обработки. Применительно к приведенному графу для наружных поверхностей можно синтезировать 8 маршрутов, аналогично для внутренних поверхностей 32 маршрута и для плоских – 60.

Математическим представлением графов возможных МОП является матричная форма (рис. 1.9). Столбцам и строкам матрицы со-

ответствуют вершины графа, приведенного на рис. 1.8. Элемент матрицы равен 1, если вершины смежные, в противном случае он равен 0.

Поиск возможных вариантов маршрута начинается с просмотра матрицы по строкам. Анализ нулевой строки показывает, что после заготовительной операции будет выбрана операция с кодом 1 (черновая токарная).

Далее переходим к просмотру первой строки и видим, что будет выбрана вторая операция – получистовая токарная. Во второй строке может выбираться операция третья (чистовая токарная) или четвертая (черновая шлифовальная). Если по сформированным условиям выбирается третья операция, то переходим к просмотру третьей строки, если выбирается четвертая, то пропускается третья строка и анализируется сразу четвертая, и т.д. Например: условием выбора операции из нескольких возможных может быть такое: если обрабатываемый материал – цветной сплав, выбирается точение. После выбора каждой операции идет сравнение качества, достигаемого на выбранной операции E с требуемым качеством детали $E_{тр}$. Если качество поверхности, достигаемое на операции, удовлетворяет требованию $E_{тр} \geq E$, то дальнейший выбор операции не производится и выдается один из возможных вариантов маршрута обработки.

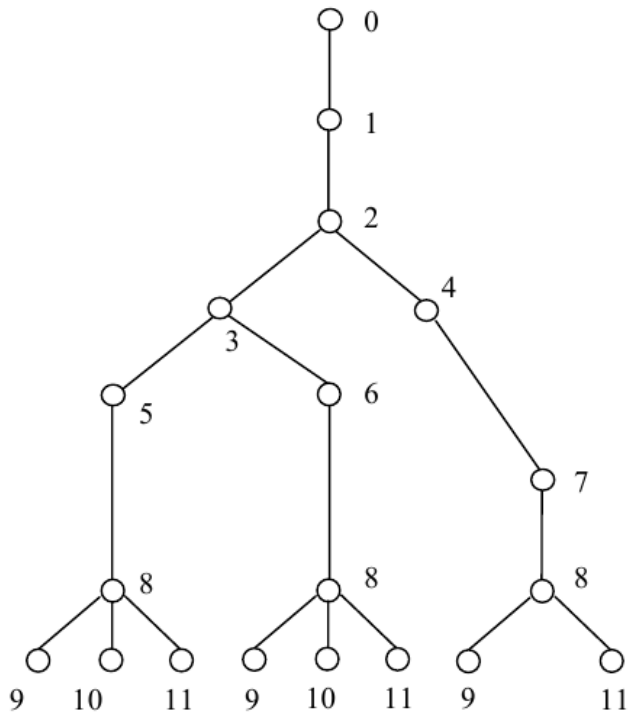


Рис. 1.8 Граф возможных вариантов маршрута обработки поверхностей

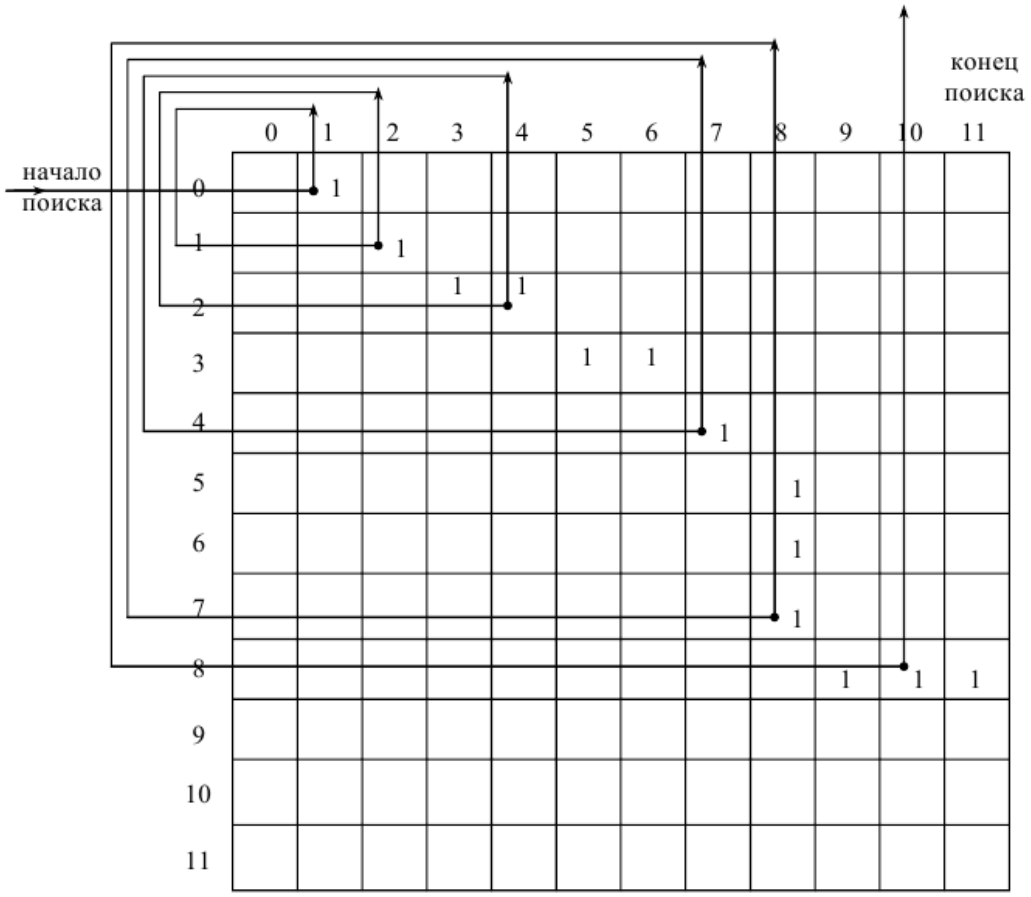


Рис. 1.9 Матрица вариантов маршрута обработки поверхностей

1.3.3 Выбор оптимального маршрута обработки поверхности

Следующий шаг при установлении маршрута обработки – выбор оптимального МОП из множества возможных. Число вариантов обработки уменьшается с учетом технологических правил, например следующих:

1. Если обрабатываются цветные металлы и сплавы, то абразивные методы (шлифование, резьбошлифование) не используются.

2. При диаметре отверстия D < 2 мм растачивание исключается, при L/D < 1 (L – длина отверстия) развертывание нецелесообразно.

3. На этапе получистовой обработки снятие припуска лезвийной обработкой (точение, фрезерование и т.п.) по сравнению с абразивной требует меньшего числа ходов, поэтому нецелесообразно использовать шлифование.

4. Если материал имеет твердость HRC > 40, рекомендуется использовать шлифование.

5. С целью снижения погрешности обработки и времени на переустановку заготовки целесообразна обработка на одном станке за несколько переходов.

6. Жесткость и конфигурация заготовки ограничивают применение некоторых вариантов обработки.

7. Необходимость обработки данной поверхности совместно с другими для достижения большей точности их взаимного расположения предопределяет метод обработки.

В качестве критериев при выборе оптимального МОП используются:

– минимальный общий припуск для всех выбранных стадий обработки;

– минимальная трудоемкость варианта маршрута по суммарному основному времени обработки.

Более точно маршрут выбирается при сравнении суммарной себестоимости обработки всей детали.

Для оптимизации в процессе проектирования ТП применяется метод перебора.

Перебор состоит в определении критерия оптимизации для конечного множества вариантов и выбора варианта с минимальным значением критерия (припуска или себестоимости). Значения критериев рассчитываются с использованием справочно-нормативной информации, по эмпирическим уравнениям вида

$$Z_{min\ i} = a + bD^m + cL^n, \qquad (1.1)$$

где $Z_{min\ i}$ – минимальный припуск; a – часть припуска, которую необходимо снять для удаления дефектного слоя и микронеровностей, образованных на предшествующей операции; $(bD^m + cL^n)$ – часть припуска, ко-

торая вводится для компенсации неравномерности, обусловленной пространственными отклонениями отдельных участков обрабатываемой поверхности и зависящей от габаритных размеров заготовки D и L (диаметр и длина).

Коэффициенты a, b, c и показатели степени т и п определяются путем анализа и обработки справочно-нормативных таблиц операционных припусков с использованием методов наименьших квадратов. Например, эмпирическое уравнение для минимального припуска на черновую токарную обработку наружного диаметра заготовки, полученного методом горячей штамповки, выглядит так:

$$Z_{min\,i} = 0{,}2 + 0{,}684D^{0{,}168} + 0{,}0235L^{0{,}7}, \qquad (1.2)$$

1.4 Проектирование ТП в пределах этапа обработки

1.4.1 Уточнение методов обработки и выбор оборудования

Выбор методов обработки и типа оборудования определяется условиями проектирования ТП. Если ТП разрабатывается при проектировании нового цеха или завода, технолог может выбирать любые оптимальные по экономическим критериям виды обработки и оборудования. При заводской разработке ТП технолог обязан исходить из условия использования имеющегося в цехе (на участке) оборудования.

Для решения вопроса окончательного выбора методов обработки и оборудования необходимо установить технологические комплексы, т.е. группы поверхностей, которые можно обрабатывать за одну операцию и в одном установе. Во многих случаях вопрос о формировании комплексов решается с учетом конфигурации детали, назначения и формы поверхностей. Поверхности деталей – тел вращения (валы, втулки, диски и т.д.) – разделяются, как правило, на два технологических комплекса с тем, чтобы поверхности каждого комплекса можно было обрабатывать при одном установе с одной и другой стороны от поверхности с максимальным диаметром. Гораздо большее число комплексов поверхностей приходится формировать при обработке корпусных деталей – оно будет значительным при использовании универсальных станков и может быть уменьшено при использовании современного оборудования. Так, станки типа обрабатывающего центра с поворотным столом позволяют вести обработку поверхностей различной формы, расположенных на всех сторонах заготовки при одном установе.

Комплексирование (объединение поверхностей в технологические комплексы для обработки) особенно важно для финишных ступеней обработки, так как обработка поверхностей при одном установе позволяет наиболее простым и экономичным способом обеспечить требуемую по чертежу точность взаимного расположения поверхностей (по параллельности, перпендикулярности, соосности).

Известно, что одинаковые точности обработки и качество обработанной поверхности могут быть достигнуты различными способами. Поэтому сначала подбирают для обработки каждой поверхности или комплекса поверхностей на каждом этапе несколько возможных методов обработки и оборудования, а затем сопоставляют варианты по производительности и технологической себестоимости.

При отборе вариантов целесообразно использовать справочные и нормативные материалы по трудоемкости и себестоимости отдельных методов обработки.

Основными факторами, влияющими на выбор оборудования, являются:

− конструкция детали, ее габаритные размеры и другие характеристики (например, обрабатываемость);

− требуемая точность обработки;

− вид заготовки (штучная, из прутка);

− объем выпуска изделий, тип производства, размер партии заготовок.

Выбор оборудования выполняется в три шага:

1) выбор группы станка (токарный, фрезерный и т.д. – отбирается сопоставлением вариантов обработки, как было отмечено выше);

2) выбор класса станка (универсальный или с программным управлением);

3) выбор типоразмера станка (модели).

Эффективность применения станков с ЧПУ выражается:

− в повышении точности и однородности обрабатываемых деталей;

− в повышении производительности обработки благодаря уменьшению доли вспомогательного времени с 70 – 80% для обычных станков до 40 – 45%; в среднем производительность возрастает: для токарных станков в два-три раза, для фрезерных – в три-четыре раза и для обрабатывающих центров – в пять-шесть раз;

− в снижении себестоимости обработки, связанном с повышением производительности, снижением затрат на приспособления и т.п.;

− в значительном сокращении потребности в высококвалифицированных станочниках (вследствие многостаночного обслуживания и др.).

Имеются сферы производства, в которых применение станков с ЧПУ является явно целесообразным. Сюда относится обработка заготовок, которые имеют сложную конфигурацию и различные фасонные поверхности и изготовление которых на традиционных станках невозможно или требует больших затрат времени и труда.

Выбирая типоразмер станка, руководствуются принципами соответствия:

1) рабочей зоны станка конфигурации и габаритным размерам детали (например, токарную обработку деталей типа дисков, колец малой длины и большого диаметра выгоднее и удобнее выполнять не на токарно-винторезном, а на токарно-лобовом или на токарно-карусельном станке);

2) точностных возможностей станка заданной по технологии точности обработки заготовки;

3) мощности, жесткости и кинематических возможностей станка оптимальным режимам резания;

4) производительности станка заданной программе выпуска деталей. В случае малой производительности для операции может потребоваться несколько станков. С другой стороны, применив станок чрезмерно большой производительности, не сможем его достаточно загрузить.

Выбор типоразмера станка относится к задачам, число решений которых невелико, а логические зависимости их выбора достаточно сложны.

В качестве примера рассмотрим фрагмент базы знаний выбора оборудования – выбор зубошевинговальных станков, характеристики которых представлены в табл. 1.3. Для формального представления алгоритма выбора решений этой задачи можно использовать таблицу решений с ограниченными входами (табл. 1.4).

Таблица 1.3

Характеристики зубошевинговальных станков

Модель станка	**Размеры деталей, мм**				**Параметры зубчатого венца**			
	Диаметр		**Длина**		**Модуль, мм**		**Угол наклона зуба, град.**	
	D_{min}	D_{max}	L_{min}	L_{max}	m_{min}	m_{max}	α_{min}	α_{max}
5А702Г	60	320	0	110	1,50	6	0	35
5703В	125	500	0	80	1,75	8	0	17
5717С	300	800	0	200	2,00	8	0	35

Таблица 1.4

Выбор зубошевинговального станка

Описание критерия выбора	Математическая модель	Выполняемость условия выбора для различных моделей			
		5А702Г	5703В	5717С	Станок не выбран
Диаметр детали меньше 60 мм?	*D < 60*	Нет	-	-	-
	D < = 320	Да	-	-	-
	D < = 500	-	Да	-	-
	D < = 800	-	-	Да	-
Длина детали меньше или равна 110мм?	*L < = 110*	Да	-	-	-
	L < = 80	-	Да	-	-
	L < = 200	-	-	Да	-
Модуль меньше или равно 1,5?	*m < = 1,5*	Нет	-	-	-
	m < = 6	Да	-	-	-
	m < = 8	-	Да	Да	-
Угол наклона зуба меньше или равен 17°?	$\alpha = < 17$	-	Да	-	-
	$\alpha = < 35$	Да	-	Да	-
Выбран станок модели 5А702Г	*СТАНОК = '5А702Г'*	1			
Выбран станок модели 5703В	*СТАНОК = '5703В'*		1		
Выбран станок модели *5717С*	*СТАНОК = '5717С'*			1	
СТАНОК не выбран	*СТАНОК = '-'*				1

1.4.2 Выбор технологических баз и типа приспособления

Базирование – придание заготовке или изделию требуемого положения относительно выбранной системы координат. База – поверхность (или выполняющее ту же функцию сочетание поверхностей), ось, точка, принадлежащая заготовке (изделию) и используемая для базирования.

По *назначению* базы подразделяются на конструкторские, технологические и измерительные.

При механической обработке поверхности выдерживаются точность самой поверхности (по размеру и форме) и точность положения обрабатываемой поверхности относительно других поверхностей детали (по координирующему размеру, по угловому положению, параллельности, перпендикулярности). В соответствии с этим рассматриваются два вида размеров: размер самой поверхности и размеры, определяющие взаимное положение поверхностей (координирующие размеры).

Наиболее сложные задачи при автоматизации проектирования возникают в связи с требованиями к взаимному расположению поверхностей. Это объясняется тем, что наборы методов обработки отдельных поверхностей известны и отработаны, число сочетаний поверхностей неограниченно.

Рекомендации и правила по определению баз можно разделить на 3 класса:

1) утверждения, описывающие закономерности координации отдельных элементов (поверхностей, осей) детали;

2) утверждения, описывающие закономерности сохранения положения детали в процессе обработки;

3) описания точностных зависимостей.

К первому классу – *координации отдельных поверхностей* – относятся следующие утверждения:

• Взаимная координация поверхностей детали определяется размером или цепочкой размеров; при этом координирующий размер направлен по нормали к той поверхности (или оси), которую он координирует. На конструкторском чертеже любые два элемента чертежа, связанные размером, координируют друг друга, эта координация не имеет направленности;

• На операционном эскизе положение каждой поверхности по одному направлению координации задано одним размером. Эта координация имеет направленность – фиксируется положение обрабатываемой поверхности относительно базы.

Утверждения, относящиеся ко второму классу – к ориентации и *закреплению детали:*

• Сохранение положения детали осуществляется путем наложения шести связей, лишающих деталь шести степеней свободы;

• Функцию определения положения детали относительно средств обработки и закрепления выполняет комплект баз. В комплект баз входят поверхность, относительно которой посредством размера ориентирована обрабатываемая поверхность, и поверхности, к точкам которых могут быть приложены силы, противодействующие силам резания.

Третий класс утверждений – *по точности*:

• Точность исполняемого размера определяется погрешностью обработки (погрешностью настройки), погрешностью установки детали в приспособлении и приспособления – на станке;

• Погрешность установки детали в приспособлении определяется погрешностью технологической базы (размеров, формы, шероховатости);

• Необходимо соблюдать принципы постоянства и единства баз; принцип единства состоит в том, чтобы для обрабатываемой поверхности в качестве конструкторской, измерительной и установочной базы использовать один и тот же элемент детали; принцип постоянства баз предполагает по возможности использование одной базы для множества операций;

• Необходимо соблюдать принцип наикратчайшего пути, т.е. для обработки какой-либо поверхности следует назначать в качестве базовой ту поверхность, которая связана с ней кратчайшей размерной связью;

• Среди поверхностей, для которых назначается база, должна находиться поверхность, которая связана кратчайшими размерными связями с как можно большим числом поверхностей и, следовательно, будет базовой на следующем этапе обработки.

Методика выбора баз с точки зрения автоматизации должна содержать количественные характеристики выбора баз, этапы определения баз и их последовательность.

В качестве количественной оценки используется погрешность установки. Решение общей задачи выбора баз подразделяется на три этапа:

Первый этап. Исследование вопроса координации обрабатываемой поверхности в одном направлении – в направлении исполняемого размера;

Второй этап. Дополнение выбранной базы до полного комплекта, который должен обеспечить закрепление и координацию детали относительно средств обработки;

Третий этап. Выбор баз для группы поверхностей, обрабатываемых за одну операцию.

Вопрос выбора баз для группы поверхностей, обрабатываемых за одну операцию, решается при учете свойств поверхностей. При этом часть выбранных ранее баз меняется. При замене необходимо учесть, что погрешность исполняемого размера во вновь построенной размерной цепи не должна превышать допустимую погрешность.

Выбор технологических баз и типа приспособления с учетом требований точности взаимного расположения поверхностей является одной из самых трудноформализуемых задач автоматизированного проектирования. Поэтому при разработке САПР единичных технологических процессов для повышения их надежности часто используют локализацию системы, т.е. сужение номенклатуры деталей, охватываемых системой. Достаточно надежные алгоритмы можно создать надетали типа тела вращения (валы, втулки, шестерни, муфты и т.д.). При изготовлении деталей этого типа перечень возможных способов базирования небольшой (патрон, центра, патрон с поджимом задним центром, люнеты), что и упрощает алгоритмы. Решение данной задачи для деталей сложной конфигурации целесообразно выполнять в диалоговом режиме проектирования.

1.4.3. Формирование последовательности операций

При решении задачи выбора технологических баз для групп поверхностей и установлении последовательности обработки поверхностей определены и основные структурные элементы ТП механической обработки. Так, при выборе баз формируют группы совместно обрабатываемых поверхностей,

исходя из их свойств и взаимного расположения. Эти группы являются исходным множеством для определения состава операций.

Последовательность операций определяется порядком баз и улучшением качества для групп операций, имеющих одни и те же базы. Порядок обработки устанавливается исходя из требований организации ТП, например требования максимально возможной концентрации операций на одном участке по типам применяемого оборудования.

Полученную последовательность операций можно уточнить, используя следующие рекомендации (о некоторых из них было сказано выше):

1. В первую очередь следует обрабатывать поверхности, принятые за чистые (обработанные) технологические базы.

2. Последовательность обработки зависит от простановки размеров. Вначале нужно обрабатывать ту поверхность, относительно которой на чертеже координировано большее число других поверхностей.

3. При невысокой точности исходной заготовки сначала следует обрабатывать те поверхности, с которых для раннего выявления литейных и других дефектов, например раковин, включений, трещин и отсеивания брака, требуется удалить небольшой слой материала.

4. Последовательность операций необходимо устанавливать в зависимости от требуемой точности поверхности: чем точнее должна быть поверхность, тем позднее ее необходимо обрабатывать, так как обработка каждой последующей поверхности может вызывать искажение ранее обработанной. Снятие каждого слоя металла приводит к перераспределению остаточных напряжений, что и вызывает деформацию заготовки. Последней нужно обрабатывать ту поверхность, которая является наиболее точной и ответственной.

5. Операции обработки поверхностей, имеющих второстепенное значение и не влияющих на точность основных параметров детали (сверление мелких отверстий, снятие фасок прорезка канавок и т.п.), следует выполнять в конце ТП, но до операций окончательной обработки ответственных поверхностей. В конец маршрута желательно также выносить обработку легкоповреждаемых поверхностей, к которым относят наружные резьбы, наружные зубчатые и шлицевые поверхности.

6. Необходимо учитывать возможное сокращение путей транспортировки деталей. После всех уточнений последовательности операций получим условный маршрут обработки, состоящий из операций механообработки, термической и химико-термической обработки. Далее этот перечень необходимо дополнить слесарными, промывочными, контрольными и транспортировочными операциями.

1.4.4 Формирование структуры операций

Задача формирования структуры операции состоит в том, чтобы определить оптимальную последовательность переходов. Для структуры техноло-

гической операции так же, как и для ТП, характерна многовариантность, которая предполагает существование оптимального решения. Синтез оптимальной структуры включает в себя определение вариантов последовательности переходов и расчет параметров переходов, необходимых для выбора оптимального варианта последовательности. Здесь задача структурной оптимизации решается в три этапа:

- Первый этап. Создание (синтез) очередного варианта последовательности переходов;
- Второй этап. Анализ (оценка) варианта;
- Третий этап. Принятие решения о замене ранее выбранного варианта на новый или о прекращении синтеза новых вариантов.

Для оценки уровня создаваемых вариантов вводится целевая функция и формируется критерий оптимальности, т.е. правило предпочтения одного варианта другому.

Наиболее часто задачу определения оптимальной последовательности переходов решают при обработке ступенчатых поверхностей детали (плоских, цилиндрических, наружных и внутренних). Например, при черновой токарной обработке ступенчатых валов, когда в качестве заготовки принимается прокат и каждая ступень вала имеет различный по величине напуск. Анализ возможных вариантов выполняется с помощью целевой функции, учитывающей величину перемещения инструмента.

Другим характерным примером оптимизации структуры операции является обработка (сверление, зенкерование, развертывание) нескольких отверстий в корпусной детали. Здесь необходимо отыскать маршрут наименьшей протяженности между отверстиями.

Для решения указанных задач обработки ступенчатых поверхностей и обработка отверстий используется метод динамического программирования.

2. ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ

2.1. Электроэрозионная обработка

2.1.1. Основные понятия

Электрическая эрозия — это разрушение поверхности токопроводящих материалов под действием электрических разрядов. Наглядным примером электрической эрозии может служить разрушение контактов выключателей, рубильников и реле при разрыве электрических цепей.

Явление электрической эрозии было открыто Пристоли в 1768 году. С этого времени и до середины сороковых годов прошлого столетия это явление в технике рассматривалось, главным образом, как вредное — сокращающее срок службы и надежность электрических устройств.

В 1943 году наши соотечественники Б.Р. Лазаренко и Н.И. Лазаренко предложили использовать электрическую эрозию для размерной обработки деталей. Схема разработанной ими установки показана на рис .2.1.

Два электрода, один из которых является заготовкой 5 (анод), а другой электрод — инструмент 3 (катод) помещены в ванну с диэлектрической жидкостью 4 (индустриальное масло, керосин, вода и т.п.) и подключены к генератору импульсов (RC-генератор). В качестве генератора импульсов служит батарея конденсаторов 2, заряженных от источника постоянного тока. Время зарядки конденсаторов регулируется реостатом 1.

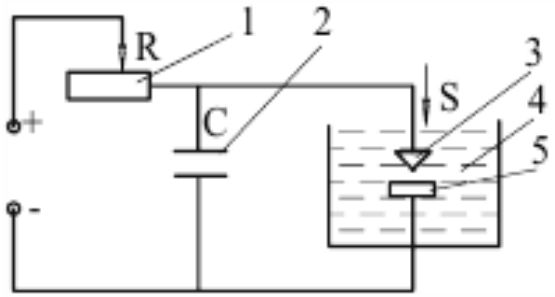


Рис. 2.1. Схема установки для электроэрозионной обработки.

При разведенных друг от друга электродах в промежутке между ними образуется электрическое поле. Величина напряженности этого поля обратно пропорциональна расстоянию между электродами. Если расстояние достаточно большое, то пробоя диэлектрической жидкости не происходит. По мере сближения электродов напряженность возрастает и при определенном межэлектродном промежутке происходит пробой. Возникает электрический разряд, под действием которого происходит разрушение участков электродов. Разрушение происходит в результате теплового действия разряда. В месте пробоя на поверхностях электродов выплавляется металл, образуются лунки.

В это время конденсатор разряжается, а после прохождения разряда, снова заряжается и процесс повторяется. После прохождения большой серии разрядов на поверхности заготовки образуется полость, имеющая форму обратную форме электрода-инструмента. Перед обработкой металлов резанием метод электроэрозионной обработки обладает рядом преимуществ, главными из которых являются следующие:

1. Производительность процесса электроэрозионной обработки не зависит от механических характеристик обрабатываемого материала, его твердости, прочности, вязкости и хрупкости;

2. Силовое воздействие на заготовку в процессе электроэрозионной обработки не значительно по сравнению с силами резания, действующими на заготовку при механической обработке;

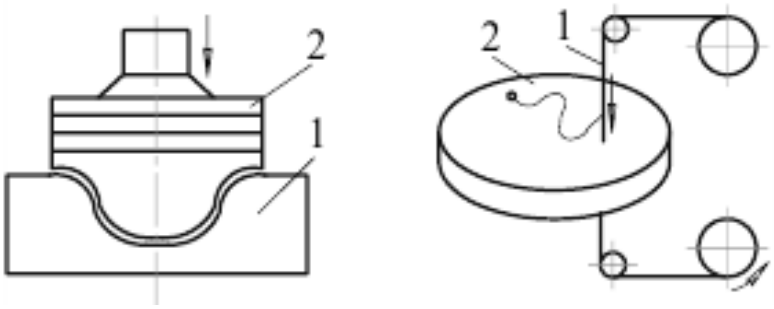
3. Схемы формообразования, применяемые при электроэрозионной обработке, принципиально отличаются от тех, которые применяют при обработке деталей на металлорежущих станках.

На универсальных электроэрозионных станках применяют, в основном, две технологические схемы формообразования поверхностей деталей (рис. 5.2).

1. Копирование — эта схема аналогична штамповке. В отличие от штамповки, при которой форма образуется за счет пластического оттеснения металла, при электроэрозионной обработке полость формируется путем расплавления частичек металла. На рис. 5.2 а показана схема копирования.

Заготовка 1 устанавливается на столе станка, а электрод-инструмент 2 перемещается в направлении заготовки. Электроэрозионные станки, которые реализуют такую схему формообразования, называют копировально прошивочными.

2. Профильная вырезка. Обработка по этой схеме производится непрофилированным электродом-инструментом (обычно тонкой проволокой). Эта схема показана на рис. 1.2 б. Проволока 1 движется с постоянной скоростью, перематываясь с одной катушки на другую. Заготовка 2 устанавливается на столе станка и совершает движение в заданном направлении. Станки, реализующие такую схему, называются электроэрозионными вырезными станками.



а) б)

Рис. 5.2. Схемы формообразования деталей при эрозионной обработке:
а) копирование, б) профильная вырезка.

2.1.2 Протекание электрического разряда в диэлектрической жидкой среде

Электрический разряд в диэлектрической жидкой среде протекает в определенной последовательности и включает три стадии:

Первая стадия. Подготовка канала сквозной проводимости.

В реальных условиях электроэрозионной обработки в диэлектрической жидкости во взвешенном состоянии всегда находятся мельчайшие токопроводящие частицы. В основном это частицы металла оставшихся после предшествующих разрядов. При подключенном генераторе импульсов токопроводящие частицы располагаются в межэлектродном промежутке вдоль силовых линий электрического поля (рис. 5.3).

Рис. 5.3. Межэлектродный промежуток с расположенными в нем токопроводящими частицами

При этом расчетная величина межэлектродного зазора S уменьшается на величину, равную сумме размеров частиц $S_р = S – \sum S_ч$.

С уменьшением расстояния между электродами напряженность электрического поля возрастает до величины, при которой происходит пробой диэлектрической жидкости (масленой пленки между частицами). Для электрических жидкостей, применяемых при электроэрозионной обработке, напряженность поля в момент разряда достигает нескольких десятков мегавольт на метр.

Вторая стадия. Пробой диэлектрической жидкости.

В результате электрического разряда происходит ионизация межэлектродного промежутка. Образуется канал сквозной проводимости способный пропустить ток большой силы. Канал представляет собой, сравнительно узкое цилиндрической формы пространство, заполненное нагретым веществом (плазмой), содержащим ионы и электроны. Температура плазмы свыше 5000°С. Канал является объемным источником тепла. По каналу по направлению к катоду движутся электроны, а по направлению к аноду — ионы. Электроны, имеющие значительно меньшую массу, чем ионы, быстрее достигают поверхности катода, чем ионы поверхности анода. За время

разряда часть ионов также успевает достигнуть поверхности анода. В результате под действием тепла происходит расплавление и испарение металла 2, который в начальный момент находится в лунках, образовавшихся на поверхностях заготовки 6 и электродаинструмента 1 (рис. 2.4)

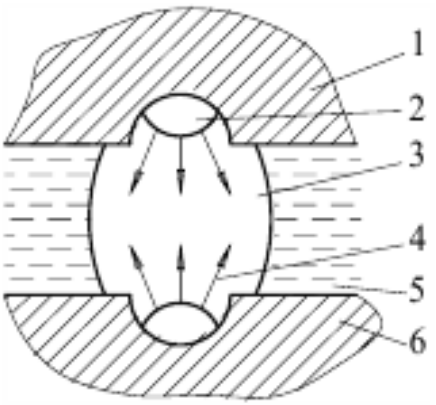


Рис. 1.4. Выброс металла из лунок внутри газового пузыря

Под действием высокой температуры в зоне канала происходит почти мгновенное испарение диэлектрической жидкости 5. Образуется газовый пузырь 3.

Давление газов в пузыре достигает 2×10^7 Па, поэтому происходит его расширение в радиальном направлении. Скорость расширения может достигать 150…200 м/с

Третья стадия. Прекращение тока, отрыв ударной волны от газового пузыря, выброс металла из лунок.

В момент, когда давление в канале достаточно большое расплавленный металл находится в лунках, расположенных на поверхностях заготовки и электродаинструмента. По мере расширения газового пузыря давление внутри него резко падает. Содержащийся в лунках расплавленный металл выбрасывается из лунок в межэлектродный промежуток в жидкую диэлектрическую среду и затвердевает в виде мельчайших шариков 4. Обработанная поверхность представляет собой хаотически расположенные лунки, покрытые темной пленкой из осевших и спекшихся с металлом мельчайших частиц продуктов высокотемпературного разложения диэлектрической жидкости.

2.1.3 Генераторы импульсов

Все электроэрозионные станки оснащаются генераторами импульсов электрического тока. По способу генерирования импульсов принято различать генераторы с зависимым генерированием и с независимым генерированием.

При зависимом генерировании разрядный импульс происходит в тот момент, когда в межэлектродном промежутке подготовлены условия для осуществления пробоя диэлектрической жидкости. В других условиях импульсы не вырабатываются. Примером зависимого генератора может служить рассмотренный ранее RC–генератор (рис. 2.1). Такой генератор вырабатывает разрядный импульс в тот момент, когда накопленная конденсатором энергия достаточна для того, чтобы пробить диэлектрическую среду.

При независимом генерировании импульсов генератор вырабатывает импульсы определенной формы, с заданными параметрами и частотой не зависи мо от того, какие условия сформированы в межэлектродном промежутке. В самом общем виде схема такого генератора импульсов (рис. 2.5) содержит источник постоянного тока 1 и коммутатор 2, который с определенной периодичностью генерирует импульсы определенной формы и с заданными параметрами и подает их на электроды 3 и 4.

Параметры импульсов, определяющих режим обработки, задаются оператором. Исходными данными для этого являются условия обработки (требуемая производительность, точность и качество поверхности, свойства материалов заготовки и электрода инструмента и др.).

При использовании генераторов с зависимым генерированием импульсов возможности управления режимами весьма ограничены. Режим обработки устанавливается емкостью конденсатора, напряжением источника и величиной тока. Такие генераторы обладают низким КПД, ограниченной возможностью повышения мощности и невысокой производительностью обработки.

Наибольшее распространение получили генераторы, вырабатывающие импульсы не зависимо от условий в межэлектродном промежутке. На таких генераторах форма импульса напряжения, величина тока, амплитуда, длительность импульса и частота импульсов определяются предварительной настройкой коммутатора.

2.1.4 Форма и параметры импульсов

Импульсные генераторы вырабатывают импульсы различной формы, но одной полярности (униполярные) графики наиболее часто применяемых для электроэрозионной обработки импульсов напряжений и тока показаны на рис. 2.6 .

Форма импульсов подбирается такой, чтобы при определенных параметрах импульса можно было достичь наиболее эффективного использования подводимой в зону обработки электрической энергии.

Основными параметрами периодических импульсов различной формы являются:

длительность импульса $t_и$;

частота f;

период T — величина обратная частоте

$$T = 1/f \qquad (2.1)$$

пауза $t_п$ — промежуток времени меду двумя соседними импульсами;
скважность q — отношение периода к длительности импульса.

$$q = \frac{T}{t_и} \geq 1 \qquad (2.2)$$

К параметрам импульсов относятся также амплитудные и средние значения напряжения и силы тока.

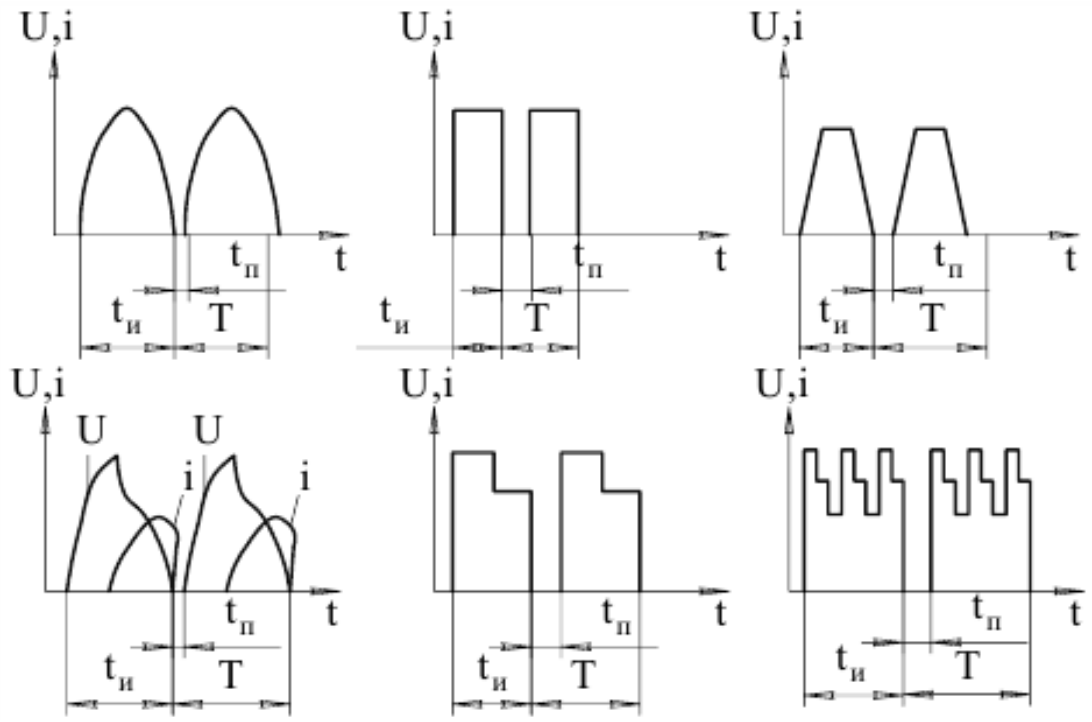


Рис. 2.6 Формы импульсов, применяемых при электроэрозионной обработке

Современные генераторы позволяют формировать импульсы различной формы, в том числе прямоугольные, ступенчатые импульсы и др. (рис. 2.6).

Исходя из природы разряда, целесообразно повышать амплитудное напряжение в импульсе, так как при повышенном напряжении легче пробивается диэлектрическая жидкость в межэлектродном промежутке. Однако после пробоя диэлектрической жидкости напряжение на промежутке всегда падает до значения, определенного видом диэлектрика и материалами заготовки и электрода-инструмента. На рис. 2.7 этому напряжению соответствует участок 2–3–4 (дуговой разряд). Высокое напряжение необходимое для пробоя промежутка, создается лишь в начале импульса (участок 0–1 на рис. 2.7). Эта часть импульса получила название «поджигающей». Амплитуда напряжения «поджигающей» части импульса современных генераторов устанавливается в пределах 70…300 В, что при соответствующей длительности этой части обеспечивает искровой пробой и подхват разряда сле-

дующей частью импульса — рабочей, выполняющей основной съем материала. Электрическая схема генератора обеспечивается совмещение «поджигающей» части с началом рабочей части импульса.

Рис. 2.7. Изменение напряжения на эрозионном промежутке
в течение одного рабочего импульса

2.1.5 Электрические параметры электроэрозионного процесса

Процесс электроэрозионной обработки осуществляется при постоянном подводе к электродам (заготовке и электроду-инструменту) импульсов электрического тока. От параметров импульса зависит объем выплавляемого им металла (объем лунки). Наибольшее влияние на объем выплавляемого металла оказывает энергия импульса. С увеличением энергии импульса, объем выплавляемого металла возрастает, поэтому увеличивается производительность обработки, а точность и шероховатость поверхности ухудшается.

Величина энергии импульса $W_и$ как работы электрического тока определяется произведением силы тока J на напряжение U за время протекания импульса $t_и$:

$$W_и = \int J \cdot U \cdot dt. \qquad (2.3)$$

Изменяющиеся в процессе протекания импульса величины U и J чрезвычайно сложно определить без специальных приборов. Поэтому на практике энергию импульса оценивают приближенно по средним значениям силы тока $J_{ср}$ и напряжения $U_{ср}$:

$$W_и = J_{ср} \cdot U_{ср} \cdot Ut. \qquad (2.4)$$

Величины $J_{ср}$ и $U_{ср}$ рассчитываются по показаниям приборов, которые установлены на генераторе импульсов. Среднее напряжение $U_{ср}$ = (0,5…0,75)U_o, где U_o — напряжение при разведенных на большое расстояние друг от друга электродах (напряжение холостого хода). Среднюю силу тока определяют через значение тока при сведенных до касания электродах Jк (ток короткого замыкания). $J_{ср}$ = (0,5…0,75)$J_к$. Величины U_o и $J_к$ устанавливают и контролируют по приборам станка.

2.1.6. Электроискровая и электроимпульсная обработка. Прямая и обратная полярность подключения электродов

В зависимости от того реализуется или не реализуется при электроэрозионной обработке фаза стационарного дугового разряда (участок 2–3–4 на рис. 2.7) различают электроискровую и электроимпульсную обработку.

При электроискровой обработке имеет место только искровой разряд с последующей нестационарной дуговой фазой разряда. Устойчивого дугового разряда при этом не образуется.

При электроимпульсной обработке имеются обе фазы разряда. Сразу, вслед за искровой стадией разряд, процесс разряда переходит в стационарный дуговой, который продолжается до окончания импульса напряжения.

В электроискровом режиме обработки время действия разрядного им-пульса не превышает 10– 4 с. За это время электроны, находящиеся в образовавшейся плазме успевают достичь поверхности катода и расплавить металл. В то же время лишь незначительная часть ионов, имеющих большую, чем у электронов массу, достигает поверхности анода, поэтому лунка на нем выплавляется меньших размеров. В связи с этим с целью уменьшения износа электрода инструмента, при работе на искровом режиме заготовку делают анодом, а электрод-инструмент — катодом. Такая полярность подключения электродов называется прямой. Если увеличивать длительность импульса тока $t_и$ >10– 4 то растет интенсивность съема металла с катода, т.к. поток ионов успевает достичь поверхности катода. Можно подобрать такое время протекания тока в импульсе, при котором доля съема металла электронами составит лишь незначительную часть от общего объема удаленного с электродов материала. Поэтому здесь целесообразно катодом выбрать заготовку. Полярность, при которой анодом является электрод-инструмент, а катодом — заготовка, называется обратной. Обработку материалов на электроимпульсном режиме обычно осуществляют при обратной полярности подключения электродов.

2.1.7 Классификация импульсов по признаку прохождения через межэлектродный промежуток

Не все импульсы, вырабатываемые генератором и поступающие на электроды, производят съем металла. По принципу прохождения импульсов

через межэлектродный промежуток их делят на холостые, рабочие, короткозамкнутые и фиктивные.

Импульсы считаются холостыми (рис. 2.8 а, когда импульс на промежутке не реализован, т.е. импульс напряжения есть, но разряд по какимто причинам не произошел. Например, при далеко разведенных друг от друга электродах. Рабочие импульсы (рис. 2.8, б) характеризуются как наличием импульсов напряжения, так и импульсов тока. При прохождении рабочих импульсов происходит эрозионный съем материала.

Короткозамкнутые импульсы (рис. 2.8, в) характеризуются практически полным отсутствием импульса напряжения и наличием импульса тока, величина которого определяется, главным образом, внешней характеристикой источника питания. При прохождении короткозамкнутых импульсов съем материала отсутствует. Большая величина тока короткого замыкания и высокая температура в месте контакта электродов может привести к порче поверхности, как электрода-инструмента, так и обрабатываемой детали. Все современные генераторы импульсов имеют специальную защиту от короткого замыкания.

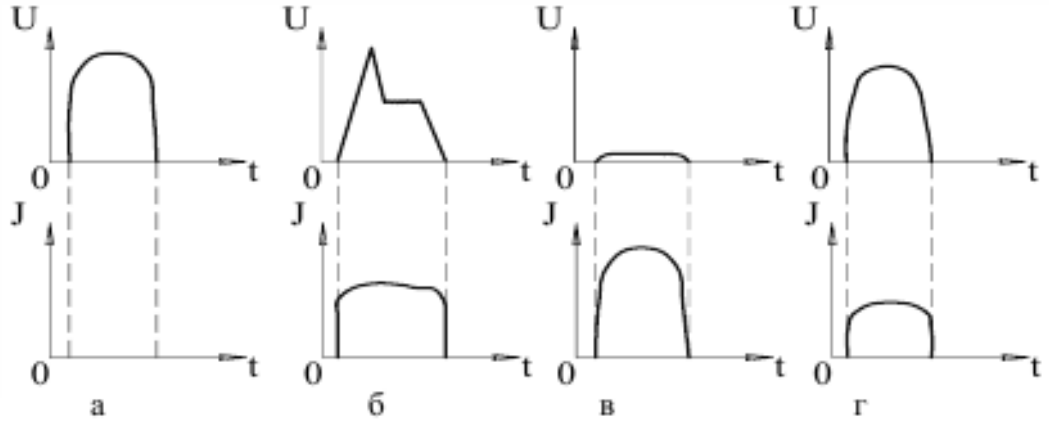


Рис. 2.8. Разновидности импульсов, реализуемых в межэлектродном промежутке

Имеются фиктивные импульсы, при которых разряд отличается от рабочего эрозионного разряда. Чаще всего фиктивные импульсы наблюдаются, когда разряд проходит через отложившиеся на поверхности электродов частицы, выплавленные предыдущими импульсами. Фиктивный импульс (рис. 2.8, г) не производит съем металла. Частицы, через которые происходит разряд, могут нагреваться до температуры крекинга диэлектрической жидкости. Образующиеся при этом частицы сажи и кокса откладываются на поверхности электродов и вместе с частицами металла образуют столбик, способствующий образованию короткого замыкания и порче электродов.

Сумма импульсов указанных разновидностей, проходящих в одну секунду, равна частоте генератора:

$$f=Х_и+Р_и+КЗ_и+Ф_и \qquad (2.5)$$

где $Х_и$, $Р_и$, $КЗ_и$, $Ф_и$ — соответственно количество холостых, рабочих, короткозамкнутых и фиктивных импульсов, проходящих в межэлектродном промежутке за единицу времени.

2.1.8 Эрозионная обрабатываемость материалов. Критерий Палатника

Характер и интенсивность электрической эрозии материалов зависит от полярности их подсоединения к источнику технологического тока и от теплофизических констант материалов электродов. По теплофизическим константам электроэрозионная обрабатываемость материалов оценивается критерием Палатника:

$$Р_п=С_т\cdot\rho\cdot\lambda\cdot T^2_{пл}, \qquad (2.6)$$

где $С_т$ — теплоемкость, кал·г/град; ρ — плотность материала, г/см^3; λ — коэффициент теплопроводности, кал·см^2/град; $T^2_{пл}$ — температура плавления, °С.

Чтобы составить общее представление об электроэрозионной обрабатываемости различных материалов, в качестве примера приведем относительные величины некоторых материалов по сравнению со сталью (при идентичных условиях обработки), обрабатываемость стали 45 принята за 1.

Магний — 2,5
Алюминий — 1,5
Медь — 1,3
Сталь — 1
Никель — 0,9
Твердые сплавы — 0,9…0,18
Молибден — 0,8
Вольфрам — 0,7

2.1.9 Полярный эффект. Относительный износ электродов

Даже в том случае, когда электроды изготовлены из одного материала, в зависимости от того является электрод анодом или катодом износ одного из них будет больше износа другого. Такая закономерность получила название полярного эффекта. При различных материалах электрода-анода и электродакатода, различной форме и длительности импульсов тока разница в износе электродов может достигнуть большой величин. Для электрода, играющего роль инструмента, желательно выбрать материал, обладающий высокой износостойкостью. Для характеристики взаимной обрабатываемости материалов данной пары электродов введено понятие относительного износа материалов. Коэффициент относительного износа (размерный и весовой) определяется как отношение величины износа электрода-инструмента к количеству материала снятого с электрода-детали. На величину относительного износа очень сильное воздействие оказывают па-

раметры электрических разрядов и свойства диэлектрической среды, разделяющей поверхности электродов.

2.1.10 Технологические характеристики электроэрозионной обработки

Производительность процесса

При работе на копировально-прошивочных станках производительность процесса электроэрозионной обработки оценивают отношением объема или массы удаленного с заготовки металла ко времени обработки.

Под производительностью обработки на электроэрозионных вырезных станках понимают отношение площади боковой поверхности паза ко времени обработки. Площадь боковой поверхности определяется произведением расстояния, пройденным проволочным электродом-инструментом в направлении подачи за время обработки, на толщину заготовки.

Если бы все импульсы, вырабатываемые генератором, производили бы съем металла, то производительность процесса можно было бы оценивать произведением объема металла, снимаемого одним импульсом на их частоту. На практике кроме рабочих импульсов в межэлектродном промежутке реализуются холостые, короткозамкнутые и фиктивные импульсы, которые не производят съем металла. Поэтому, чем больше рабочих импульсов реализуются в межэлектродном промежутке, тем выше производительность обработки.

Для того чтобы, обеспечить высокую производительность, необходимо подобрать оптимальное сочетание факторов, позволяющих увеличивать долю полезной энергии импульса, его мощность и частоту следования импульсов. Импульсы большой энергии и длительности обладают высоким эрозионным эффектом (выплавляет большой объем металла с образованием лунок большого размера), что обеспечивает высокую производительность процесса обработки. При этом шероховатость обработанной поверхности грубая. Соответствующие режимы используются при черновой обработке. Энергия импульсов на таких режимах более 1 Дж, а производительность может достигать 4000 мм^3/мин.

Импульсы малой энергии (от 0,1 до 1 Дж) и длительности обеспечивают небольшой единичный съем металла, поэтому для увеличения производительности необходимо повышать частоту их следования. Такие режимы используют при чистовой обработке. На отделочной обработке используют импульсы с энергией менее 0,1 Дж и с частотой 200…400 кГц.

На производительность электроэрозионной обработки оказывает влияние площадь обрабатываемой поверхности. При малой площади обработки число участков, на которых возможен разряд значительно меньше, чем число импульсов поступающих от генератора. Необходимо отметить, что количество участков, на которых возможно сокращение разрядов еще и потому, что часть площади перекрыта газовыми пузырями от предшествующих раз-

рядов. Время существования газового пузыря в 5–10 раз больше длительности импульса, а разряд через газ возможен только при более высоком напряжении, чем через диэлектрическую жидкость. С увеличением площади обрабатываемой поверхности скорость съема металла возрастает, но в дальнейшем происходит ее снижение. Это объясняется тем, что с течением времени ухудшаются условия удаления продуктов обработки из межэлектродного промежутка. Все большее число электрических импульсов не будет вызывать эрозии из-за накопления газов и металлических частиц, оседающих на поверхности заготовки.

По мере углубления электрода-инструмента в полость обрабатываемой поверхности осложняется поступление в рабочую зону свежей диэлектрической жидкости и затрудняет удаление продуктов эрозии из межэлектродного промежутка. В межэлектродном промежутке увеличивается концентрация твердых частиц — продуктов эрозии, свойства диэлектрической жидкости ухудшаются. Это приводит к увеличению числа фиктивных и короткозамкнутых импульсов, а следовательно, к снижению производительности. В этом случае необходимо выбрать эффективный способ интенсификации удаления продуктов эрозии из зоны обработки — прокачку или отсос жидкости, вибрацию или релаксацию электрода-инструмента, продувку межэлектродного промежутка воздухом и др.

Таким образом, для получения высокой производительности необходимо правильно выбрать сочетание площади обрабатываемой поверхности и мощности, а также подобрать эффективный способ удаления продуктов эрозии из зоны обработки.

Значительное повышение производительности может быть достигнуто

путем применения многоконтурной или многоэлектродной обработки (рис. 2.9 а и б). При многоконтурной обработке (рис. 2.9 а) отдельные части электрода-инструмента 1 изолируются друг от друга изоляционным матери а лом 2 и получают питание от одного общего генератора, но по отдельным каналам, либо от различных генераторов.

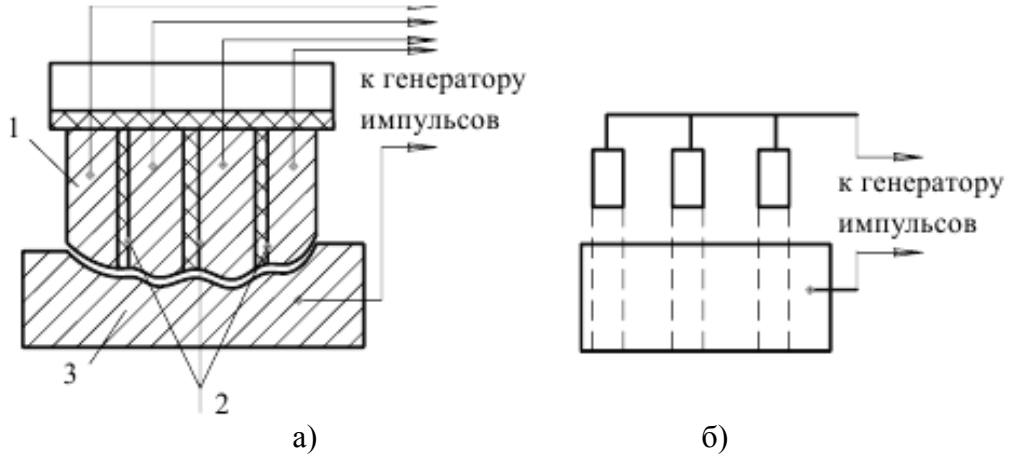


Рис. 2.9 Схемы многоконтурной а) и многоэлектродной б) обработки

При многоэлектродной обработке на обрабатываемой площади размещено несколько одновременно работающих электродов-инструментов, подключенных к одному или разным генераторам импульсов.

Многоконтурная и многоэлектродная обработка повышает производительность за счет более полного использования мощностей генератора. Производительность многоконтурного станка рассчитывается по следующей формуле

$$M_п = K \cdot M_1 \cdot n , \qquad (2.7)$$

где $M_п$ — производительность при многоконтурной обработке; К — коэффициент, учитывающий взаимное влияние нескольких одновременно работающих электродов; M_1 — производительность при одноконтурной обработке; n — число одновременно работающих контуров.

При увеличении числа контуров от одного до шести величина коэффициента К изменяется и колеблется в пределах 1,0–0,68.

Так как с ростом числа контуров влияние их на общий объем материала возрастает, то можно подобрать оптимальное количество контуров, при котором будет наибольшая, в данных условиях, производительность обработки.

Качество обработанной поверхности

Качество поверхности, обработанной на электроэрозионном станке, характеризуется двумя основными показателями: шероховатостью и изменениями в поверхностных слоях металла под влиянием теплового действия разрядов.

Микрорельеф поверхности, обработанной на электроэрозионном станке, совершенно не сравним с микрорельефом, полученным при обработке резанием. Обрабатываемая поверхность формируется из перекрывающих друг друга произвольно расположенных лунок. Выражение «лунный рельеф», часто бытующее среди специалистов по электроэрозионной обработке, образно характеризует вид обработанной поверхности. Большая степень неоднородности микрорельефа, вследствие нерегулярного расположения микронеровностей, затрудняет оценку шероховатости поверхности существующими методами. Все используемые в настоящее время методы оценивают шероховатость по характеру профиля, взятого в пересечении поверхности плоскостью, тогда как для поверхностей обработанных электроэрозией, наиболее целесообразна оценка по площади.

Микрогеометрия обработанной поверхности зависит от режимов обработки, теплофизических свойств обрабатываемого материала, размеров обрабатываемой поверхности, свойств рабочей жидкости и др.

Наибольшее влияние оказывает электрический режим. Размеры лунок, формирующих микрорельеф, зависят от энергии импульса. С увеличением энергии импульса высота микронеровностей увеличивается. Поэтому черновую обработку производят на малой частоте импульсов с большой

энергией. При этом шероховатость обрабатываемой поверхности Rz 80 мкм и грубее. Чистовую обработку выполняют с использованием импульсов малой энергии следующих с большой частотой. Шероховатость поверхности, достигаемая на электроэрозионных копировально-прошивочных станках без применения специальных технологий Ra 1,25 мкм.

Применение специальных способов, например, созданная специалистами фирм SODICK система PIKA-10; PIKA-11 и PIKA-DEMO позволяет зеркально выхаживать большие рельефные поверхности (Ra 0,33 мкм).

Суть способа заключается в том, что обработка идет не в обычном масле, а в особом «высокодисперсном порошковом диэлектрике», представляющим собой специальную разработанную высокодиспергирующую углеводородную жидкость «Great Oil», в которую добавляется «порошковая» присадка «PI-KAGEN» ультра дисперсные порошки хрома, кремния и др.

Мелкодисперсные частички не выпадают в осадок. Они снимают статические заряды с электродов и дробят малые искровые разряды на разряды с еще меньшей энергией. Дробление разрядов позволяет увеличить энергию на межэлектродном промежутке, резко ускоряя процесс выхаживания.

При обработке на электроэрозионных вырезных станках, благодаря тому, что используются импульсы малой энергии, шероховатость обработанной поверхности реально достигается Ra 0,2 мкм.

Вследствие того, что при обработке главную роль играют тепловые процессы в рабочей зоне, поверхностный слой металла, подвергается действию высоких температур, претерпевают значительные изменения. Зона термического влияния располагается на поверхности обработки, как правило, неравномерно. Глубина зоны термического влияния зависит от материала заготовки и от электрического режима работы. Большим энергиям импульса, реализуемым в работе, соответствует большая глубина измененного слоя металла. Зона термического влияния для большинства сталей и сплавов имеет сложную структуру, зависящую от режимов обработки. Так, при обработке стали Ст15 на токах до 30А (частота 400 Гц), измененный слой представлен в виде, характерного белого «слоя». При обработке на токах до 100 А измененная зона состоит из двух слоев — верхнего «белого слоя» и нижнего слоя с мартенситной структурой. При обработке закаленной заготовки из стали 45, кроме указанных слоев, характерно наличие третьего слоя отпуска с твердостью ниже, чем у основного металла. Аналогичная картина наблюдается при обработке углеродистой закаленной стали, марки У8А. Таким образом, зона с измененной структурой у закаленных сталей имеет три слоя: поверхностный «белый слой» с высокой твердостью, далее слой с мартенситной структурой (вторичная закалка) и третий слой — слой отпуска с пониженной твердостью. У жаропрочных и нержавеющих сталей зона термического влияния представляет собой обычно «белый слой», под которым находится исходная структура сплава. Зона термического влияния колеблется от нескольких сотых долей миллиметра при малой энергии им-

пульса (0,02 Дж) до нескольких десятых долей миллиметра, при энергии импульса 20 и более Дж.

При обработке твердого сплава в поверхностных слоях получаются трещины, увеличивается пористость и укрупняется фаза карбидов вольфрама. При энергии импульсов до 5 Дж трещины распространяются на глубину до нескольких десятых долей миллиметра. При уменьшении энергии импульсов и повышении частоты их следования глубина трещин, а также глубина залегания измененного слоя уменьшается, при частоте 22 кГц и работе с энергией импульса 0,01 Дж глубина залегания измененного слоя составляет 0,01 мм.

Трещины на поверхности твердосплавных пластин приводят к их быстрому хрупкому разрушению. Поэтому окончательную обработку пластин из твердого сплава проводят с импульсами малой энергии.

Поверхности деталей, обработанных электроэрозией, имеют повышенную коррозионную стойкость.

Точность электроэрозионной обработки деталей

Под точностью электроэрозионной обработки деталей понимают степень соответствия реальной обработанной поверхности детали идеальной схеме обработки положенной в основу данного метода. Точность обработки имеет свое численное выражение через погрешность обработки, которая и характеризует степень несоответствия реальной детали идеальной схеме, положенной в основу метода обработки.

На электроэрозионных копировально-прошивочных станках реализуется схема прямого копирования. По этой схеме форма и размеры обрабатываемой поверхности являются зеркальным отображением поверхности электрода инструмента в конечной стадии обработки. При этом отображенная поверхность (поверхность детали) отстоит от поверхности электрода-инструмента на расстоянии равном величине межэлектродного промежутка. Поэтому точность получаемых размеров, прежде всего, определяется точностью электрода-инструмента в конечной стадии обработки и колебанием величины межэлектродного промежутка. Кроме того, на точность электроэрозионной обработки оказывают влияние те же факторы, которые влияют на точность механической обработки: состояние технологической системы, погрешность установки, бази рование электрода-инструмента, нагрев заготовки в процессе обработки и некоторые другие факторы.

Наибольшее влияние на точность электроэрозионной обработки оказывают точность изготовления электрода-инструмента и его износ вследствие эрозии. Погрешности, обусловленные износом, могут быть учтены при проектировании электрода-инструмента (размеры корректируют с учетом износа) и построении плана обработки. При этом заданный профиль поверхности и соответствующие размеры можно получить тремя способами:

корректированием размеров электрода-инструмента в соответствии с

его износом при обработке;

путем использования при работе нескольких одинаковых электродов-инструментов, изготовленных без учета износа. Последовательно заменяя в процессе обработки изношенные электроды-инструменты новыми, всегда можно получить требуемую форму и размеры с высокой степенью точности;

сочетанием первого и второго способов. Это позволяет значительно уменьшить потребное количество инструментов и обеспечить высокую производительность обработки, особенно при изготовлении большой партии одинаковых деталей.

Чтобы снизить влияние износа электрода-инструмента на точность изготовления деталей: а) изготавливают электрод-инструмент из материала стойкого к эрозии; б) используют, специальные электрические схемы, при которых на электроде-инструменте осаждается защитная пленка, компенсируя его износ; в) применяют круговое (орбитальное) перемещение электрода-инструмента. При таком (орбитальном) перемещении все точки электрода-инструмента движутся по одинаковым орбитам. При обработке глубоких полостей по мере углубления электрода-инструмента в заготовку радиус траектории увеличивают, это позволяет компенсировать износ.

Точность существующих электроэрозионных станков в необходимых случаях может быть повышена за счет использования дополнительных приспособлений: кондукторов, делительных столов и т.п.

2.1.11 Термохимические процессы в межэлектродном промежутке

Высокая температура канала разряда, малая длительность разряда создают вторичные процессы в межэлектродном промежутке. Происходит почти мгновенное испарение слоев диэлектрической жидкости, прилегающей к стенкам канала разряда. Наличие высокой температуры приводит также к необратимым изменениям части образующихся паров, так как нагретый материал электрода может вступить в химические реакции с образующимися газообразными продуктами и жидкостью. Так, например, керосин (и другие жидкости нефтяного происхождения) подвергаются крекингу. При этом, получаются очень сложные продукты — жидкие (лаки, смолы и др.), газообразные (этилен, метан, углекислый газ и др.) и твердые (кокс, графит). Газообразные продукты образуют с парами жидкости газовый пузырь, расширение которого во все стороны от канала создает ударную волну, оказывающую большое влияние на процесс обработки. Жидкие продукты остаются в межэлектродном зазоре, они постепенно увеличивают вязкость диэлектрической жидкости. Твердые продукты в виде сажи частично остаются в жидкости, частично откладываются на поверхности электродов, образуя пленку. Наибольшую плотность такая коксографитная пленка имеет на аноде. Она обладает высокой эрозионной стойкостью и, постепенно покрывая поверхность анода, способствует уменьшению износа. Можно по-

добрать такой электрический режим, при котором количество вновь образующейся пленки равнялось бы ее убыли за счет износа (режим без износа электрода-инструмента).

Надежное образование пленки наблюдается при оптимальной температуре, когда возникают наилучшие условия для адгезии коксо-графитного слоя пленки с поверхностью, а также достигается при наличии «гнездовых» разрядов, когда локальные участки поверхности вблизи «гнезда» испытывают воздействие теплового фронта группы разрядов. Для обеспечения этого используются импульсы специальной формы — гребенчатые (рис. 2.6). Применение таких импульсов способствует работе электроэрозионного станка с очень малым износом инструмента.

2.1.12 Гидродинамические процессы, происходящие в межэлектродном промежутке в результате электрических разрядов

Высокая температура вблизи канала разряда вызывает парообразование жидкости. Высокая энергетическая насыщенность канала разряда, большие градиенты температур, малое время развития процесса создают ситуацию, подобную взрыву. В межэлектродном промежутке образуется мощная ударная волна, распространяющаяся с большой скоростью. Так как промежуток ограничен эквидистантными поверхностями электродов, то волна распространяется в узкой щели, образованной этими поверхностями. Ударная волна захватывает по пути своего движения твердые частицы, а образующийся парогазовый пузырь действует в зазоре как поршень, вызывая перемещение жидкости вместе с продуктами эрозии. Совокупность этих явлений при действии множества разрядов создает в межэлектродном промежутке эвакуационные вихри и течения, которые всегда направлены от центра обрабатываемой площади к ее периферии. На интенсивность гидродинамических процессов оказывает влияние множество факторов, важнейшие из которых — амплитуда напряжения, скважность, энергия, частота и форма импульсов, характеристики рабочей среды (вязкость, температура кипения), воспринимающей и передающей ударную волну.

В реальном процессе скорость образования новых твердых продуктов эрозии и скорость эвакуации этих продуктов из зоны обработки должны быть равны. Любое нарушение эвакуации вызывает накопление частиц в промежутке между электродами, создает условие для появления фиктивных импульсов, что резко снижает производительность обработки.

Имеется несколько видов ударных волн, отличающихся происхождением и эвакуационным эффектом. Первый вид — ударная волна, порожденная разрядом, в результате которого выплавился металл, и образовалась лунка. Это основной вид разряда и его ударная волна эвакуирует как собственные, так и ранее образовавшиеся частицы. Второй вид — ударная волна, которая образуется при прохождении разряда через твердые токопроводящие частицы, лежащие на поверхности обработки. В результате такого разряда

происходит повторное диспергирование частиц. Энергия необходимая для этого, намного меньше, чем энергия разряда первого вида. Но с энергетической токи зрения затраты на эти разряды практически одинаковы. Избыток энергии в том случае расходуется на образование более мощной, чем в первом случае, ударной волны. Электрический разряд, порождающий такую волну, называется эвакуационным.

2.1.13 Способы интенсификации процесса эвакуации продуктов эрозии из зоны обработки

С точки зрения повышения производительности целесообразно, чтобы все импульсы производили съем металла (выплавляли металл с образование лунок). Однако в условиях затрудненной эвакуации продуктов эрозии из зоны обработки, часть твердых токопроводящих частиц оседает на поверхности заготовки. Поэтому рабочие разряды повторно расплавляют эти частицы, не производя съем металла с заготовки. Для уменьшения количества разрядов, не производящих съем металла нужно улучшить эвакуацию продуктов эрозии.

Для интенсификации процесса эвакуации продуктов эрозии из зоны обработки применяют различные способы. Прокачка, т.е. подача свежей рабочей жидкости в межэлектродный промежуток через отверстия в электроде-инструменте под избыточным давлением (рис. 2.10, а).

Прокачка не только улучшает эвакуацию за счет захвата продуктов эрозии перемещающихся в зазоре жидкостью, но также и возобновляет жидкость, имеющая в рабочей зоне обедненный состав. Подобный же эффект достигается при отсосе из межэлектродного промежутка продуктов эрозии из зоны обработки вместе с рабочей жидкостью (рис. 2.10, б). Прокачка и отсос могут сочетаться, особенно это эффективно при обработке сложных по форме поверхностей детали.

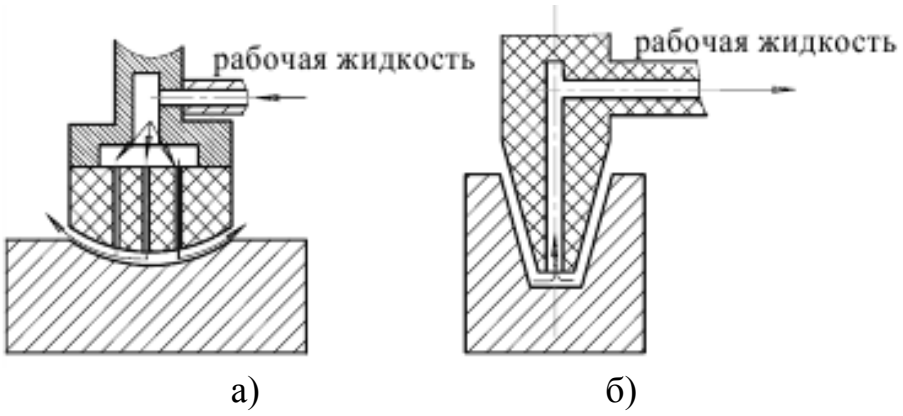


Рис. 2.10. Прокачка а) и отсос б) рабочей жидкости из зоны обработки

При различных перемещениях электродов так же улучшается эвакуация продуктов эрозии. Так используется вибрация одного из электродов (чаще всего электрода-инструмента). При вибрации возникает «насосный эффект», характеризующийся периодическим перемещением объема жидкости в межэлектродном промежутке. Продукты эрозии захватываются перемещающейся жидкостью и покидают пределы рабочей зоны.

При обработке цилиндрических или конических отверстий вращением одного из электродов также создаются потоки жидкости вблизи стенок обрабатываемого отверстия, захватывающие и эвакуирующие продукты эрозии. Кроме того, используется релаксация, т.е. периодическое разведение электродов с прерыванием работы и промывкой межэлектродного зазора свежей диэлектрической жидкостью.

Все меры интенсификации процесса эвакуации способствуют повышению производительности обработки, при этом ликвидируются «застойные» зоны и уменьшается возможность для ошлакования продуктов эрозии в межэлектродном промежутке. В ряде случаев возможно сочетание указанных способов.

Выбор того или иного способа определяют исходя из конкретных условий обеспечения устойчивого процесса обработки.

2.1.14 Рабочие среды

Состав среды, в которую погружены электроды при электроэрозионной обработке, оказывает существенное и разнообразное влияние на течение процесса обработки и его результаты. Это влияние состав среды оказывает на всех стадиях процесса.

На стадии формирования пробоя межэлектродного промежутка (подготовка канала сквозной проводимости) большое значение имеет диэлектрическая прочность рабочей среды и её вязкость. Вязкость определяет время формирования токопроводных частиц в «мостик», по которому происходит пробой рабочей среды.

На стадии электрического разряда, когда происходит съём металла, протекают процессы разложения рабочей среды, окисления, полимеризации и конденсации углеводородов, накапливаются смолистые и асфальтовые сгустки (шлам), коллоидальный кокс-сажа, различные соли, кислоты, частицы обрабатываемого материала и материала электрода-инструмента. Испаряясь с поверхности электродов химические элементы рабочей среды, вступают в соединение с окисными пленками, покрывающими электрод-инструмент, и образуют новые химические элементы. Вязкость рабочей жидкости оказывает влияние на эвакуационные процессы, а теплоёмкость среды способствует охлаждению электродов и предотвращает оплавление их поверхности.

С точки зрения влияния, которое оказывают свойства рабочей среды на электроэрозионный процесс, наиболее важными являются следующие свойства: электрическая прочность; вязкость; температура вспышки; охлаждаю-

щая способность; испаряемость; химическая агрессивность; токсичность; фильтруемость; стоимость.

На электроэрозионных станках чаще всего применяют углеводородные среды; они представляют собой смоляные соединения, включающие различные углеводороды, асфальтосмолистые вещества, серные соединения и кислоты.

Помимо углеводородных сред при электроэрозионной обработке в качестве рабочей среды используется водные растворы, которые обладают многими достоинствами. В воде растворяется большое количество различных веществ, образуется коллоидные растворы и суспензии. Вода дешевле углеводородных сред и обладает большой теплоёмкостью. Могут использоваться эмульсолы. Это растворы, применяемые при механической обработке. Основу эмульсолов составляют вода, минеральное индустриальное масло (марок ИС-12 и ИС-20), а в качестве добавок вводят поверхностно-активные вещества. Каустическая сода, этиловый спирт и другие компоненты эмульсолов выполняют ту же роль, что и при механической обработке, т.е. оказывают охлаждающее, смазочное и моющее воздействие. Наиболее часто используемые рабочие среды и рекомендации по их назначению приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1

Характеристики рабочих сред, применяемых при электроэрозионной обработке

Рабочая среда	Температура вспышки, °С	Выполняемая работа и назначение
Керосин осветительный	50-90	Точная обработка сложнопрофильных поверхностей; прошивка малых отверстий
Масло индустриальное ИС-12; ИС-20	165-190	Высокопроизводительная обработка поверхностей большой площади невысокой точности
Смесь: масло индустриальное, керосин осветительный	165-190	Высокопроизводительная обработка поверхностей большой площади средней точности
Рабочая жидкость для производства сульфанола ТУ38.101845-80	64-74	Обработка поверхностей средней и высокой точности (для станков малой мощности)
Водные эмульсии (эмульсолы)	64-74	Обработка заготовок, резка и обдирка
Вода		Обработка заготовок, грубая резка и обдирка; вырезание и резка проволочным электродом-инструментом

2.1.15 Электрод-инструмент

Форма, размеры и относительное перемещение электрода-инструмента при обработке определяют основные характеристики обрабатываемой поверхности. Поэтому эффективность процесса электроэрозионной обработки зависит от того, какой материал использован для электрода-инструмента и как выполнен сам инструмент. К материалу, из которого изготавливается электрод-инструмент, предъявляются следующие требования: высокая эрозионная стойкость; обеспечение стабильного протекания процесса; легкость механической обработки с целью придания необходимой формы и размеров и невысокая стоимость.

В зависимости от вида электроэрозионной обработки и её параметров этим требованиям в разной степени удовлетворяют следующие конструкцион ные материалы: медь М1, М2; латунь ЛС-62; алюминий и его сплавы Д1, Ал3, Ал5; чугун. Кроме того, используются специальные материалы, созданные для этой цели — углеграфитированный материал марки ЭЭГ и вольфрамомедные композиционные металлокерамические сплавы. В ряде случаев применяется чистый вольфрам в виде проката, проволоки и ленты.

Наилучшими показателями по стабильности процесса обработки обладает медь. Между тем медные электроды в изготовлении получаются дорогими из-за высокой стоимости материала и трудоемкости обработки. Латунь ЛС-62 дешевле, чем медь, но обладает большим эрозионным износом. Электроды из алюминия и его сплавов получаются самыми дешевыми, их легко изготовлять, однако повышенный износ, пониженная стабильность и узкий диапазон режимов, на которых работают алюминиевые электроды, ограничивают область их применения. Серый чугун — доступный и дешевый материал, однако он не обеспечивает стабильности в широком диапазоне режимов. Область его применения ограничена режимами с малой энергией импульсов.

Наиболее износостойким является материал — ЭЭГ. Этот материал состоит из графита, полученного по специальной технологии, близкой к технологии изготовления электродов для электрометаллургии. Материал легко обрабатывается, обеспечивает достаточную стабильность обработки в широком диапазоне режимов. Материал ЭЭГ используется при изготовлении электродов инструментов сложной формы для обработки сложных штампов, пресс-форм и т.д.

Вольфрамомедные и меднографитовые композиции обладают, как правило, высокой износостойкостью, но сравнительно дороги и рентабельны только в том случае, когда размеры электродов не большие, а форма достаточно сложная. В ряде случаев электроды из композиционных материалов могут быть изготовлены путем штамповки или прессования, что позволяет получать готовые электроды-инструменты. Новым методом изготовления последних является метод металлизации распылением.

Для этого используют электродуговой распыливающий аппарат, и струя распыленного жидкого металла направляется в предварительно изготовленную форму. Сначала распыливается медь, которая и обеспечивает получение рабочей поверхности электрода-инструмента. При достижении толщины слоя меди 3–4 мм напыление производится железом до тех пор, пока толщина не достигнет 12–15 мм. После отжига полученный электрод-инструмент присоединяется к державке.

При конструировании электродов-инструментов учитываются следующие особенности: центр тяжести электрода-инструмента должен по возможности располагаться по оси шпинделя станка. Это в значительной мере способствует уменьшению поперечных (горизонтальных) колебаний инструмента при обработке; для возможности многократного использования любых электродов-инструментов, особенно из материала ЭЭГ, инструменты должны иметь необходимый «запас» материала, за счет которого можно восстановить форму сработанной части.

Электрод-инструмент (рис. 2.11) должен состоять из следующих частей: рабочей части 1, определяемой формой и размерами обрабатываемой поверхности.

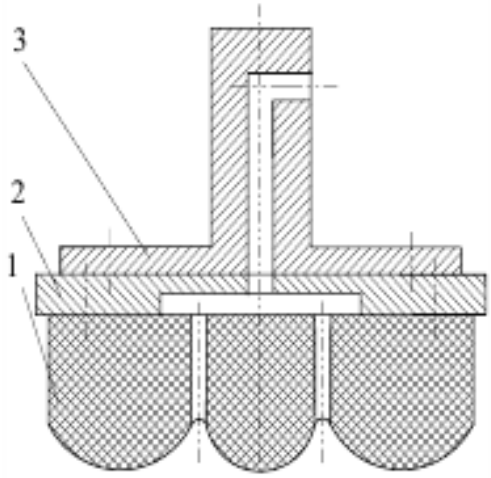


Рис. 2.11. Пример конструкции электрода-инструмента

За одно целое с рабочей частью изготавливается вспомогательная часть, за счет которой происходит восстановление рабочей части при ее износе. Эта часть включает в себя так же другие элементы конструкции, обеспечивающие работоспособность: каналы для подвода жидкости; детали крепления и т. д.; базовые поверхности (например, подэлектродной плиты 2), предназначенные для крепления электрода-инструмента и для ориентирования его относительно детали, приспособления, держателя; держателя электрода 3, к которому присоединяется электрод своими базовыми поверхностями. Сам держатель имеет поверхность, удобную для монтажа электрода на шпинделе станка.

2.1.16 Оборудование

При создании станков для электроэрозионной обработки следует учитывать ряд характерных особенностей, отличающих эти станки от металлорежущих станков:

а) при электроэрозионной обработке инструмент и станок не испытывают нагрузок, аналогичным усилиям резания в металлорежущих станках. Поэтому здесь отсутствует силовой привод, обычный для металлорежущих станков. Механический привод имеют вспомогательные механизмы (привод насоса для подачи жидкости под давлением в межэлектродный промежуток; привод насоса для поддерживания на заданной высоте уровня жидкости в ванне; привод подъёма и опускания ванны; вентиляция; установочные перемещения рабочих органов и т.д.);

б) вследствие необходимости постоянно поддерживать определенный зазор между обрабатываемой поверхностью и электродом-инструментом все электроэрозионные станки имеют специальный узел-регулятор межэлектродного зазора;

в) для питания электроэрозионных станков требуются генераторы импульсов. Мощность генераторов колеблется от нескольких десятых долей до нескольких десятков кВт;

г) процесс обработки осуществляется в жидкой среде, что требует применения соответствующих устройств (ванн и емкостей для жидкости);

д) во время обработки выделяются пары и газы, которые необходимо удалить при помощи вытяжной вентиляции.

Все электроэрозионные станки можно подразделить на два вида: универсальные и специальные. Универсальные электроэрозионные станки — это станки широкого профиля для выполнения копировально-прошивочных работ. В зависимости от инструмента и применяемых дополнительных приспособлений их можно использовать для обработки самых разнообразных поверхностей методом простого или кинематического копирования.

Универсальные станки имеют вертикальную компоновку, позволяющую защитить рабочие элементы станка от загрязнения продуктами эрозии и сократить занимаемые станками производственные площади. Все универсальные станки снабжены жестким тумбообразным столом и подъёмной ванной (или постоянной ванной с от соединяющейся передней стенкой), что позволяет устанавливать на стол большие и тяжелые детали, быстро заполнять и опорожнять ванну.

Специальные электроэрозионные станки служат для обработки определенных деталей или группы характерных деталей. Так как, функциональное назначение отдельных узлов этих станков такое же, как и на универсальных станках, то многие станки содержат блоки и узлы, взаимозаменяемые с универсальными станками. Это относится к генераторам, регуляторам зазора, насосам, системам очистки и т. д. В то же время рабочие и исполнительные органы специальных станков конструируются с учетом обра-

ботки конкретных поверхностей и деталей. Специальные станки легко автоматизируются, часто они имеют систему программного задания рабочих параметров. Для обеспечения устойчивости работы электроэрозионного станка необходимо поддерживать величину межэлектродного промежутка в требуемых пределах.

При увеличении межэлектродного зазора увеличивается количество холостых импульсов вплоть до полного прекращения работы; при уменьшении зазора уменьшается количество рабочих импульсов и увеличивается количество фиктивных и короткозамкнутых импульсов, вплоть до полного короткого замыкания.

В первом случае регулятор должен подвести электрод-инструмент к детали до возобновления процесса обработки, во время нужно отвести электрод-инструмент, чтобы ликвидировать короткое замыкание и создать условия для прохождения рабочих импульсов.

По мере удаления материала обрабатываемой детали и износа электрода-инструмента происходит увеличение межэлектродного зазора. Поэтому необходимо постоянное сближение электродов с одновременным соблюдением величины зазора. Скорость углубления электрода-инструмента не является постоянной даже во время прошивания цилиндрического отверстия. Кроме того, из-за постоянно изменяющейся концентрации продуктов эрозии в межэлектрод ном промежутке мгновенные значения скорости электрода-инструмента могут отличаться не только по своей величине, но и по закону. Поэтому лишь в редких случаях перемещение электрода осуществляется с помощью систем принудительной подачи, применяемых в обычных металлорежущих станках.

Таким образом, объектом регулирования является величина межэлектродного зазора. Однако как параметр регулирования она не может быть использована, потому что измерение зазора в процессе обработки затруднительно. Параметрами, косвенно отражающими состояние и величину межэлектродного промежутка, являются напряжение и ток, проходящий через него. Напряжение изменяется от наибольшей величины при холостых импульсах до минимальной величины при коротком замыкании электродов. Ток изменятся от нуля при холостых импульсах до наибольшей величины при коротком замыкании. Устойчивому протеканию процесса соответствуют некоторые средние значения этих параметров при любом сочетании напряжения, тока, частоты и скважности импульсов. Возможно использование и других параметров регулирования, например, мощности импульсов, средней скорости внедрения электрода в обрабатываемое изделие и т.д.

Блок-схема автоматического регулятора электроэрозионного станка показана на рис. 2.12. Регулятор работает следующим образом: сигналы, снимаемые с электроэрозионного промежутка и несущие информацию о процессе, преобразуются в блоке преобразования БП в форму, удобную для дальнейшего их использования. Сигнал на выходе с БП сравнивается в блоке сравнения БС с эталонной величиной сигнала, сформированного в бло-

ке задания БЗ. Величина рассогласования этих сигналов после усиления в блоке БУ подается на исполнительный двигатель ИД, который обеспечивает подачу электрода-инструмента.

Величину эталонного сигнала блока БЗ устанавливает оператор. При работе станка оператор задает величину эталонного сигнала, добиваясь величины рассогласования на выходе БС такой, чтобы ИД поддерживал требуемый зазор по мере съема материала. Так как при этом электрод-инструмент должен непрерывно перемещаться, то величина рассогласования всегда будет отличаться от нуля. Соответствующая этому подача определится величиной съема материала и площадью обработки. При холостом ходе так же, как и при нормальной работе, величина рассогласования положительная, но ее значение больше, а, следовательно, больше и подача электрода, что способствует быстрому вступлению станка в работу. При коротком замыкании величина рассогласования отрицательная, электрод-инструмент отводится от детали и короткое замыкание ликвидируется.

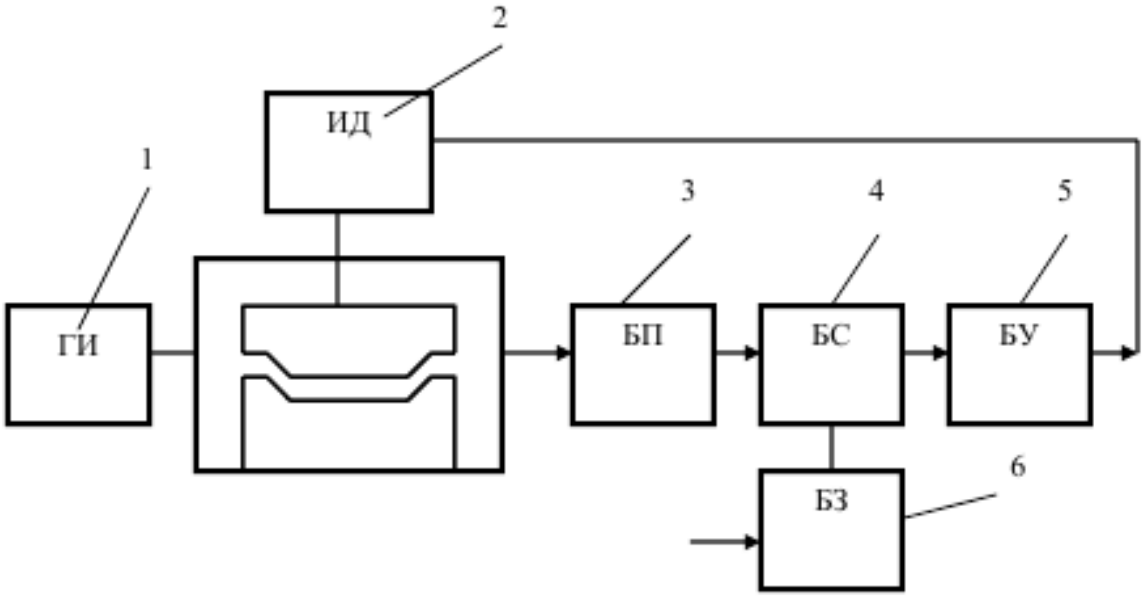


Рис. 2.12. Блок-схема автоматического регулятора зазора: 1 — генератор импульсов; 2 — исполнительный двигатель; 3 — блок преобразования; 4 — блок сравнения; 5 — блок усиления сигналов; 6 — блок задания.

2.2. Лазерная обработка

2.2.1 Общие сведения о лазерах

Одним из качественно новых технологических процессов, все шире внедряемых в производство, являются лазерные технологии. В их основе лежит тепловое воздействие на материалы электромагнитного излучения, создаваемого оптическими генераторами — лазерами.

Возможности сфокусированного пучка лазерного излучения уникальны. Процесс обработки лазерным лучом отличается от традиционных методов обработки отсутствием контактных явлений в зоне обработки, минимальной зоной теплового воздействия, универсальностью сфокусированного пучка — инструмента и возможностью автоматизации процесса.

В атомах электроны вращаются вокруг ядер по орбитам, составляющим дискретные электронные слои. Вращающиеся электроны обладают энергией, зависящей от расстояния данного слоя от ядра. Таким образом, можно рассматривать систему уровней энергии, которые составляют энергетический спектр атома или молекулы.

Возможное наименьшее энергетическое состояние атома является устойчивым (основное состояние). Переход атома или молекулы в более высокое энергетическое состояние связано с его возбуждением.

Число частиц в единице объема вещества, имеющих данный уровень энергии, называют населенностью энергетического уровня. В возбужденном состоянии населенность верхних энергетических уровней повышенная. Это явление называют инверсией населенности. Снижение энергии происходит за счет ее выделения в виде квантов. Это, так называемый, излучательный квантовый переход.

Энергия может снижаться и за счет безизлучательных переходов (за счет передачи избытка энергии другим частицам или усилия теплового колебания решеток).

Излучательные квантовые переходы могут быть самопроизвольными (спонтанными) и вынужденными. Спонтанное излучение происходит случайно, кванты испускаются хаотично в разные моменты времени и в разных направлениях в пространстве. Поэтому такое излучение является некогерентным и широкополосным по спектру.

Вынужденное излучение инициируется поглощением попадающих в вещество квантов и созданием инверсии населенности. При вынужденном излучении в процесс вовлекаются как первичные вынуждающие кванты, так и вторичные, испускаемые возбужденным атомом. Поэтому выделяемая при этом процессе энергия увеличена. В отличие от спонтанного излучения, вынужденное является когерентным, оно соответствует частоте, фазе, поляризации и направлению первичного излучения.

2.2.2 Принцип работы лазеров

В основе работы лазеров лежат три явления: поглощение веществом энергии, спонтанное и вынужденное излучения возбужденной системы атомов.

Осуществление инверсии населенности в веществе может происходить за счет поглощения энергии внешнего электромагнитного излучения или другими воздействиями (например, электронным возбуждением). Такие процессы условно называют «накачкой».

Следует заметить, что хотя возбужденные атомы могут иметь большое количество энергетических уровней, переходы возможны только между двумя соседними.

На рисунке 2.13 в качестве примера рассмотрены схемы оптической накачки и получения лазерного излучения при наличии трех и четырех энергетических уровней. Первая схема (рис. 2.13, а) реализована Н.Г. Басовым и А.М. Прохоровым (1955 г.) в активной среде рубина с примесью хрома.

В результате оптической накачки повышается энергия на уровне 3 за счет перевода атомов с основного в возбужденное состояние и осуществляется переход 3→2 в ионах хрома безизлучательным путем. Вероятность перехода 3→2 значительно больше, чем 2→1, в силу чего происходит накопление энергии на уровне 2. Поскольку создается инверсия населенностей, возникает вынужденное излучение 2→1.

При четырехуровневой схеме (рис. 2.13, б) (неодимовое стекло и кристалл граната с примесью ионов неодима) за счет накачки повышается энергия четвертого уровня ионов неодима. Здесь вероятности переходов 4→3 и 2→1, осуществляемых безизлучительными процессами, больше, чем квантового перехода 3→2. Поэтому на уровне 3 создается инверсия населенности и возникает лазерное излучение 3→2.

Важным условием работы лазера является усиление лазерного излучения в так называемых активных средах из-за лавинного размножения квантов излучения. Понятно, что чем больше активной среды и уровень накачки, тем больше интенсивность выходящего из нее излучения.

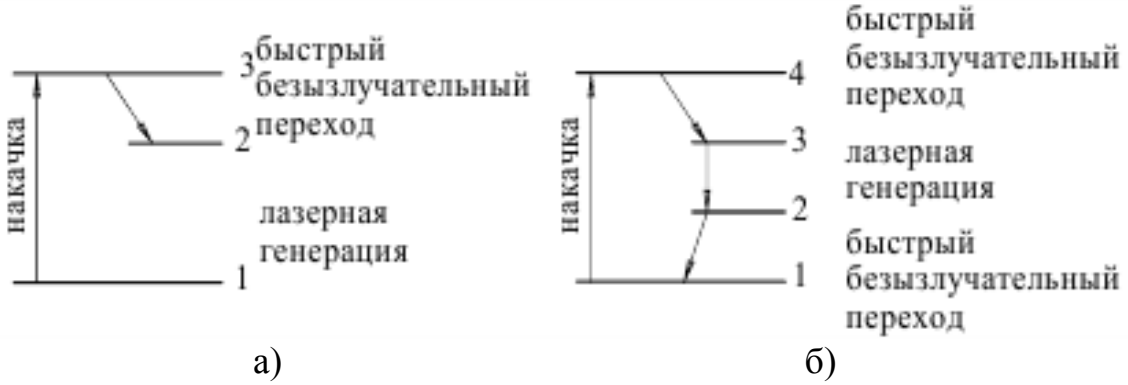


Рис. 2.13. Схемы накачки: а) трехуровневая схема, б) четырехуровневая схема.

С помощью плоскопараллельных зеркал, одно из которых полупрозрачно, можно удлинить прохождение излучения в активной среде и создать условия для его усиления и генерирования. На рисунке 2.14 схематично показан резонатор, основанный на этом принципе.

Первоначально (а) все атомы активной среды (вещества) находятся в основном состоянии кроме трех. Внешнее электромагнитное поле переводит часть атомов в возбужденное состояние — происходит процесс поглощения (б). При этом спонтанно возникшие фотоны (в), двигающиеся вдоль оси активной среды, отражаясь от зеркал резонатора (в, г), каждый раз будут

вызывать вынужденное излучение идентичных фотонов. Спонтанно излученные фотоны, имеющие другие направления, будут выходить из активной среды. Вынужденное излучение возбужденных атомов приведет к лавинному процессу рождения фотонов, подобных первичным (г, д).

Этот процесс будет продолжаться до того времени (д), пока интенсивность излучения достигнет своего порогового значения, после чего появится направленный пучок лазерного излучения (4). Для получения усиления вышедшие из резонатора волны должны быть в одинаковой фазе, чтобы при их интерференции (сложении) результирующая амплитуда стала максимальной.

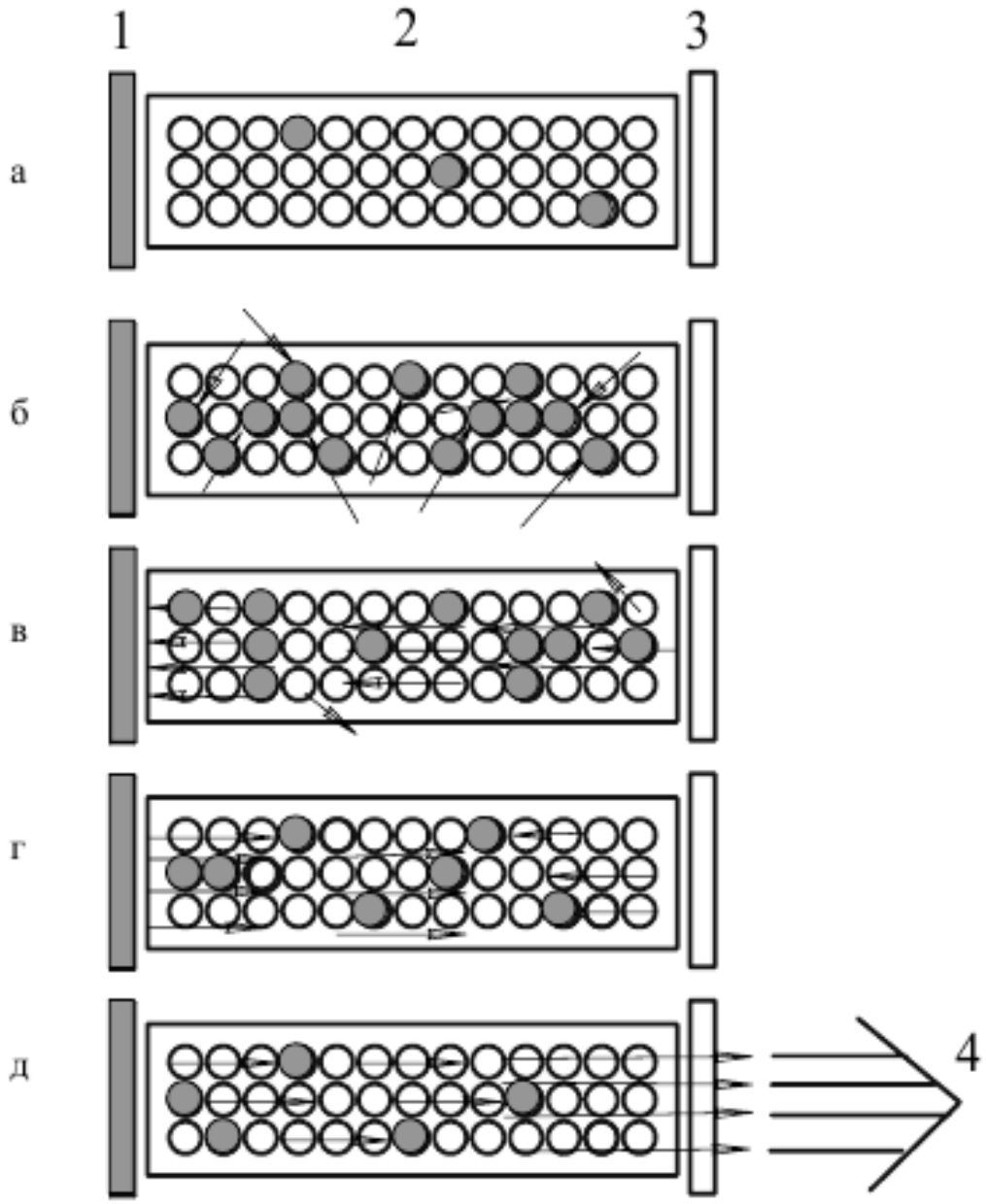


Рис.2.14. Схема работы активной среды в резонаторе с плоскопараллельными зеркалами: 1 — глухое зеркало, 2 — активная среда, 3 — полупрозрачное зеркало, о — невозбужденные атомы (основное состояние), • — возбужденные атомы.

Лазерное излучение по своей структуре представляет собой совокупность отдельных порций фотонов, время образования и выхода которых, также как и участки резонатора, где осуществляется этот выход, могут различаться.

В настоящее время для различной обработки материалов при помощи лазерного излучения в основном применяются твердотельные и газовые лазеры.

Лазеры, в которых в качестве активной среды используется твердое тело с ионами, играющими роль активных центров (например, стержень из стекла или алюмоиттриевого граната, активированный неодимом), называются твердотельными.

Лазеры, в которых в качестве активной среды используются газы или их смеси (например, аргон или смесь газов из углекислого газа, азота и гелия), называют газовыми.

Те и другие лазеры конструктивно могут быть исполнены для работы в импульсном, импульсно-периодическом и непрерывном режимах излучения. Импульсный режим работы лазера характеризуется одиночными импульсами лазерного излучения, следующими друг за другом через заданный промежуток времени. Импульсно-периодический режим работы сопровождается непрерывными сериями импульсов с короткими временными промежутками между ними. При отсутствии промежутков между импульсами режим работы лазера называется непрерывным.

Принципиальная схема твердотельных лазеров показана на рисунке 2.15.

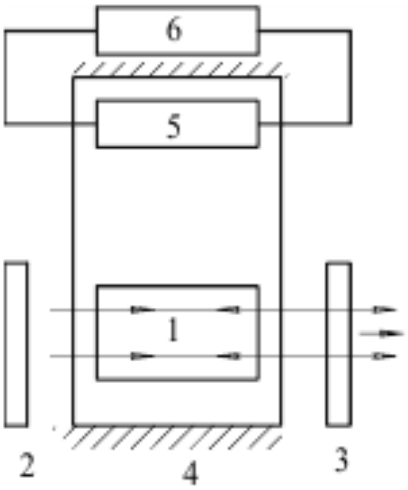


Рис. 2.15. Принципиальная схема твердотельного лазера: 1 — активный элемент; 2,3 — резонатор; 4 — отражатель; 5 — лампа накачки; 6 — источник питания.

Активный элемент 1, лампа накачки 5 и отражатель 4 составляют узел, называемый квантроном. Он охлаждается дистиллированной водой (внутренний контур охлаждения). Наружный контур охлаждения лазера подключается к водопроводной сети. Квантрон, помещенный в резонатор (заключенный между зеркалами 2 и 3), превращается в генератор (излучатель) ла-

зерного излучения. Источник 6 питания лазера предназначен для обеспечения работы его излучателя в определенном режиме работы.

Из газовых лазеров для обработки материалов наиболее приемлемым оказались лазеры на углекислом газе, обладающие достаточными мощностями и работающие на различных режимах излучения на длине волны 10,6 мкм. В этих лазерах увеличение снимаемой мощности происходит за счет добавления к рабочему газу CO_2 молекулярного азота и гелия. Эта смесь газов подается в газоразрядную полость. При приложении электрического поля молекулы CO_2 и N_2 возбуждаются и создаются их вынужденные колебания. Молекулы N_2, сталкиваясь с молекулами CO_2, повышают их энергетический уровень за счет передачи своей энергии. После чего молекулы CO_2, переходя на более низкий энергетический уровень, испускают лазерное излучение. При этом молекулы He (благодаря высокой подвижности атомов) служат для охлаждения рабочей смеси, способствуют расселению нижнего энергетического уровня и стабилизируют разряд. Для поддержания работоспособности газовой смеси в процессе работы в конструкциях лазеров предусматривается подача свежих газов в газоразрядную полость излучателя.

В процессе работы лазера происходит повышение температуры рабочей смеси газов, приводящее к снижению его выходной мощности. Для устранения этого явления возникает необходимость охлаждения этой смеси. В CO_2 лазерах с медленной прокачкой газовой смеси отвод тепла из зоны разряда осуществляется охлаждающей жидкостью (водой) через стенки газоразрядной полости (диффузионное охлаждение). Газоразрядные лазеры с медленной прокачкой газовой смеси — лазеры первого поколения.

Требования производства привели к созданию более мощных технологических CO_2 лазеров (рис. 2.16). Их создание оказалось возможным за счет применения другого способа отвода тепла из зоны разряда. В этом случае отвод тепла происходит заменой нагретой части смеси на свежую газовую смесь (конвективное охлаждение).

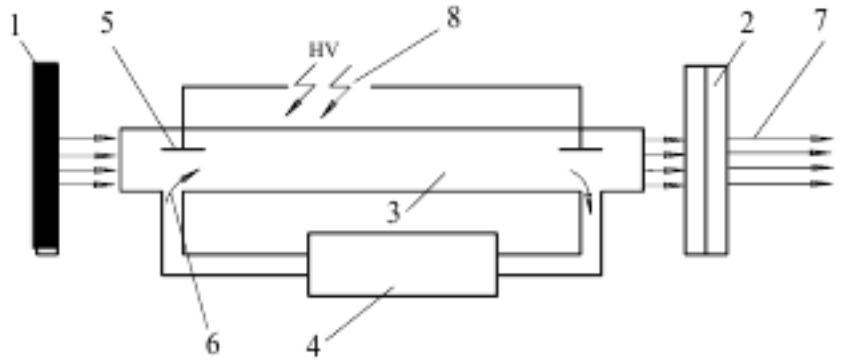


Рис. 2.16 Принципиальная схема быстропроточных CO_2 лазеров 1 — непрозрачное (глухое) зеркало резонатора; 2 — полупрозрачное зеркало резонатора; 3 — газоразрядная полость излучателя; 4 — теплообменник; 5 — электроды; 6 — направление потока газовой смеси; 7 — лазерное излучение; 8 — высокое напряжение.

Ввиду того, что в этих лазерах прокачка смеси газов производится с большой скоростью, они называются газоразрядными лазерами с быстрой прокачкой.

2.2.3 Основные свойства лазерного излучения

Широкое использование лазеров для различных практических целей обусловлено некоторыми уникальными свойствами их излучения.

Когерентность как свойство лазерного излучения представляет собой согласованное протекание во времени ряда волновых процессов.

Направленность обусловлена тем, что активная среда помещена между двумя плоскопараллельными зеркалами (открытый резонатор). В резонаторе же могут поддерживаться только те электромагнитные волны, которые распро-страняются в близком к оси направлении или вдоль его оси. Направленность характеризуется углом расходимости пучка лазерного излучения, который колеблется от нескольких угловых секунд до нескольких угловых минут.

Это свойство пучка лазерного излучения имеет большое практическое значение в связи, локации и в других областях техники.

Лазерное излучение имеет определенный интервал частоты, обычно очень узкий. Это свойство называют *монохроматичностью* излучения. Монохроматичность связана с определенностью квантового перехода и генерации и усиления излучения только на определенных частотах резонатора.

Яркость. Лазер даже небольшой мощности имеет яркость, которая на несколько порядков превосходит яркость обычных источников. Это свойство является следствием высокой направленности пучка лазерного излучения.

В импульсных лазерах излучение длится малые доли секунды, поэтому даже при небольшой величине *излучаемой энергии* лазера его *мощность* значительна. Обычно импульсные лазеры характеризуются излучаемой энергией в джоулях, тогда как непрерывные — мощностью в ваттах.

Плотность мощности излучения определяется как мощность излучения, падающего на единицу облучаемой поверхности, расположенной, перпендикулярно к направлению лазерного пучка. Для лазерных установок импульсного действия пользуются понятием плотности энергии (энергия излучения, падающая на единицу поверхности, расположенной перпендикулярно к направлению лазерного луча).

2.2.4 Промышленные лазерно-технологические системы (комплексы), применяемые для обработки материалов

Для реализации лазерной технологии созданы различные лазерно-технологические системы (ЛТС).

ЛТС — это комплекс, включающий лазер, формирующий рабочий инструмент, равно пригодный для обработки различных материалов и осуществления разнородных процессов и устройств для программного перемещения луча или заготовки.

Структурная схема ЛТС показана на рисунке 2.17 . ЛТС состоит из следующих основных узлов: лазера 1, энергетического канала 3 (оптическая система для транспортировки и формирования лазерного излучения), рабочего стола 8, узла управления рабочими органами системы 9, источника энергетического питания 10.

Местоположение сфокусированного пятна лазерною излучения на поверхности заготовки в данный момент времени может быть задано:

перемещением пятна при помощи зеркал;

перемещением пятна за счет относительного перемещения пятна и обрабатываемой заготовки;

за счет перемещения заготовки относительно неподвижного пятна.

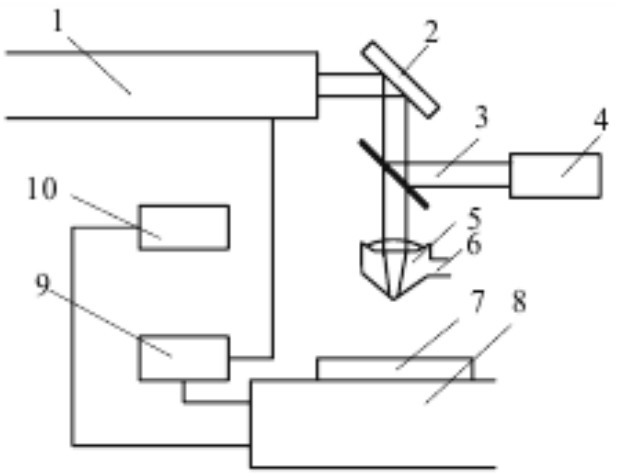


Рис. 2.17. Структурная схема лазерной технологической системы, предназначенной для обработки материалов: 1 — излучатель (генератор); 2 — отключающее зеркало; 3 — энергетический канал; 4 — средства наблюдения; 5 — оптическая фокусирующая система; 6 — технологический газ; 7 — обрабатываемая деталь; 8 — предметный стол; 9 — узел управления; 10 — источник энергетического питания.

Последние два метода наиболее широко используются в ЛТС, предназначенных для резки материалов.

ЛТС для работы в производственных условиях должна обладать:

необходимой мощностью;

стабильным излучением в процессе работы и достаточно высоким КПД;

простой и компактной конструкцией при хорошем дизайне;

высокой надежностью и большим сроком службы узлов и деталей;

простым и удобным управлением;

небольшими эксплуатационными затратами и ремонтопригодностью;

максимальным удобством в обслуживании и безопасными условиями работы.

2.2.5 Лазерная резка материалов

Лазерная резка материалов является наиболее распространенной из лазерных технологий.

Лазерная резка имеет следующие преимущества перед механической (вырубка на штампах, фрезерование и пр.): нет износа инструмента вследствие передачи больших усилий; не образуется стружка; отсутствие факторов, искажающих конструктивные параметры деталей при резке (при штамповке нельзя создавать конфигурацию острых углов или округлений малого радиуса); большие скорости, в 3–5 раз превышающие скорости фрезерования; меньшая трудоемкость; возможность автоматизации; повышение коэффициента использования материалов до 0,7–0,85. Лазерная резка относится к гибкоперестраиваемой технологии. Эти преимущества способствовали быстрому распространению лазерной резки в машиностроении. Высокая динамика развития лазерной технологии привела к тому, что уже в настоящее время в Западной Европе, США и Японии лазерная технология является основной для резки листов толщиной 0,1–10 мм.

Следует отметить, что в ряде отраслей машиностроения лазерная резка применяется при производстве не только заготовок, но и как конечная операция изготовления деталей. Поэтому очень важно знать влияние последствий лазерной резки на структуру и свойства материалов, как при непосредственном их проявлении, так и опосредствованно после дополнительных обработок.

Физические процессы при лазерной резке металлов и сплавов

Различают три режима проведения лазерной резки:

1. Испарением.
2. Плавлением.
3. Сгоранием.

При первом режиме интенсивность излучения должна быть такой высокой, чтобы потери тепла теплопроводностью были минимальными. Резка испарением осуществляется твердотельными лазерами в пульсирующем режиме и применяется достаточно редко. При резке плавлением материал в области шва расплавляется и удаляется с помощью технологического газа (N, Ar и др.).

Наиболее часто применяется лазерная резка сгоранием, которая используется при обработке металлов, предрасположенных к горению ниже точки плавления и образующих жидкотекучие окислы (углеродистые стали, сплавы титана и др.). При резке сгоранием в качестве технологического газа применяют воздух или кислород. Таким образом, при резке происходит

сложный процесс, включающий не только плавление металла и его удаление, но и интенсивное окисление. Последнее обеспечивает усиление поглощения лазерного излучения, повышает локальность реза и способствует более равномерному удалению продуктов резки. При этом могут быть два режима резки: управляемый и неуправляемый-автогенный режим. Управляемый режим резания возможен тогда, когда фронт горения самопроизвольно не распространяется на всю зону воздействия кислорода на поверхности разрезаемой заготовки и локализуется в зоне реза. Поэтому в этом случае ширина реза определяется диаметром сфокусированного пятна лазерного излучения и, получаются ровные кромки реза. Автогенный рез происходит тогда, когда металл горит за счет тепла реакции по всей зоне воздействия кислорода на поверхности и в итоге получается рваный и бесформенный рез. Перевод из автогенного режима резки в управляемый достаточно легко осуществляется за счет увеличения скорости перемещения детали относительно луча или наоборот.

При резке плавлением материал не горит. Расплав из зоны реза уносится газовой струей. Такой механизм газолазерной резки имеют медь, алюминий и их сплавы за счет образования тугоплавких окислов при взаимодействии с кислородом. Лазерная резка таких металлов и их сплавов возможна только лазерами большой мощности.

Рез металла после лазерной резки имеет следующие особенности:

1. Упрочненная поверхность. Прилегающие к резу участки претерпевают скоростной нагрев до оплавления (со скоростями до 10тыс. град./сек.) и столь же быстрое охлаждение. В результате в этих участках имеет место образование структур закалки, а в ряде случаев даже аморфизация поверхности.

2. Изменение химического состава участков металла около реза. Высокие температуры (плавление) и окисляющая среда способствуют проникновению в поверхностные слои металла окислителей и азота воздуха.

3. Характерный рельеф шероховатости поверхности реза.

4. Неоднородность распределения локальных напряжений, возможность возникновения трещин в результате больших термических напряжений.

Следует отметить, что перечисленные особенности поверхности реза в разной степени влияют на различные свойства материала. В самом деле, трудно ожидать сколько-нибудь значительного изменения статических механических свойств у образцов, вырезанных лазером, так как глубина зоны термического влияния лазерного излучения весьма мала в сравнении с шириной образца, а шероховатость незначительно сказывается на статических механических свойствах.

Практика проведения лазерной резки материалов

Лазерная обработка, первоначально применяемая для резки тонколистовых материалов, все чаще используется и при резке толстолистовых материалов (до 10–12 мм для черных металлов). Считается, что лазерная резка металлов больших толщин экономически нецелесообразна и наиболее эффективным процессом для них является плазменная резка, а в некоторых случаях и электроэрозионный способ обработки.

Лазерная резка металлов производится при плотности мощности 10^6–10^7 Вт/см^2. Лазерная резка материалов обычно производится непрерывными лазерами.

Метод лазерной резки материалов заключается в том, что под воздействием энергии сфокусированного пучка лазерного излучения, направленного на обрабатываемую поверхность, происходит плавление и испарение материала. При перемещении луча по заданному контуру и удалении паров и жидкого металла из зоны резания воздухом, инертными газами или кислородом, подаваемыми соосно лучу, образуется рез. Такая резка называется газолазерной. Технологические (режущие) газы, кроме указанного, выполняют еще следующие функции: охлаждают кромки реза; защищают от сгорания органические вещества (N, Ar) и кислород; первоначально способствуя предварительному окислению металла; значительно увеличивает его поглощательную способность и дают дополнительную энергию (экзотермическая реакция). На некоторых ЛТС в зону резания (с целью увеличения их технологических возможностей), кроме режущего газа, подается вода.

Лазерная резка материалов, в настоящее время производится двумя способами.

При первом способе рез производится за счет удаления продуктов разрушения материала из зоны воздействия лазерного излучения. Таким способом режут металлы, ткани и т.д. В этом случае для повышения эффективности процесса соосно лучу подают струю химически активного или инертного газа.

Второй способ — способ управляемого термоскалывания — применяют для разделения хрупких материалов (например, стекла или керамики). При этом способе лазерный луч, перемещаясь по поверхности хрупкого материала (например, стекла), вызывает появление термического напряжения и микротрещин, следующих за ним. Разделение материала происходит по линии воздействия лазерного луча. Этот способ в какой-то мере подобен алмазной резке хрупких материалов.

Ширина реза определяется диаметром фокального пятна лазерного луча и составляет 0,2–0,5мм для диаметра пятна луча 0,2–0,3мм.

Способность материала подвергаться резке лазером и глубина реза зависят от его физико-механических свойств (от степени поглощения лазерного излучения при высокой температуре, от теплопроводности и удельной

теплоемкости, температуры плавления и испарения и т.д.), от мощности лазерной установки, от скорости обработки, от вида применяемого технологического газа и т.п.

Лазерная резка дает хороший эффект и ее применение технически целесообразно при изготовлении деталей из листовых материалов:

имеющих различные свойства (мягких, твердых, тугоплавких металлов, различных тканей, органостеклопластиков и т.п.) на одной и той же машине, одним и тем же инструментом;

в условиях мелкосерийного производства для получения плоских деталей, часть размеров которых имеет тенденции изменяться в процессе производства изделия;

плохо поддающихся холодной штамповке: аустенитные и высоколегированные стали и сплавы, дерево, оргстекло и т.д.;

при необходимости изготовления небольших серий (примерно до 10000–15000 деталей в год) сложноконтурных деталей, имеющих вырезы различной конфигурации внутри детали (узкие щели, пазы с острыми углами, перемычки толщиной в пределах 1 мм и т.д.);

при серийном производстве штрихового мерительного инструмента и других случаях, когда применение лазерной резки экономически целесообразно.

В настоящее время созданы ЛТС для обработки объемных деталей из листовых материалов. Лазерная обработка таких деталей возможна на машинах, у которых имеется управление рабочими органами по пяти осям: три поступательно движущихся и две вращающихся оси. Это дает возможность при заданном перемещении детали постоянно направлять лазерный луч по нормали к обрабатываемой поверхности, что необходимо для получения качественного реза.

Ниже приводятся сравнительные таблицы 2.2 и 2.3, показывающие возможности различных методов резки титана разной толщины и затраты на эти операции, включая стоимость оборудования. Следует учесть, что после лазерной резки последующая обработка поверхностей реза, как правило, не требуется.

Таблица 2.2

Сравнение скорости различных методов резки титана

Метод резки	Скорость резания мм/с при толщине в мм		
	3	6	12
Пилами	1,8	1,3	0,5
Лазером	50	25	16,7
Газокислородная	25	19,2	8,3
Плазменная	25	20,8	15

Таблица 2.3

Сопоставление затрат на резку титана различными методами

Метод резки	Затраты на обрабатывание, непосредственную резку и последующую обработку в пересчете на 1 м длины при толщине в мм, в $		
	3	6	12
Пилами	8,1	11,7	22,5
Лазером	3,8	6,5	6,8
Газокислородная	4,0	7,2	7,6
Плазменная	3,8	7,7	8,5

Лазерная обработка отверстий

Применение лазерной технологии для прошивки отверстий в машиностроении связано с тем, что механическое сверление отверстий малого диаметра сопряжено с определенными трудностями, степень которых возрастает при обработке современных твердых и жаропрочных материалов.

Лазерная обработка отверстий производится на установках, работающих в импульсном и непрерывном режимах излучения. Применяемые плотности мощности колеблются в пределах 10^7 Вт/см^2. При этом глубина отверстия и его форма зависят от фокусного расстояния линзы, положения фокальной плоскости относительно поверхности заготовки, энергии излучения и других факторов. Поэтому в зависимости от свойств обрабатываемого материала, размеров отверстий, точности отверстий необходимо выбирать соответствующие режимы и методы обработки.

Лазерная обработка наиболее эффективна при изготовлении небольших (до 1мм) отверстий на труднообрабатываемых материалах, например, в алмазных фильерах, рубиновых часовых камнях и т.д.

Отверстия до 1 мм, как правило, получают за счет копирования формы сфокусированного пучка лазерного излучения, а большего диаметра — за счет обработки по кольцевому контуру.

Грубые отверстия при импульсной обработке можно получать за счет вырезания обходом по контуру подобно высверливанию.

2.2.6 Лазерная сварка

Применение лазеров существенно расширяет возможности технологического процесса сварки. С помощью лазеров можно сваривать конструкционные стали и сплавы (титановые, медные, алюминиевые и др.), неметаллы (полиэтилен, полихлорвинил, искусственные ткани и т. п.).

В основе лазерной сварки лежит процесс быстрого нагрева малых объемов металла до расплавления, что становится возможным благодаря высокой концентрации энергии в лазерном луче.

Сварка заготовок происходит после достижения на поверхности металла температуры, равной точке его плавления. В зоне воздействия лазерного луча в поверхностном слое материала начинается плавление и перемещение жидкой фазы в глубь свариваемых заготовок. Образуется сварочная ванна, которая проникает на определенную глубину. При перемещении лазерного луча вдоль свариваемых поверхностей формируется сварочный шов.

Основные параметры, которые определяют возможность образования сварного шва — мощность лазерного излучения и время воздействия луча на данном участке. Процесс сварки осуществляется при плотностях мощности примерно 10^5 –10^6 Вт/см^2. Меньшие плотности не обеспечивают плавления металла вследствие высокой теплопроводности, большие могут вызвать испарение и выброс материала из зоны сварки.

Лазерная сварка имеет ряд достоинств: отсутствие контактных воздействий; высокая концентрация энергии; малая продолжительность воздействия лазерного луча в данном участке. Это приводит к существенному снижению зоны термовлияния по сравнению с дуговой сваркой и, как следствие, к малым температурным деформациям; отпадает необходимость применения флюсов при сварке конструкционных сталей и вакуумных камер при сварке химически активных металлов (например, Ti сплавов); сварка ведется, либо на воздухе, либо в среде защитных газов (Ar, He и др.); сварка осуществляется в различных пространственных положениях и в труднодоступных местах, например, внутри вакуумных приборов через окна, прозрачные для лазерного излучения; возможность вести сварку без присадочного материала; сварка тонкостенных и миниатюрных деталей, возможность сварки традиционно несвариваемых материалов.

Лазерная сварка цветных металлов с успехом заменяет им процесс пайки. Исключается необходимость использования дорогостоящих припоев. Кроме того, процесс лазерной сварки более экологически чист, чем пайка, так как не требуется применение флюсов.

К недостаткам лазерной сварки можно отнести необходимость повышенной точности, как подгонки деталей, так и позиционирования свариваемых деталей относительно луча лазера.

2.2.7 Лазерная маркировка

Сфокусированное лазерное излучение с определенными параметрами воздействия на материалы приводит к их испарению, оставляя след на участке облучения. Относительное перемещение луча или заготовки по заданной программе позволяет на обрабатываемой поверхности получать изображения в виде букв, цифр, рисунков и т. д. Эта особенность лазерного излучения используется для маркировки деталей и изделий, имею-

щих сложную конфигурацию, для изготовления различных табличек — носителей информации.

Лазерная гравировка деталей осуществляется за счет удаления небольших объемов материала с их тела. Для этих целей применяются лазерные технологические системы, оснащенные, твердотельными и газовыми лазерами.

Лазерная маркировка имеет ряд преимуществ перед такими методами маркировки деталей и изделий, как клеймение, механическая гравировка, травление и т.п. Применяемые для этих целей при традиционной технологии материалы (чернила, клей, бумага, и другие вспомогательные средства) из употребления исключаются.

Процесс маркировки производится с высокой скоростью (несколько десятков знаков в секунду) при отсутствии механического воздействия на обрабатываемую деталь и стружки. Он не требует последующей обработки и одинаково пригоден для нанесения различной информации на металлические поверхности, бумагу, дерево, стекло и другие материалы, и на покрашенные поверхности, не разрушая слои грунтовки.

Особую важность лазерная гравировка приобретает при изготовлении мерительного штрихового инструмента, увеличивая точность и производительность нанесения знаков и рисок.

2.2.8. Лазерное упрочнение

Основой процесса лазерного упрочнения является быстрый нагрев до высокой температуры (температуры плавления) поверхностного слоя металла с последующим быстрым охлаждением путем отвода тепла в основной объем металла, который остается практически холодным.

В принципе необходимое повышение температуры металла можно получить и стандартными методами – нагревом в термической или индукционной печи. Однако эти методы часто являются непригодными из-за неоднородности нагрева. Кроме того, в крупногабаритных деталях очень часто необходимо закалить только часть поверхности, а не весь объем детали. Поверхностную обработку детали можно сделать только лазерной термообработкой, которая может проводиться с оплавлением и без оплавления поверхностного слоя. Чаще всего используют обработку без оплавления с сохранением исходной шероховатости Ra=0,16 - 1,25мкм. Глубина упрочняемого слоя металла определяется величиной допустимого линейного износа.

Производительность лазерного упрочнения определяется:

$$G_{лаз.терм.} = K_п V d_o, \qquad (2.8)$$

где К- коэффициент перекрытия; V- скорость движения луча (детали);

d_0- диаметр пучка (ширина дорожки упрочнения), d_0= 1-1,5 мм. И более.

Возможна обработка перекрывающимися и неперекрывающимися дорожками. При наложении дорожки упрочнения происходит частичный нагрев предыдущей упрочненной зоны, что может привести к отпуску и снижению твердости. При обработке неперекрывающимися дорожками зазор между ними составляет 10-30% от площади обрабатываемой поверхности, происходит уменьшение износа в 2-3 раза.

Лазерное упрочнение применяется для обработки коленчатых валов двигателей, гильз цилиндров, зубчатых колес, деталей химического, нефтяного и бурового оборудования.

2.3. Электрофизические методы упрочнения

2.3.1. Методы детонационного и плазменного нанесения покрытия

Эти методы относятся к газотермическим методам, действие которых основано на полном или частичном нагреве материала покрытия до состояния плавления и распылении его газовой струей. Напыляемый материал может быть в виде проволоки или порошка. Нагрев напыляемого материала может производиться от газового пламени, плазмы электрической дуги или от детонации взрывчатой газовой смеси.

В детонационном методе используется энергия кислородно-ацетиленовых взрывов, которая обеспечивает необходимый разогрев и ускорение напыляемого материала, а при плазменном – энергия плазменной струи. Распыляемые частицы материала ударяются в подложку и расплющиваются, образуя тонкие чешуйки, закрепляющиеся на поверхностном шероховатом слое путем механического и физико-механического взаимодействия с материалом основы. В результате взаимодействия отдельных чешуек образуется своеобразная структура напыляемого покрытия. Чем больше скорость соударения частиц, тем выше прочность наносимого покрытия. При детонационном напылении скорость движения напыляемого порошка составляет 600-1000 м/с, что в 4-7 раз больше, чем при плазменном и газопламенном методах напыления.

Особенность этих методов упрочнения – возможность наносить тугоплавкие материалы на металлическую подложку без значительного ее нагрева (не более 1500С), т.е. наносить покрытия на окончательно термообработанные и упрочненные стали, алюминиевые, титановые и другиесплавы после финишной механической обработки, не опасаясь изменения свойств структуры поверхностного слоя.

Процесс плазменного напыления происходит в два этапа:

1) полет и распыление частиц напыляемого материала;

2) удар об обрабатываемую поверхность, соединение частиц с нею и между собой.

Образование покрытия происходит вследствие соударения частиц с поверхностью обрабатываемой детали, их сильного деформирования, расплющивания и разбрызгивания. В результате получаемое покрытие, так же как и в случае детонационного напыления, состоит как бы из чешуек напыляемого материала, соединенных между собой по контактной поверхности участками сваривания, поэтому прочность и плотность покрытия ниже прочности и плотности исходного материала.

При детонационном напылении кинетика и механизм формирования покрытий определяются пластичной деформацией частиц порошка и подложки в зоне соударения, где происходит локальное повышение активности твердой подложки под действием давления от удара твердых частиц, вызывающего упругие искажения решетки и пластическую деформацию.

Это приводит к увеличению прочности сцепления покрытия с основным металлом.

Для повышения физико-механических свойств напыленного слоя и улучшения адгезии к подложке применяют дополнительную операцию оплавления. Сущность ее: напыленный слой нагревают до температуры, близкой к его плавлению. В результате нагрева между напыленным слоем и основным металлом протекает диффузионный процесс, и при остывании образуется плотное покрытие. Поры, остающиеся после напыления, заполняются расплавленной частью напыленного материала. После остывания получается равномерный тонкий без пор однородный слой. При этом охлаждение ведут вместе с печью.

Способы оплавления:

- плазменной или газовой горелкой;
- в электрической печи;
- в соляной ванне;
- ТВЧ.

Методом детонаций напыляют пластичные металлы и сплавы (Cu, Ni, Fe и др.), твердые непластические металлы и тугоплавкие соединения (W, Al_2O_3 и др.)

Применение: моторостроение; авиационное, станко- и приборостроение; химическое и металлургическое машиностроение; инструментальное производство; ракетная, космическая и ядерная техника.

При плазменном напылении в качестве плазмообразующих газов используют аргон, неон, азот, водород, гелий, аммиак, природный газ и их смеси. Порошок вводится в плазменную струю.

Разработаны конструкции детонационных установок с внутренним и внешним смесеобразованием. В первом случае роль камеры для образования горючей смеси выполняет ствол; во втором – в ствол подается горючая смесь, подготовленная в смесителе.

НА рис.2.18. представлена схема установки для детанационного нанесения покрытий.

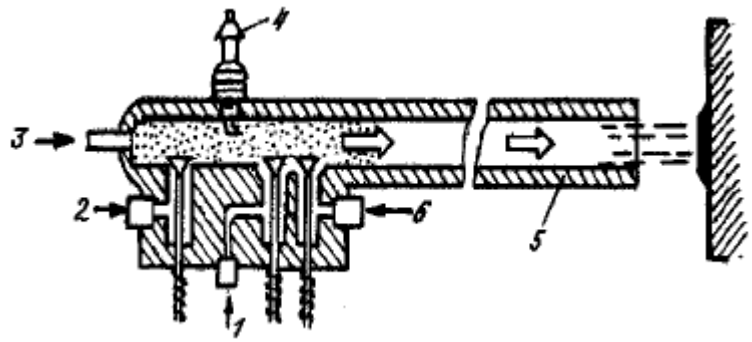


Рис.2.18. Схема детонационной установки с внутренним смесеобразованием: 1-ацетилен; 2- азот; 3- подача порошка; 4- свеча зажигания; 5- выходная труба; 6- кислород

Детонационная установка с внутренними смесеобразователями представляет собой водоохлаждаемый ствол длиной 1-1,8 м с внутренним диаметром от 10 до 40 мм. В ствол подается смесь кислорода и ацетилена вместе с порцией порошка. Взрываемая газовая смесь воспламеняется при помощи электрического импульса, и детонационная волна перемещается по стволу, ускоряя и нагревая порошок. Частицы порошка ускоряются до скорости 500-1000 м/с и ударяются в деталь, образуя пятно диаметром, зависящим от диаметра ствола. Затем ствол очищается азотом, и процесс повторяется. Частота повторений 4-8 циклов/с.

2.3.2. Упрочнение методами воздействия магнитного поля.

Электромагнитное поле успешно применяют в современной технике и технологии для управления свойствами тела и жидкости. В России и передовых странах мира магнитную обработку используют для улучшения свойств конструкционных материалов, воды, растворов, дисперсных систем, резины, режущего и мерительного инструмента, зубчатых колес, тросов, заклепок, станин, буров и т.п.

Внедрение магнитной обработки позволяет уменьшить остаточные и усталостные напряжения в деталях и конструкциях, повысить износостойкость и долговечность различных деталей.

Применяемые на практике методы магнитной обработки материалов различаются по своим физическим методам и технологии производства.

Методы магнитной обработки:

• одним импульсом постоянного магнитного поля напряженностью 100 1000кА/М при различной длительности воздействия: 10 300с и более;

• импульсным магнитным полем напряженностью 50 2000 кА/М при длительности импульса 0,1 10с и с различным количеством импульсов.

Методы обработки постоянным магнитным полем:

• обработка одним импульсом с последующим размагничиванием через 8 24 часа;

• обработка направленной (локальной) концентрацией магнитного потока на заготовку;

• обработка без последующего размагничивания;

• динамическая обработка, когда деталь в поле постоянной напряженности вращается с некоторым ускорением частоты вращения (1-50с) в течение 1+5 секунд

• обработка при свободном перемещении заготовки в полости индуктора;

• обработка детали при свободном перемещении в непосредственной близости от полости индуктора.

Методы импульсной магнитной обработки:

• обработка без последующего размагничивания;

• многоцикловая обработка (2-10 циклов) с выдерживанием между циклами 1-20 минут;

• обработка с применением ферромагнитных сердечников и локальных концентраторов магнитного поля;

• обработка в металлических контейнерах или камерах с применением ферромагнитной жидкости или ферромагнитного порошка;

• комбинированные методы.

Перспективные методы импульсной магнитной обработки:

• обработка с нарастающей амплитудой импульса. Применяют для снятия напряжений в изделиях, работающих при ударных нагрузках. Режим: Н=100-800кА/М, время цикла обработки 0,1-1,0с, число циклов 2-10, время выдерживания между циклами 1-20 минут.

• с вращением детали в соленоидах. Применяют для снятия напряжений в местах сварки разнородных материалов. Режим: Н=100-800кА/М, число циклов 2 - 10, время выдерживания 1 20 минут, частота вращения детали в соленоиде 1000 -10000 мин-1 в течение 1-5 мин;

• вращающимся магнитным полем. Применяют для повышения долговечности готовых изделий. Режимы: Н=100 -800 кА/М, время цикла 0,1- 1,0с, число циклов 2 -10;

• обработка холодом и импульсной магнитной обработкой. Применяют для упрочнения ответственных деталей, работающих при низких температурах. Режим: обработка в контейнерах при -100 -2000С, Н= 400 2000 кА/М, время цикла 0,3 с, число циклов 1 0, время между импульсами 303000с. Размагничивание.

• импульсная магнитная обработка в вакууме с применением защитных покрытий. Применяют для упрочнения деталей, работающих в вакууме: Н= 400 -2000 кА/М, время цикла 0,3- 2,0с, число циклов 1- 10, время между импульсами 30 3000 с.

• термическая обработка металлов в магнитном поле.

2.3.3. Вакуумное ионно-плазменное упрочнение

Среди методов нанесения защитных покрытий, основанных на воздействии на поверхность детали потоков частиц и квантов с высокой энергией, большое внимание уделяется вакуумным ионно-плазменным методам. Характерной их чертой является прямое преобразование электрической энергии в энергию технологического воздействия, основанное на структурно-фазовых превращениях в осажденном на поверхности конденсате или в самом поверхностном слое детали, помещенной в вакуумную камеру.

Основным достоинством данных методов является возможность создания весьма высокого уровня физико-механических свойств материалов в тонких поверхностных слоях, нанесение плотных покрытий из тугоплавких химических соединений, а также алмазоподобных, которые невозможно получить традиционными методами. Кроме того, эти методы позволяют:

- обеспечивать высокую адгезию покрытия к подложке;
- получать равномерные покрытия по толщине на большой площади;
- варьировать состав покрытия в широком диапазоне, в пределах одного технологического цикла;
- получить высокую чистоту поверхности покрытия;
- обеспечивать экологическую чистоту производственного цикла.

Методы вакуумной ионно-плазменной технологии:

1) Модифицирование поверхностных слоев:

- ионно-диффузионное насыщение; (ионное азотирование, науглероживание, борирование и др.);
- ионное (плазменное) травление (очистка);
- ионная имплантация (внедрение);
- отжиг в тлеющем разряде;

2) Нанесение покрытий:

- полимеризация в тлеющем разряде;
- ионное осаждение (в триодной распылительной системе, диодной распылительной системе, с использованием разряда в полом катоде);
- электродуговое испарение;
- ионно-кластерный метод;
- катодное распыление (на постоянном токе, высокочастотное);
- химическое осаждение в плазме тлеющего разряда.

Современные вакуумные ионно-плазменные методы упрочнения (модифицирования) поверхностей деталей машин включают следующие этапы:

- генерацию (образование) корпускулярного потока вещества;
- активизацию , ускорение и фокусировку;
- конденсацию и внедрение в поверхность деталей (подложек).

Генерация: корпускулярного потока вещества возможна его испарением (сублимацией) и распылением.

Испарение: переход конденсированной фазы в пар осуществляется в результате подводок тепловой энергии к испаряемому веществу. Твердые вещества обычно при нагревании расплавляются, а затем переходят в газообразное состояние. Некоторые вещества переходят в газообразное состояние, минуя жидкую фазу. Такой процесс называется *сублимацией.*

Нагрев испаряемого вещества может осуществляться:

• за счет выделения Джоулева тепла при прохождении электрического тока через испаряемый материал или через испаритель;

• в результате бомбардировки поверхности металла ускоренным потоком электронов (электронно-лучевой нагрев) или квантами электромагнитного излучения (лазерный нагрев);

• высокочастотным электрическим магнитным полем (индукционный нагрев);

• электрической дугой.

Выбор способа нагрева и конструкция установки зависят от природы испаряемого материала, его исходной формы (гранулы, порошок, проволока), требуемой скорости испарения, постоянства во времени и т.д.

Наибольшее распространение получил нагрев при помощи электронной бомбардировки, что позволяет достигать температуры 4000оС и плотности энергии в луче до 5×108 Вт/см^2.

Электронно-лучевой способ нагрева состоит в том, что на образец металла направляют поток электронов от катода, ускоренных электрическим полем до энергии 5-25 кэВ. Поток электронов (электронный луч) получают с помощью электронно-лучевых пушек.

Средняя энергия частиц в потоке, образованном испарением, невысока, поэтому необходимо увеличить энергию частиц, прибывающих на подложку. Простым способом ускорения заряженных частиц является электрическое поле, но так как для создания потоков в основном используются нейтральные частицы, их активацию можно осуществлять действием на атомы потоком электронов, ионов, атомов или фотонов.

В результате образования активированного корпускулярного потока в контакт с подложкой металла детали, входят нейтральные частицы (возбужденные и невозбужденные) с высокой энергией и ионы. Процесс взаимодействия такого сложного по составу потока с поверхностью металла сводится к протеканию взаимосвязанных физических явлений: конденсация, внедрение и распыление.

2.3.4.. Ионное распыление

Ионные распылители разделяют на две группы:

• плазмоионные распылители, в которых мишень находится в газоразрядной плазме, создаваемой с помощью тлеющего, дугового и высо-

кочастотного разряда. Распыление происходит в результате бомбардировки мишени ионами, извлекаемыми из плазмы;

• автономные источники без фокусировки и с фокусировкой ионных пучков, бомбардирующих мишень.

В наиболее простом случае система распыления состоит из двух электродов, помещенных в вакуумную камеру (рис. 2.19)

Распыляемую мишень из наносимого материала располагают на катоде. На другом электроде, на расстоянии в несколько сантиметров от катода, устанавливают детали (подложки).

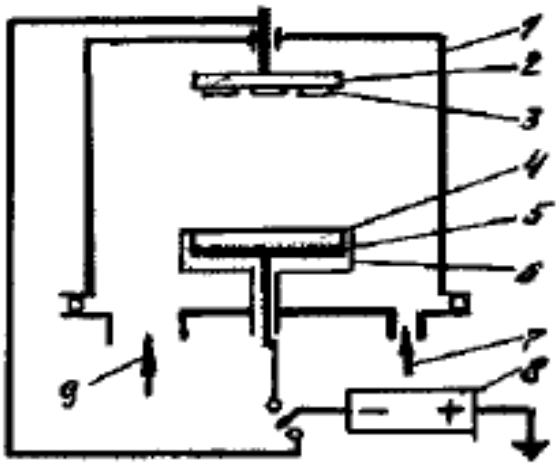


Рис. 2.19. Принципиальная система распыления: 1- камера; 2- подложкодержатель; 3- детали (подложки); 4- мишень; 5- катод; 6- экран; 7- подвод рабочего газа; 8- источник питания; 9- откачка

Камеру вакуумируют, а затем наполняют рабочим газом (чаще всего аргоном) до давления 1,33Па. На электрод с подложки подают отрицательный потенциал, зажигают газоразрядную плазму и бомбардировкой ионами производят очистку их от поверхностных загрязнений. Далее отрицательный потенциал прикладывают к мишени и распыляют ее. Распыляемые частицы движутся через плазму разряда, осаждаются на деталях и образуют покрытие. Большая часть энергии ионов, бомбардирующих мишень (до 25%), переходит в тепло, которое отводится водой, охлаждающей катод.

Достоинства: возможность получения покрытий из тугоплавких металлов, сплавов и химических соединений.

2.3.5. Магнетронное распыление

Нанесение покрытий в вакууме с помощью магнетронных систем заключается в распылении твердой мишени напыляемого материала ионами инертного газа, образующимися в плазме аномального тлеющего разряда при наложении на него магнитного поля, силовые линии которого ортогонально пересекают силовые линии магнитного поля.

Основными элементами магнетрона является катод – мишень, анод и магнитная система (рис.2.20). Силовые линии магнитного поля замыкаются между полюсами магнитной системы. Поверхность мишени, расположенная между системами входа и выхода силовых линий магнитного поля, интенсивно распыляется и имеет вид замкнутой дорожки, геометрия которой определяется формой полюсов магнитной системы. При подаче постоянного напряжения между мишенью (отрицательный потенциал) и анодом (положительный потенциал) возникает неоднородное электрическое поле и возбуждается тлеющий разряд.

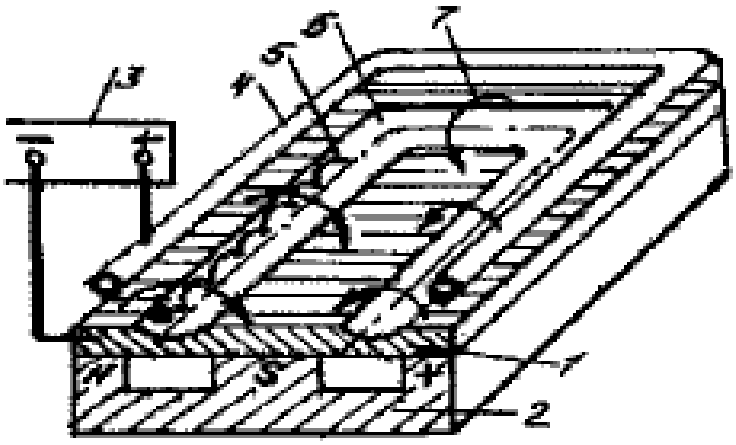


Рис.2.20. Схема магнетронной распылительной системы с плоской мишенью: 1- катод (мишень); 2- магнитная система; 3- источник питания; 4- анод; 5- траектория движения электрона; 6- зона распыления; 7- силовая линия магнитного поля

Наличие замкнутого магнитного поля на распыляемой поверхности мишени позволяет локализовать плазму разряда непосредственно у мишени. Эмитированные с катода под действием ионной бомбардировки электроны захватываются магнитным полем, и им сообщается сложное циклоидальное движение по замкнутым траекториям у поверхностей мишени.

Электроны оказываются как бы в ловушке, создаваемой с одной стороны магнитным полем, возвращающим их на катод, а с другой стороны - поверхностью мишени, их отталкивающей. Электрон циркулирует в этой ловушке до тех пор, пока не произойдет несколько ионизирующих столкновений с атомами рабочего газа, в результате которых он потеряет полученную от электрического поля энергию. Таким образом, большая часть энергии электрона, прежде чем он попадает на анод, используется на ионизацию и возбуждение, что значительно увеличивает эффективность процесса ионизации и приводит к возрастанию концентрации положительных ионов у поверхности мишени. Это, в свою очередь, приводит к увеличению интенсивности ионной бомбардировки мишени и значительному росту скорости осаждения покрытия.

2.3.6. Ионное осаждение покрытий

К покрытиям ионного осаждения относят методы, в которых осаждаемая пленка подвергается интенсивному воздействию ионного компонента корпускулярного потока, обеспечивающего изменения в структуре и свойствах как переходной зоны, так и самого покрытия. Такой результат возможен либо при высокой степени ионизации корпускулярного потока (газообразного или металлического) осаждаемого вещества, либо при высокой энергии ионного компонента корпускулярного потока.

По типу источника генерации металлического компонента потока различают ионно-термические системы распыления и холодные системы. В первых системах перевод переносимого материала из твердого в парообразное состояние осуществляется в результате термического нагрева, во-вторых – распылением с поверхности интегрально – холодной мишени (катода).

Эти методы позволяют получать покрытия с высокими служебными характеристиками кристаллизации пленок и их свойствами. В машиностроении они нашли применение для получения износостойких и коррозионно – стойких покрытий как из чистых металлов, так и из соединений.

Недостаток: низкий процент ионизированных частиц в общем потоке испаряемого материала, что влияет на адгезионные свойства характеристики покрытия и условия протекания реакции с реактивным газом.

2.3.7. Ионно-диффузионное насыщение

Система ионного насыщения представляет собой вакуумную камеру, в электрическом плане реализующую двухэлектродную схему: катод-электрод с деталями; второй электрод (анод) – заземленный корпус вакуумной камеры. Для проведения процесса ионами насыщения в вакуумную камеру подается легирующий материал (элемент или химическое соединение) в газообразном (парообразном) состоянии, а к деталям прикладывается отрицательный потенциал 300- 1000 В. Поверхность детали бомбардируется положительными ионами легирующего элемента из газоразрядной плазмы, что позволяет значительно сократить длительность процесса насыщения поверхности.

Этот метод наиболее широко применяется при азотировании сталей и металлов.

Преимущества перед печами обычного газового азотирования:

- сокращение длительности цикла в 3-5 раз;
- уменьшение деформации деталей в 3-5 раз;
- возможность проведения регулируемых процессов азотирования с получением слоев с заданным составом и структурой;

• возможность уменьшения температуры процесса азотирования до 350-400^{0}С, что позволяет избежать разупрочнения материала сердцевины изделий;

• уменьшение хрупкости слоя и повышение его служебных характеристик;

• простота защиты отдельных участков деталей от азотирования;

• устранение опасности взрыва печи;

• снижение удельных расходов электрической энергии в 1,5-2 раза и рабочего газа в 30-50 раз;

• улучшение условий труда термистов.

Недостатки:

• невозможность ускорения процесса путем увеличения плотности ионного потока, т.к. в результате перегрева деталей снижается поверхностная твердость;

• интенсификация процесса ионного азотирования;

• наложение магнитного поля с целью увеличения плотности тока и снижения давления газа;

• за счет создания поверхности детали заданной конфигурации происходит предварительное пластическое деформирование, термическая обработка.

2.3.8. Ионное легирование (имплантация)

При имплантации тонкий поверхностный слой насыщается элементом, потоком ионов которого поверхность обрабатывается (бомбардируется). Имплантированный элемент может входить в кристаллическую решетку основы в виде твердого тела или образовывать мелкокристаллические выделения химических соединений с компонентами материала основы. Кроме того, при внедрении иона в кристаллическую решетку инициируется смещение атомов, приводящих к образованию большого количества дефектов кристаллической решетки. Толщина этого слоя, насыщенного дефектами и вследствие этого упрочненного, во много раз превышает глубину проникновения ионов. Толщина модифицированного слоя несколько микрон. Имплантация существенно снижает износ и трение, увеличивает антикоррозионные свойства металла.

3. ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ

3.1. Основные процессы и явления при взаимодействии ускоренных электронов с твердым телом

3.1.1. Общая характеристика процессов при взаимодействии электронов с твердым телом

При взаимодействии ускоренных электронов с твердым телом возникает множество процессов (рис.3.1), которые определяются значениями энергии электронов. В диапазоне ускоряющих напряжений 10 – 150 кВ скорость электронов составляет 0,2 – 0,6 скорости света. Электронно-лучевую обработку проводят только в вакууме, так как на пути следования до обрабатываемой поверхности сфокусированный электронный луч (первичные электроны) соударяется с молекулами газов (атмосферных или остаточных), электроны отдают им свою энергию, и луч «рассеивается». Число рассеянных электронов пропорционально концентрации частиц на протяженности всего электронного потока. При давлении остаточных газов, равном 1 Па, на каждом метре пути электрон испытывает в среднем от 1 до 100 соударений. Чтобы не менее 99 % электронов доходили до поверхности без нежелательного взаимодействия с атомами окружающей среды, нужно поддерживать давление газов в электронно-лучевых установках на уровне 10^{-2} - 10^{-4} Па и ниже. Для воздуха (при T = 293 K) в зависимости от давления p средняя длина λ свободного пробега электронов составляет:

p, Па	10^5	133	$1{,}33\cdot10^{-2}$
λ, м	$3{,}5\cdot10^{-7}$	$2{,}66\cdot10^{-4}$	2,66

Кроме того, резкое увеличение в электронно-лучевой установке числа ионизированных электронами молекул остаточных газов может привести к пробою промежутка между анодом и катодом.

Рассмотрим процессы, происходящие непосредственно в твердом теле и на его поверхности. Давление 10^{-4} Па позволяет получить чистую на атомарном уровне поверхность, хотя при атмосферном давлении поверхности деталей покрыты слоями адсорбированных атомов, молекул и пленкой толщиной от 1 до 10 нм, которая оказывает влияние на механические и химические поверхности.

Электронная структура на поверхности отличается от структуры в толщине материала. Некоторые из электронов с внешних оболочек, образующие все связи в кристалле, на поверхности остаются несвязанными. Поэтому поверхностные, электронные составляющие отличаются от энергетических уровней в толщине материала. Эти поверхностные состояния играют важную роль в эффектах, связанных с искажением зон и изменением работы выхода. Различия в свойствах твердых тел на поверхности и в толщине важны с точки зрения их влияния на процессы, происходящие при бомбардировке поверхностей пучками электронов.

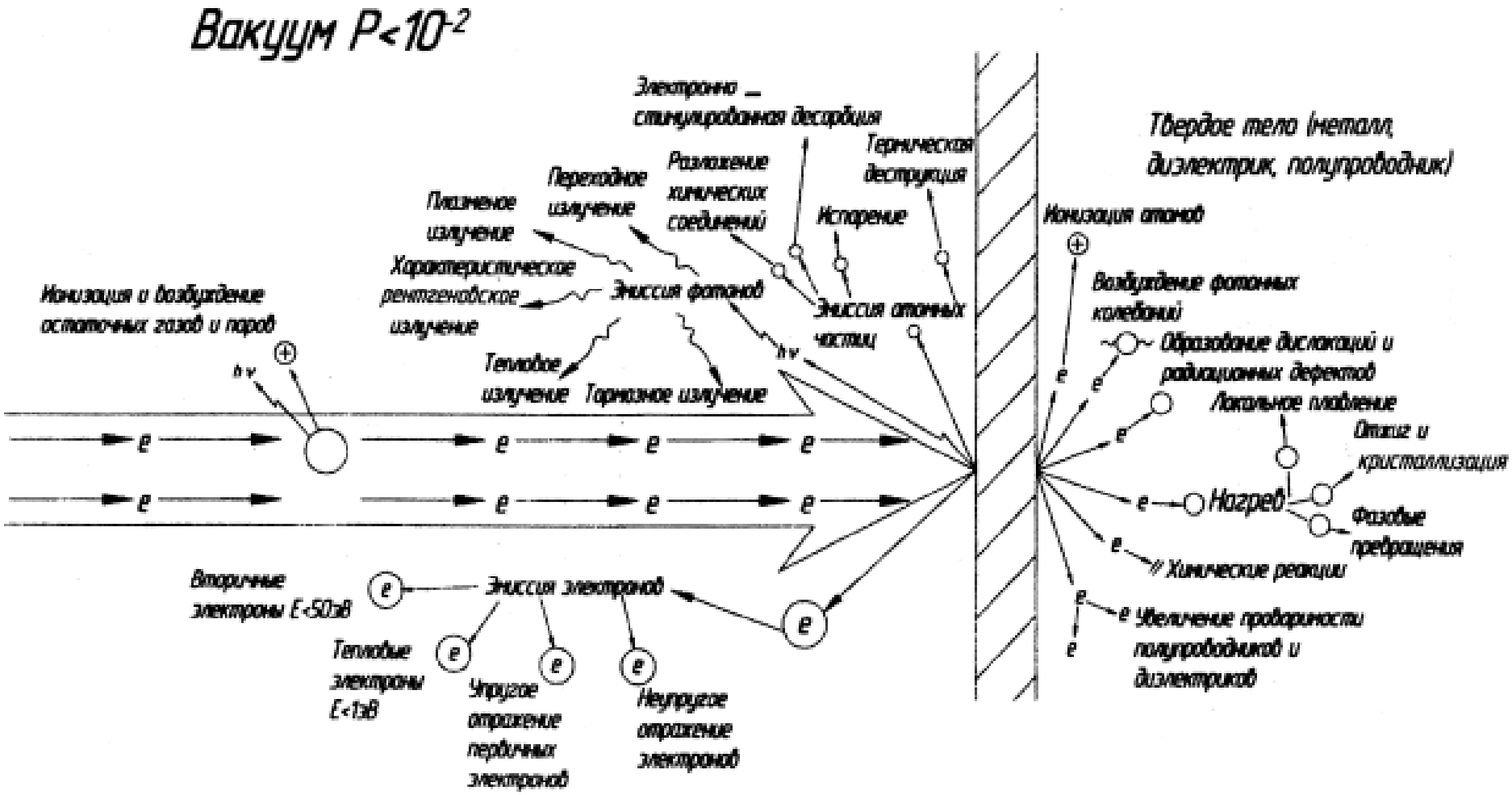


Рис.3.1. Процессы, происходящие при взаимодействии электронных пучков с веществом

При прохождении границы «вакуум – твердое тело» первичные электроны ускоряются в поле сил поверхностного потенциального барьера и продолжают движение в веществе с возросшей кинетической энергией. Для большинства материалов эта добавка к кинетической энергии (внутренний потенциал твердого тела) составляет 10 - 20 эВ и ее следует учитывать лишь для медленных электронов с энергией до 1 кэВ.

При внедрении в вещество первичные электроны испытывают многочисленные взаимодействия с атомами. Эти взаимодействия можно разделить на два основных класса – упругие и неупругие взаимодействия.

Под упругим понимают такое взаимодействие, при котором участвующие в нем частицы обмениваются кинетической энергией, а их внутренняя энергия не изменяется. По закону сохранения энергии и импульса следует, что при упругом соударении электрона с неподвижным атомом максимальное значение переданной кинетической энергии определяется соотношением масс взаимодействующих частиц и не может превышать нескольких сотых долей процента от начальной энергии электронов. Однако при очень больших значениях начальной энергии электронов (сотни килоэлектронвольт, единицы мегаэлектронвольт и более) переданной энергии становится достаточно для выбивания атомов из узлов кристаллической решетки. Это приводит к появлению дополнительных, не находящихся в тепловом равновесии с решеткой дефектов кристаллической структуры - радиационных дефектов. В электронно-лучевых технологиях энергия электронов не превышает 100 – 200 кэВ. Такая энергия электрона упруго рассеивается на атоме твердого тела и не может разорвать его связь с соседями. Наблюдается лишь смещение атома при соударении с электроном, это в свою очередь вызывает соответствующие смещения соседних атомов, и по атомной цепочке распространяется упругая волна. Такие волны в кристалле могут возникать лишь на определенных дискретных частотах, каждой из которых соответствует свой квант энергии - фонон. Поэтому в каждом акте упругого рассеяния первичный электрон теряет энергию дискретными порциями, соответствующими возбуждению одного или нескольких фононов. Так как энергия фононов значительно меньше, чем энергия первичных электронов, поэтому существуют определенные потери внутренней энергии. Такое рассеяние называют квазиупругим.

Если при упругом соударении электрон не может передать атому энергию, достаточную для возбуждения фонона, то после рассеяния изменится только направление его движения, а энергия останется неизменной.

При электронной бомбардировке твердого тела некоторая часть первичных электронов испытывает отклонения на большие углы, в результате одного или нескольких последовательных отклонений на поверхностных атомах определенная часть электронов возвращается в вакуум. Такие электроны называются упруго отраженными. В общем случае количество упруго отраженных электронов и направления их вылета в вакуум определяются их

энергией, материалом и взаимным расположением рассеивающих центров, углом падения пучка.

Роль отражения электронов с точки зрения технологических процессов отрицательна из-за обусловленных ими потерь энергии. Например, для стали она составляет 25 %, для вольфрама – 38 %. Однако это явление используется для анализа состава и структуры различных объектов (электронография, электронная микроскопия, некоторые разновидности спектроскопии).

Однако более обширным классом взаимодействий первичных электронов с твердым телом являются те, в результате которых изменяется не только направление и движение электронов, но и их энергия, т. е. происходит их торможение. Одна из причин торможения заключается в том, что взаимодействие движущейся заряженной частицы с полем атомов вещества сопровождается появлением квантов электромагнитного излучения. Так как движение первичного электрона в твердом теле не является периодическим, то энергетический спектр такого тормозного излучения имеет непрерывный характер. Тормозное излучение дает волновой спектр с максимальной энергией квантов и с максимумом интенсивности при энергии квантов, равной около 60 % энергии электронов пучка. Потери энергии пучка на тормозное излучение в зоне его действия не превышают 1 %. Они зависят от энергии электронного пучка и атомного номера бомбардируемого вещества. Тормозное излучение находит применение в различных источниках рентгеновских лучей.

Когда электрон пересекает границу раздела двух сред с различными свойствами, возможно появление переходного излучения. При очень больших значениях начальной энергии электрона наблюдается излучение Черенкова, которое возникает в том случае, когда скорость электронов превышает фазовую скорость распространения электромагнитных волн в данном веществе. Кроме того, наблюдается когерентное испускание рентгеновских квантов.

Все перечисленные виды излучения уносят определенную часть энергии первичного электрона, доля которой, однако, сравнительно невелика. Только при энергиях электронов в десятки мегаэлектронвольт потери на излучение становятся сравнимы с другими видами потерь энергии.

Основной механизм торможения первичных электронов в веществе связан с процессами неупругого рассеяния, в результате которых электронная система твердого тела возбуждается. В твердых телах в отличие от газов во взаимодействие с пролетающей частицей могут вовлекаться одновременно много атомов. В соответствии с этим различают два основных типа электрон-электронных взаимодействий в твердом теле: коллективные и одночастичные.

При коллективных возбуждениях первичный электрон взаимодействует с совокупностью валентных электронов твердого тела, которую можно в этом случае рассматривать как вырожденный газ или плазму свободных электронов в поле однородно распределенного положительного заряда. При внешнем возбуждении такой плазмы возникают колебания электронной плотности

на дискретных квантованных частотах, зависящих от концентрации электронов и свойств материала. Квант энергии (от3 до 30 эВ) плазменных колебаний - плазмон - принято рассматривать как квазичастицу твердого тела, обладающую определенными значениями энергии и импульса.

Различают два вида плазменных колебаний – объемный и поверхностный. Поверхностный вид имеет энергию, меньшую, чем энергия объемного. Время жизни плазмонов не превышает 10^{16} с. При их распаде выделяется энергия, которая либо уносится электромагнитным излучением, либо передается одному из электронов твердого тела, скорость которого близка к фазовой скорости распространения плазменных волн, либо переходит в теплоту.

Возбуждение плазменных колебаний наиболее вероятно в том случае, если длина их волны много больше среднего расстояния между свободными электронами. Это соответствует рассеянию первичного электрона с малыми изменениями импульса, то есть рассеянию на малые углы. При рассеянии на большие углы импульс, передаваемый электронам твердого тела, достаточно велик и возбужденные колебания становятся настолько коротковолновыми, что электронная плазма ведет себя по отношению к ним как система отдельных свободных частиц, то есть длина волны не больше среднего расстояния между свободными электронами. Это приводит к проявлению второго типа неупругого электрон-электронного рассеяния – одночастичных взаимодействий, при которых энергия первичных электронов тратится на ионизацию и возбуждение атомов твердого тела.

В каждом случае такого взаимодействия один из электронов твердого тела получает от первичного электрона энергию, достаточную для перехода в состояния с более высокой энергией. На энергетическом уровне, с которого произошел переход, при этом образуется вакансия.

Возбужденные электроны в момент образования обладают кинетической энергией, превышающей среднюю тепловую энергию электронов проводимости. В дальнейшем эти электроны постепенно теряют избыточную энергию при неупругом рассеянии. Некоторая часть из них может достигнуть поверхности твердого тела. Если при этом у возбужденного электрона еще сохраняется энергия, достаточная для преодоления поверхностного потенциального барьера, то он может выйти в вакуум в качестве вторичного электрона. Общее количество вторичных электронов, выбиваемых в среднем одним первичным, называется коэффициентом истинной вторичной электронной эмиссии, в отличие от полного коэффициента вторичной электронной эмиссии, который учитывает и вышедшие в вакуум обратнорассеянные первичные электроны. На энергетической зависимости коэффициента вторичной эмиссии для всех веществ имеется максимум, который наблюдается при такой энергии первичных электронов, когда средняя глубина их проникновения примерно равна глубине выхода вторичных электронов.

Вторичные электроны эмиттируют с поверхности мишени с энергией до 50 эВ. Ток вторичной эмиссии зависит от материала мишени и угла падения первичных электронов. При электронно-лучевых процессах с нагревом обра-

батываемой детали до достаточно высоких температур происходит эмиссия с ее поверхности тепловых электронов. Количество термоэмиссионных электронов определяется температурой поверхности и свойствами обрабатываемого материала. Поэтому она связана с током пучка только через температуру. Эмиссия вторичных электронов и термоэлектронная эмиссия практически не играют роли в балансе энергии электронно-лучевого процесса. Теряемая из-за них мощность не превышает 1% мощности электронного пучка.

Явление вторичной электронной эмиссии находит широкое применение в самых различных электровакуумных приборах, а также для изучения состояния поверхности твердого тела (растровая и эмиссионная электронная микроскопия).

Оже-спектроскопия позволяет судить о природе атомов в приповерхностных слоях, так как полное количество оже-электронов определенного сорта пропорционально концентрации соответствующего элемента в приповерхностной области.

В основе оже-процессов лежит анализ энергетических спектров вторичных электронов. В таких спектрах наблюдаются пики при определенных значениях энергии, характерных для данного вещества и не зависящих от начальной энергии первичных электронов. Причиной их появления является то, что при переходе электрона в каком-либо атоме на вакансию, образованную в результате ионизации одного из нижележащих энергетических уровней, выделяющаяся дискретная порция энергии может быть передана безызлучательным способом еще одному электрону твердого тела путем так называемого оже-процесса. Если такой электрон выходит в вакуум без потерь энергии, то его кинетическая энергия позволяет судить о природе атома, в котором произошел переход. Оже-процесс является безызлучательным.

Однако при заполнении вакансии на внутренней электронной оболочке возможно испускание кванта электромагнитного характеристического излучения. Оно является следствием ионизации внутренних оболочек атомов мишени, бомбардируемой пучком, и обладает дискретным спектром характеристических длин волн, соответствующих энергиям связи внутренних электронов атомов. Спектр характеристического излучения расположен, как правило, в области рентгеновских длин волн. Характеристическое и тормозное излучения – это две компоненты рентгеновского излучения, возникающего при электронно-лучевой обработке. Характеристическое излучение широко используется при рентгеноспектральном локальном анализе элементного состава твердых тел.

Таким образом, релаксация возбужденного атома может происходить либо безызлучательным, либо излучательным способом. Относительная вероятность каждого из этих процессов зависит от атомного номера элемента и от того, на каком уровне была образована вакансия.

Неупругие электрон-электронные процессы в твердом теле сопровождаются выходом в вакуум не только вторичных, но и неупруго отраженных электронов. Число таких электронов определяется коэффициентом неупруго-

го отражения, который составляет не более 10 % от начальной энергии электронов.

Кроме того, неупруго отраженные электроны образуют в приповерхностной области образца еще один поток, который, как и прямой поток первичных электронов, создает на своем пути каскады электронных возбуждений. Поэтому неупруго отраженные электроны повышают эффективность тех технологических процессов, которые основаны на электронных переходах в приповерхностных атомах.

Возрастание проводимости при электронном облучении в результате появления дополнительных неравновесных носителей заряда (электронов в зоне проводимости и «дырок» в валентной зоне) называется радиационной проводимостью (иногда наведенной или электронно-возбужденной). Это обусловлено накоплением в зоне проводимости неравновесных электронов с тепловыми скоростями. В металлах таких электронов значительно меньше, чем электронов проводимости, поэтому заметное влияние на проводимость они могут оказывать только в диэлектриках и полупроводниках. Явление радиационной проводимости находит применение в ряде специальных электровакуумных приборов и при изучении электронных характеристик твердых тел.

Однако в конечном счете эти неравновесные электроны неизбежно исчезают в результате рекомбинации с носителями противоположного знака. Такая рекомбинация может происходить как при непосредственном столкновении электрона и дырки, так и с промежуточным захватом одного из носителей на локальные ловушечные уровни примесей или дефектов, которые играют в этом случае роль центров рекомбинации. Процессом рекомбинации может быть безызлучательная передача энергии одному из электронов твердого тела в результате оже-процесса или передача энергии кристаллической решетке с возбуждением фононов, или испускание в виде кванта света. В последнем случае возвращение электронов твердого тела в равновесное состояние сопровождается рекомбинационным излучением, которое называется также люминесценцией. Это явление широко применяют при создании люминесцентных экранов электронно-лучевых приборов.

Если в результате электронных переходов резко возрастают силы отталкивания между соседними атомами и если эти атомы успевают разойтись на значительные расстояния, то происходит необратимое изменение состава облучаемого электронами вещества. К процессам такого рода относится электронно-стимулированная десорбция чужеродных атомов и молекул, а также диссоциация химических соединений, находящихся на поверхности твердого тела. В последнем случае продукты диссоциации или часть их могут удаляться с поверхности как непосредственно во время облучения (при образовании летучих фракций), так и в результате последующей специальной обработки (прогрева, травления в агрессивной среде и др.), которая по аналогии с фотографией получила название проявления.

Электронное облучение может приводить и к противоположному результату, к образованию химических соединений, если химическая активность атома

при возбуждении возрастает. Электронный поток играет в этом случае роль катализатора.

Одной из таких реакций является, например, образование диэлектрических пленок в результате полимеризации адсорбированных на поверхности органических молекул. Все перечисленные явления называются химическими реакциями, обусловленными электронным облучением. Их широко используют в электронно-лучевой технологии, например в электронной литографии, при нанесении тонких пленок и т. п.

Неупругие электрон-электронные взаимодействия могут приводить также к образованию дефектов в объеме кристалла. В ионных кристаллах это может происходить, например, в результате многократной ионизации отрицательно заряженного иона и последующего выталкивания его из узла решетки под действием сил кулоновского взаимодействия с соседними ионами.

Итак, именно процессы неупругого электрон-электронного взаимодействия являются основной причиной торможения первичных электронов в твердом теле, в результате чего электроны (за исключением упруго и неупруго отраженных) полностью теряют начальную энергию и поглощаются веществом.

Еще один эффект, который следует учитывать в электронно-лучевой технологии, состоит в том, что в результате рассеяния электронов при их проникновении в вещество диаметр электронного пучка увеличивается. Если исходный диаметр пучка меньше, чем глубина проникновения электронов, то их энергия выделяется в приповерхностном объеме образца, близком по форме к сферическому.

Еще один путь, по которому идет процесс преобразования энергии первичных электронов, играющий исключительно важную роль в технологии, - электронно-лучевой нагрев вещества. Электронный пучок при торможении в твердом теле теряет в нем всю энергию в результате различных упругих и неупругих процессов. Некоторая доля этой энергии уносится из образца эмиттированными с поверхности электронами, фотонами и атомными частицами, а оставшаяся часть поглощается веществом и в конечном счете переходит в теплоту. Как и при любом другом способе нагрева, эта теплота отводится от облучаемого участка за счет теплопроводности материала и теплового излучения поверхности.

Повышение температуры в свою очередь стимулирует протекание ряда термических процессов: структурных фазовых переходов, отжига дефектов, диффузии, рекристаллизации, плавления, десорбции и испарения с поверхности атомных частиц и др. Особенностью электронно-лучевого нагрева является то, что можно достигнуть очень высокой концентрации тепловой энергии при сравнительно малой общей мощности пучка. Это позволяет при необходимости локализовать протекание всех перечисленных процессов в достаточно узкой области образца, температура которой может быть очень высокой.

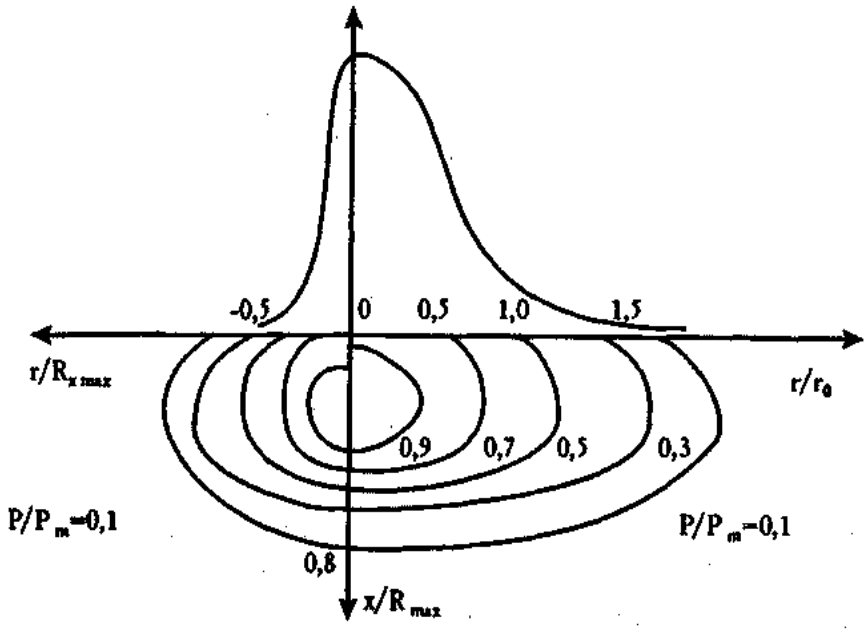
Явление выделения теплоты при электронно-лучевой обработке лежит в основе таких широко распространенных электронно-лучевых термических технологических процессов, как отжиг, очистка, испарение, плавка, литье, сварка и размерная обработка.

Таким образом, анализ различных физических явлений, сопровождающихся взаимодействием электронного пучка с твердым телом, показывает, что большинство из них может быть с успехом использовано при решении самых различных технологических задач.

3.1.2. Распределение поглощенной энергии электронов в мишени

Основным понятием в электронно-лучевой технологии является зависимость плотности поглощенной кинетической энергии электронного пучка от ее распределения по глубине и ширине обрабатываемого материала или изделия.

Максимум поглощаемой мощности находится на оси пучка, несколько ниже поверхности образца. На рис. 3.2 представлено семейство значений пространственного распределения относительной поглощенной мощности пучка P/P_0. Относительное положение максимума мало меняется при увеличении энергии от 20 до 100 кэВ.



а) *б*)

Рис. 3.2. Пространственное распределение относительной поглощаемой мощности электронного пучка: *а*) при $E_0 = 100$ кэВ; б) при $E_0 = 20$ кэВ

Распределение это неравномерно, что связано с возрастанием энергетических потерь электрона по мере его продвижения в твердом теле. Кроме того, вклад в поглощенную энергию вносят также электроны, рассеиваемые в обратном направлении. Если обрабатываемое изделие или материал пред-

ставляет собой многослойную конструкцию, то каждый из слоев вносит свой, характерный только для него, вклад (рис. 3.3).

Согласно схеме поглощенная энергия состоит из потерь энергии электронов первичного пучка E_P, двигающихся в прямом направлении, и потерь энергии электронов E_r и E_s, претерпевших обратное рассеяние, и может быть представлена таким уравнением:

$$E(r, z_0) = E_P(r, z_0) - [E_r(r, z_0) + E_s(r, z_0) + \ldots + E_n(r, z_0)], \qquad (3.1)$$

где E_r и E_s - энергетические потери электронов, испытавших обратное рассеяние, в различных по физическим свойствам слоях.

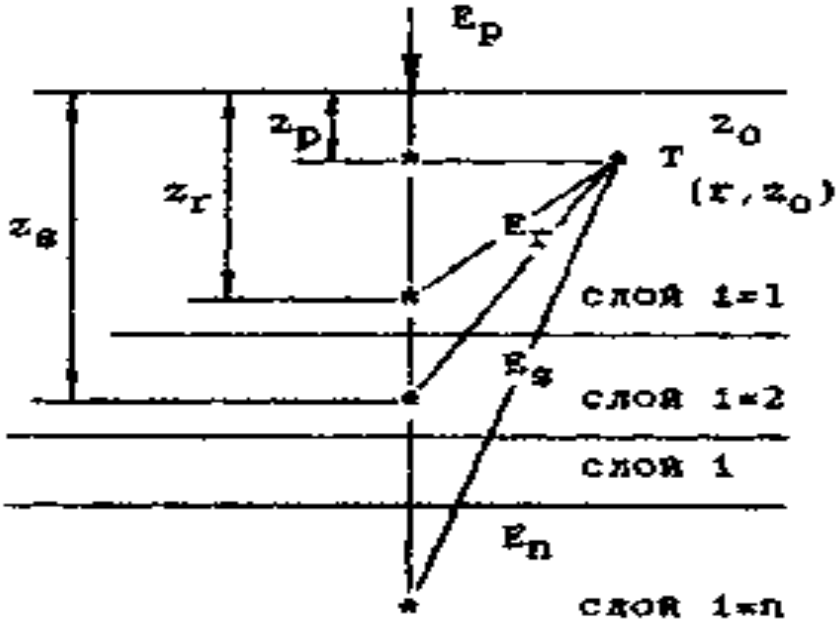


Рис. 3.3. Схема распределения поглощенной энергии в многослойной мишени

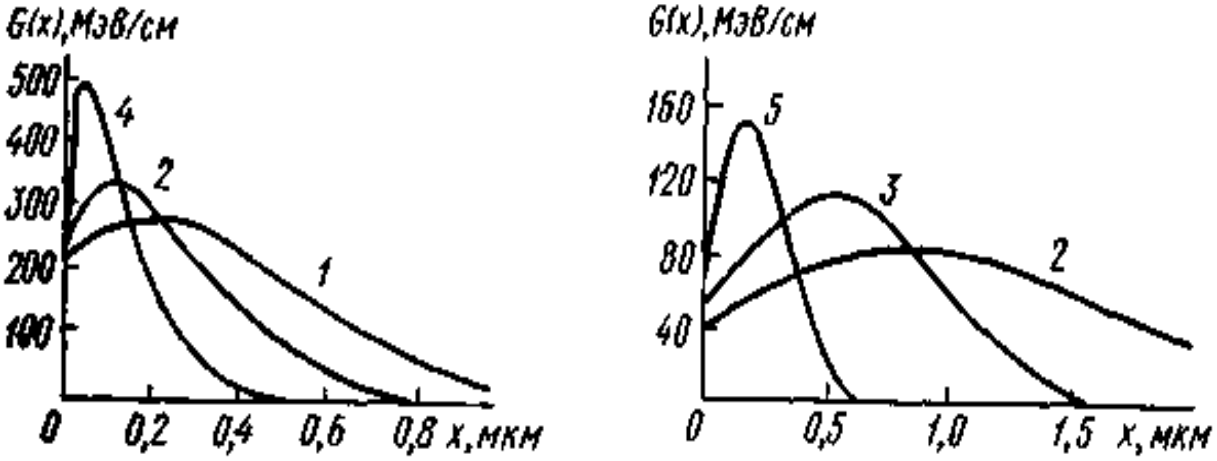
Различные слои вещества дают различные вклады в потери энергии отраженными электронами.

При облучении первичными электронами элементарного объема в точке «Т» обычным пучком с гауссовым распределением плотности тока по сечению в течение времени t этот объем получит некоторую дозу облучения.

Полная доза энергии, выделенная в результате воздействия электронного пучка в течение времени t, равна сумме энергии, выделенной электронами, претерпевшими малоугловое рассеяние при прямом прохождении верхних слоев, а также рассеяние под большими углами, и энергии, выделенной электронами, вернувшимися в верхние слои в результате обратного рассеяния для многослойных мишеней.

Однако пространственное распределение поглощенной веществом энергии пока не удается описать с помощью достаточно простых теоретических методов. Поэтому для расчета различных практических характеристик в первую очередь необходимы экспериментальные данные о функции распре-

деления удельных потерь по толщине образца G(x) = dE/dx. Ввиду большой сложности экспериментальных методов к настоящему времени получены сравнительно немногочисленные опытные данные, охватывающие узкий круг материалов и ограниченный диапазон энергий (рис. 3.4).



а) *б*)

Рис. 3.4. Экспериментальное распределение поглощенной энергии по глубине в меди (*а*) и в алюминии (*б*) при начальной энергии электронов: 1 – 20 кэВ; 2 – 15 кэВ; 3 – 12 кэВ; 4 – 10 кэВ; 5 – 6 кэВ

Одним из возможных способов получения дополнительной информации является машинный эксперимент (метод Монте-Карло), но его трудоемкость ограничивает его возможности в повседневной практике.

Один из наиболее удачных методов аналитической аппроксимации G(x) был предложен В.В. Макаровым. В нем для описания распределения удельных потерь энергии по глубине использована функция Гаусса.

Таким образом, современное состояние теории движения ускоренных электронов в веществе не позволяет пока количественно описать основные закономерности поглощения электронов с достаточной точностью, однако использование накопленного экспериментального материала и простых эмпирических соотношений в большинстве случаев дает возможность проводить расчеты необходимых характеристик и успешно разрабатывать технологические процессы с использованием электронно-лучевой обработки.

3.1.3. Тепловые процессы в зоне электронно-лучевого воздействия

При неупругом рассеянии электроны передают свою энергию веществу. Большая часть поглощенной веществом энергии первичного пучка переходит в теплоту, т.е. приводит к повышению температуры образца. Если при этом нет фазового перехода (плавления, испарения), то распределение температуры T в обучаемом веществе в любой момент времени t можно найти, решая неоднородное уравнение теплопроводности:

$$\nabla^2 T - \frac{Cg}{\lambda_T}\frac{dT}{dt} = \frac{P(x,r,t)}{\lambda_T}, \qquad (3.2)$$

где λ_T – теплопроводность материала, Вт/(м·К); С – теплоемкость материала, Дж/(кг·К); g – плотность материала, кг/м^3.

В каждом конкретном случае нужно знать распределение выделяющейся мощности P(x, r, t) и граничные условия. Обычно такие расчеты проводят на ЭВМ.

Простейшим является случай, когда имеется точечный источник, время воздействия которого очень мало и который порождает температурное поле в однородной бесконечной среде (мгновенный точечный источник):

$$P(x, r, t)=E_0\,\delta(x)\delta(r)\delta(t), \qquad (3.3)$$

где E_0 – энергия, выделяемая в точке x = 0, r = 0 в момент времени t=0.

Решение этого уравнения в таком случае имеет вид

$$T(r';t)=E_0\,[gC(4\,\pi\alpha t)^{3/2}]^{-1}\exp[(-r')^2/4\,\alpha t)], \qquad (3.4)$$

где r′ – расстояние данной точки до точечного источника, м; $\alpha=\lambda_T/gC$ – температуропроводность материала, Вт/(м·К).

Из анализа этого решения видно, что с течением времени температура, создаваемая точечным источником, как бы оседает и расплывается.

На рис. 3.5 показано распределение температуры в бесконечно протяженном однородном образце из железа после мгновенного воздействия точечного пучка с энергией $E_0 = 10^{-3}$ Дж в разные моменты времени.

Если представить выделяющуюся мощность P(x, r, t) в виде совокупности точечных источников, распределенных в пространстве и времени, то, произведя наложения температурных полей от каждого из них, можно получить полное решение уравнения теплопроводности.

Как было показано ранее, максимальное значение поглощается энергией на некоторой глубине, этой же глубине соответствует максимальная температура. При этом на поверхности наблюдается некоторое уменьшение температуры.

Ниже показана относительная (к уровню при E = 20 кэВ) температура поверхности образца при различных значениях энергии:

	T_{20} кэВ	T_{50} кэВ	T_{100} кэВ
Кремний	1	0,78	0,353
Алюминий	1	0,89	0,615
Титан	1	0,615	0,13
Нержавеющая сталь	1	0,676	0,169
Вольфрам	1	1	0,974

Для материалов с хорошей теплопроводностью (медь) температура поверхности слабо зависит от энергии электронов; для материалов примерно с той же плотностью, но со значительной теплопроводностью (нержавеющая

сталь), температура резко падает, в то время как максимальная температура на некоторой глубине может превышать температуру кипения.

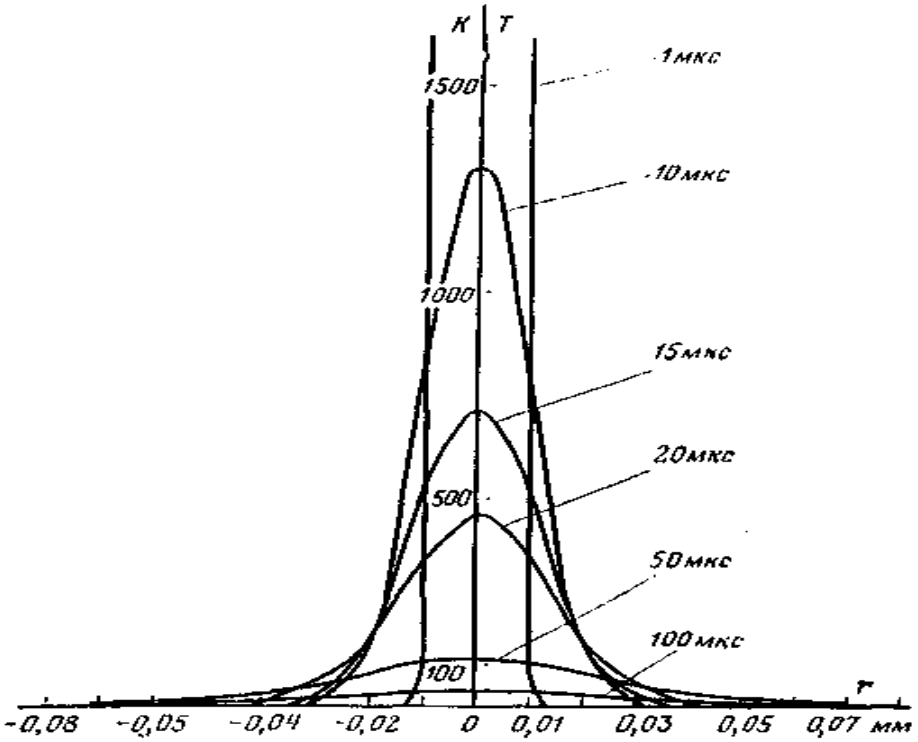


Рис. 3.5. Распределение температуры в бесконечно протяженной однородной среде при мгновенном действии в момент времени t = 0 точечного источника подводимой энергии E_0, расположенного в точке r = 0; материал - железо: g = 7,87 г/см^3; c = 0,67 Дж/(г·К); λ = 0,25 Дж/(см · с ·К); E_0 = 0,001 Дж

Вольфрам имеет значительно большую плотность, поэтому тепловой источник локализуется вблизи поверхности, а высокая относительная теплопроводность позволяет выровнять температуру по глубине.

Если теплота не успевает отводиться от места выделения и нагрев происходит почти адиабатически, то распределение температуры соответствует распределению мощности и в каждой точке линейно возрастает со временем.

$$T(x, r)=T_O+P(x, r)t/(\bar{g}\bar{C}), \qquad (3.5)$$

где T_O – начальная температура; $\bar{g}$, $\bar{C}$ - усредненные по диапазону температур значения плотности и теплоемкости соответственно.

$$\bar{g} = \frac{1}{T_1 - T_0}\int_{T_0}^{T_1}\bar{g}(T)dT, \qquad (3.6)$$

$$\overline{C} = \frac{1}{T_1 - T_0} \int_{T_0}^{T_1} \overline{C}(T)dT \,. \qquad (3.7)$$

Если при воздействии электронного пучка на материал происходят фазовые превращения, не приводящие к потере части подводимой энергии и вещества, то до окончания фазового перехода температура не меняется, а после окончания

$$T(x, r, t)=T_O+P(x, r)t / (\bar{g}\overline{C}) - \Sigma(Q_i) / \overline{C}, \qquad (3.8)$$

где ΣQ_i – сумма скрытых теплот всех фазовых переходов, происходящих в интервале температур от T_O до T_1.

С ростом продолжительности облучения температурное поле начинает изменяться за счет теплопроводности, и рост выделяемой мощности замедляется.

$$T_{max}(t)=P_O t^n / (\bar{g}\,\overline{C})+T_O\,, \qquad (3.9)$$

где $n < 1$.

Когда температура достигает конечного, установившегося значения, то ее распределение на достаточном удалении от зоны воздействия пучка следующее:

$$T \approx [r_O^2 / (2r)](P / \lambda_T). \qquad (3.10)$$

Теперь температурное поле занимает гораздо большее пространство, чем при квазиадиабатическом нагреве. В теле, имеющем конечные размеры, установившееся распределение температуры зависит от размеров образца и условий теплообмена его с окружающей средой.

Преобразование энергии электронного пучка происходит в объеме

$$V = \frac{\pi d^4}{4} h, \qquad (3.11)$$

где d – диаметр фокусного пятна или диаметр пучка в зоне его действия; h – глубина проникновения электронного пучка в вещество.

При квазиадиабатическом преобразовании энергии нагрев ограничен этим объемом. Скорость роста температуры и допустимое превышение ее над исходной можно рассчитать, исходя из характеристик материала и параметров пучка. По окончании воздействия пучка температура вследствие отдачи теплоты в окружающую среду выравнивается. Этот процесс в основном заканчивается через некоторое время. Заметно прогревается при этом лишь область, непосредственно окружающая объем рассеяния электронов. По толщине этот слой сравним с h, а по ширине – с d. Для точного определения температурного поля и изменения температуры в обрабатываемом изделии

во времени требуется решить уравнение теплопроводимости применительно к конкретным условиям.

Воздействие пучка на данный участок может быть непрерывным или импульсным. С увеличением длительности пауз возрастает разность между максимумами температуры на поверхности и на ее глубине. Отношение градиента температуры фронта тепловой волны, распространяющейся в изделии, к максимальной температуре вне области с глубиной проникновения h тем выше, чем меньше время воздействия пучка t и, следовательно, чем меньше толщина нагреваемого слоя.

Охлаждение по окончании действия пучка за счет теплопроводности у данного материала происходит тем быстрее, чем тоньше нагретый слой. Для выравнивания температуры по всему образцу по окончании действия пучка требуется время $t >> D_w^2/(4\alpha)$, где D_w – характерный размер изделия; $\alpha = \lambda / (gC)$ – температуропроводность.

Начиная с некоторого значения удельной мощности пучка ($P_{уд} \approx 10^6$ Вт/см^2), скорость превращения кинетической энергии пучка в тепловую все больше превышает скорость отвода теплоты от места облучения за счет теплопроводности, лучеиспускания и испарения частиц материала с поверхности, что приводит к возрастанию температуры материала.

В этом случае осуществляется глубокое проплавление материала в специфическом режиме «кинжального» проплавления, когда отношение глубины проплавления h к диаметру электронного луча d может достигать величины 40 - 50. Характерной особенностью такого режима является то, что глубина проплавления значительно превышает глубину проникновения электронов в твердую фазу. Максимальная глубина проникновения зависит от удельной мощности электронного луча и от времени обработки и на несколько порядков превышает траекторный пробег электронов в твердой фазе.

На поверхности растравленного металла действуют силы, которые стремятся прогнуть поверхность расплава и вытянуть расплавленный металл из зоны воздействия луча, образуя кратер. Они обусловлены давлением электронного луча и реактивным давлением испаряющихся частиц. Силы уравновешиваются гидростатическим давлением столба жидкости и силами поверхностного натяжения жидкого металла. Из условия баланса всех сил можно определить радиус канала R_k (рис. 3.6):

$$R_k = \frac{2\sigma}{v_u\sqrt{2kT/M - gh_k}}, \qquad (3.12)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения; ν_u – скорость испарения материала при температуре T; g – плотность жидкого металла; M – молекулярная масса материала расплава; h_k – глубина кратера; k – постоянная Больцмана.

При увеличении мощности луча увеличивается скорость ν_u, следовательно, радиус кривизны R_k будет уменьшаться, но для сохранения баланса сил глубина кратера h_k должна увеличиваться.

Параллельно развивается процесс взрывного вскипания вещества, в образовавшемся канале возникает ударная волна, которая выносит жидкую фазу из полости канала наружу. При наличии парообразного состояния в канале происходит увеличение длины пробега электронов и, следовательно, дополнительный разогрев дна канала от электронной бомбардировки. Возможно также усилие нагрева из-за дополнительной фокусировки электронного пучка положительными ионами паров металла в канале. Процесс образования канала при действии столь большого числа сил неустойчив. Экспериментально установлено, что паровой канал в зоне воздействия пучка периодически открывается за время 1 мс. Весь процесс образования глубокого канала носит пульсирующий характер. Действие столь большого числа факторов не позволяет построить модель формирования «кинжального» канала, поэтому пользуются в основном эмпирическими соотношениями.

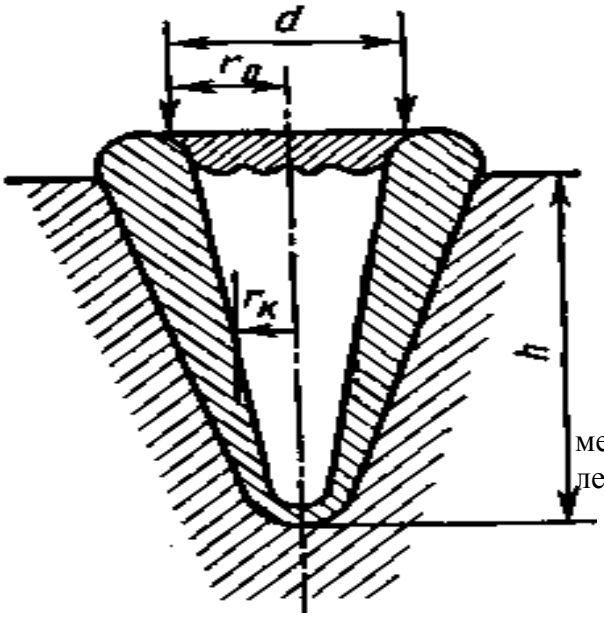


Рис. 3.6. Образование пароплазменного канала при глубоком проплавлении

Переход от условий нагрева, в которых конфигурация зоны плавления материала описывается процессами теплопроводности, к условиям, когда возникает взрывное вскипание вещества и зона проплавления становится «кинжальной», зависит в основном только от скорости нагрева (концентрации энергии в источнике).

При обработке веществ с большой энергией электронного луча, когда зона максимального выделения тепловой энергии расположена достаточно глубоко над поверхностью образца, интенсивное парообразование может привести к вспучиванию вышележащих слоев и образованию пузырей. В результате последовательно плавятся все более глубокие слои материала, и он вытесняется вверх (рис. 3.7).

В хрупких материалах ударные волны, возникающие при взрывообразном вскипании вещества, могут вызывать значительные механические напряжения вокруг обрабатываемой зоны, что часто приводит к появлению трещин.

Наконец, если еще больше увеличить мощность пучка, скорость нагрева становится настолько большой, что расплавившийся материал полностью испаряется еще до того, как он сможет быть выброшен взрывом из зоны обработки. Такая форма удаления материала называется сублимацией, при которой вещество полностью переходит в пар, минуя жидкую фазу.

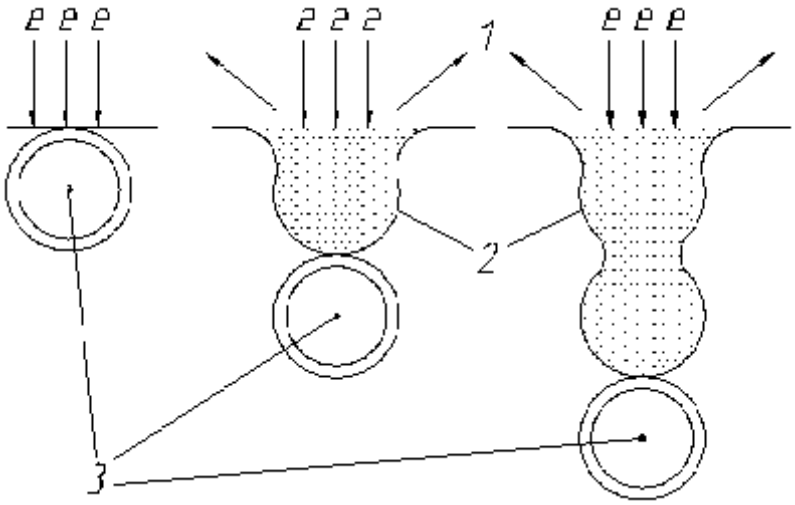


Рис. 3.7. Механизм образования парового капилляра для веществ с малой плотностью при большой энергии электронов: е – поток электронов; 1 – поток пара; 2 – расплав; 3 – максимум поглощения энергии

В табл. 3.1 приведены наиболее существенные тепловые эффекты и вытекающие из них технологические способы обработки материалов. Кроме того, возможные эффекты зависят от поведения конкретного материала при повышении его температуры.

Таблица 3.1

Тепловой эффект	Технологический эффект	Материалы
Фазовые превращения в твердом состоянии	Закалка	Стали, поддающиеся закалке
Сублимация	Унос материала (выполнение отверстий, пазов; гравирование; резка)	Алмаз; графит; кварцевое стекло
Разложение твердого материала на летучие компоненты	То же	Целлюлоза (бумага); различные синтетические материалы; керамика
Разложение с образованием, по крайней мере, одной твердой компоненты	То же	Арсенид галлия; фосфид галлия
Плавление	Микросварка	Металлы
	Полирование; легирование	Кремний; германий
	Нанесение рисок оплавлением	Кремний; германий; керамика; ферриты

Испарение; квазисублимация	Унос материала (выполнение отверстий, пазов; гравирование; резка)	Металлы; синтетические материалы; диэлектрические материалы
Ударные волны	Дробление материалов	Камень

Если при фазовых превращениях вещество остается твердым, то область превращений ограничивается поверхностными слоями. Обработанные участки отличаются структурой и свойствами (например, твердостью).

Сублимирующие материалы или материалы, разлагающиеся из твердого состояния на летучие компоненты, можно целенаправленно удалять, прямо переводя их из твердого состояния в газообразное. Геометрия рельефа и структура, получаемые в результате обработки, определяются величиной энергии, которая достаточна для достижения температуры сублимации или разложения. Аналогично обстоит дело и тогда, когда материал разлагается на твердые продукты, с той лишь разницей, что продукты остаются в зоне обработки и их необходимо оттуда удалить.

Эффект плавления используется для сварки и для получения сплавов. При этом можно добиться того, чтобы расплавленные участки монокристаллического материала, застывая, образовали снова монокристаллические структуры с той же ориентацией, что и первоначальные. Это позволяет существенно повысить механические характеристики.

Если плавящийся материал удается нагреть электронной бомбардировкой достаточно быстро и с достаточно большим перегревом над температурой плавления, то испарение материала начинается раньше всего в области максимального поглощения энергии, расположенной под поверхностью заготовки. Очертания получающегося при этом геометрического рельефа определяются границей расплавившегося объема. Такая технология используется при гравировании, резке и т.д.

Образующая ударная волна при практически мгновенном локальном нагреве хрупких материалов используется для дробления материалов.

3.1.4 Мощность и ее распределение

Параметрами, характеризующими тот или иной процесс электронно-лучевой технологии, в первую очередь являются: мощность электронного пучка P_O; удельная поверхностная мощность в месте встречи пучка с объектом p_O; ускоряющее напряжение U_B; диаметр пучка в месте его встречи с объектом d_O, связывающий значения P_O и p_O.

Мощность пучка определяется как произведение ускоряющего напряжения на ток пучка:

$$P_O = U_B I_B. \qquad (3.13)$$

Удельная поверхностная мощность пучка в месте его встречи с поверхностью объекта

$$p_O = \frac{U_B I_B}{F_B} = \frac{4U_B I_B}{\pi d^2} = U_B j, \qquad (3.14)$$

где F_B – площадь, м^2; j – плотность тока в луче, А/м^2.

Другим важным параметром является объемная удельная мощность, поглощаемая веществом объекта, усредненная по глубине проникновения электронов:

$$p_A = \frac{P_O}{V} = \frac{\eta_A U_B j}{S}. \qquad (3.15)$$

Отсюда получим

$$p_A \approx j/U_B. \qquad (3.16)$$

Объемная плотность поглощаемой мощности p_A играет роль прежде всего в нетермических процессах электронно-лучевой обработки и в таких термических ее процессах, когда нагрев вещества в зоне действия пучка происходит почти адиабатически, т.е. без заметного отвода тепла в течение времени действия пучка.

Пространственное распределение удельных поглощенных мощностей представляет семейство кривых (рис. 3.2). Из графика можно сделать следующие выводы.

1. Максимум удельной поглощаемой мощности находится на оси пучка под поверхностью детали на глубине, равной 1/3 глубины проникновения, и приблизительно вдвое превышает удельную поглощаемую мощность на поверхности заготовки.

2. С удалением от точки, в которой имеет место максимум, удельная поглощенная мощность монотонно уменьшается, стремясь к нулю.

Повысить мощность, поглощаемую в единице объема вещества объекта, можно путем увеличения плотности тока пучка в пятне, но не путем повышения ускоряющего напряжения.

На рис. 3.8 представлено распределение наиболее важных из технологических процессов по диапазонам потребных мощностей и удельной поверхностной мощности пучка.

3.1.5. Нетермические воздействия электронного луча

По используемым воздействиям электронного пучка на вещество нетермические эффекты обработки можно разделить на следующие три группы:

1) перенос энергии (химические электронно-лучевые эффекта);

2) перенос импульса (эффекты столкновений);

3) перенос заряда (эффекты, порожденные электростатическими полями или силами).

Для нетермической обработки типично то, что целевой технологический эффект зачастую достигается только в сочетании электронно-лучевых процессов с процессами последующей обработки.

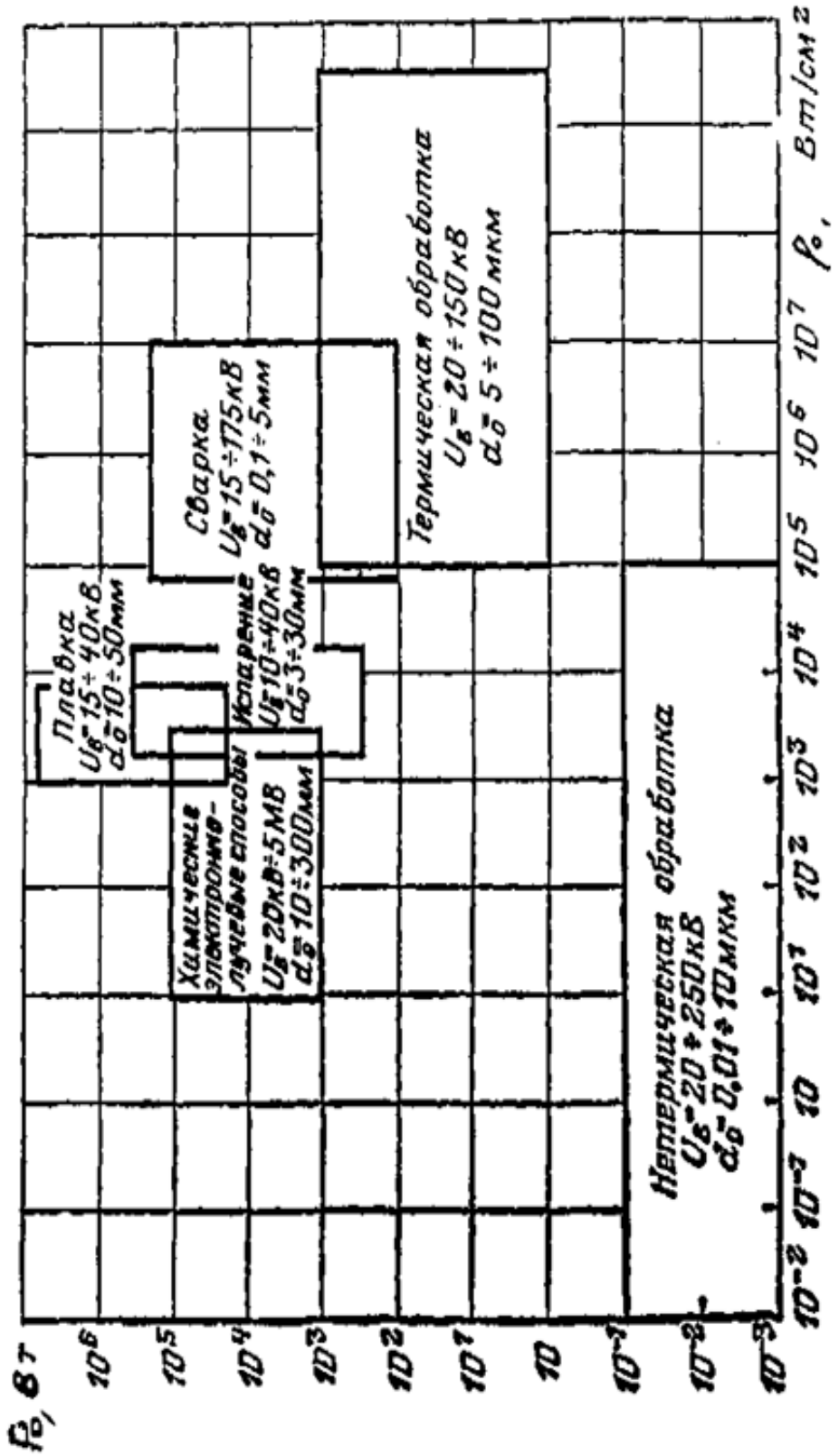


Рис. 3.8. Диапазоны удельных поверхностных мощностей p_O и мощностей P_O, используемые для наиболее важных процессов электронно-лучевой технологии: U_B – ускоряющие напряжения; d_O – диаметры пучка в зоне рабочего процесса

3.2. Технологические процессы электронно-лучевой обработки

3.2.1. Электронно-лучевая плавка

Плавка электронным лучом в вакууме применяется в тех случаях, когда необходимо выплавить особо чистые металлы, в том числе активные. При этом можно получать более высокий нагрев жидкого металла в ванне и наиболее полно производить дегазацию металла, отгонку летучих примесей, а также осуществлять те физико-химические процессы, которые при других методах плавки не успевают протекать полностью. Переплавляемый материал может быть использован в любом виде (шихта, пруток, лом, губка).

На рис. 3.9 показаны результаты очистки ниобия от примесей при электронно-лучевой плавке.

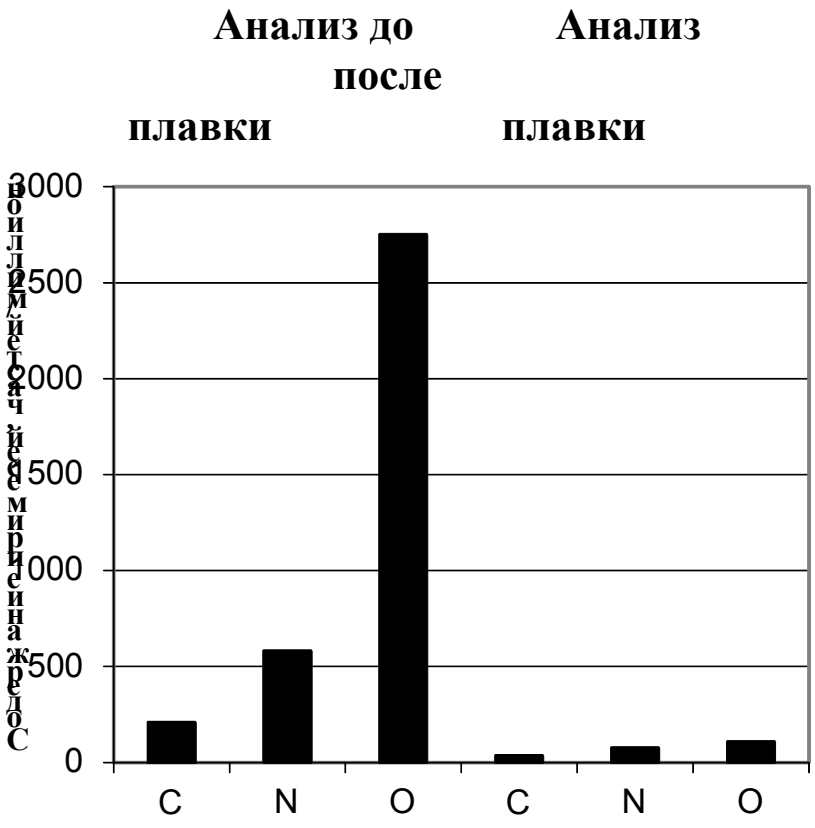


Рис. 3.9. Уменьшение содержания примесей в ниобии после электронно-лучевой плавки

При обработке многокомпонентных сплавов на основе железа наблюдается относительное увеличение в них содержания W; Mo; V; Si вследствие их меньших скоростей испарения по сравнению с железом, тогда как концентрация Cu и Mn в переплавном материале уменьшается.

Электронная плавка используется также для выращивания монокристаллов.

Особую роль при электронно-лучевой плавке играет наличие вакуума как защитной среды. При этом происходят следующие процессы.

1. В вакууме происходит интенсивное удаление растворенных в металле газов, что значительно улучшает их механические свойства, особенно пластичность. Многие сплавы на основе титана, молибдена, ниобия и других активных химических металлов получили промышленное применение только благодаря выплавлению в вакууме.

2. Некоторые из примесей (нитриды, карбиды, оксиды) при нагревании в вакууме разлагаются; при этом происходит вакуумное рафинирование переплавного металла. Переплавной металл содержит меньше включений, и это повышает эксплуатационные характеристики изготовленных из него изделий.

3. При плавке металла в вакууме все время происходит удаление газообразных продуктов из зоны реакции, вследствие чего равновесие химических реакций вида

$$MeO+C \leftrightarrow Me+Co \qquad (3.17)$$

по принципу Ле-Шателье сдвигается вправо, то есть резко интенсифицируются раскислительные реакции. Это также дает возможность повысить качество выплавляемого в вакууме металла, значительно снизить в нем содержание газов, прежде всего кислорода.

Начиная с 60-х годов практически все тугоплавкие и химические металлы выплавляются в электронно-лучевых печах.

В промышленности применяют электронно-лучевую плавку с последующей заливкой в вакууме литейных форм. На различных электронно-лучевых установках для плавки в вакууме при давлении P, равном 10^{-1}... 10^{-4} Па, получают слитки массой до 20 т.

Для улучшения качества сталей применяются установки для электронно-лучевого переплава мощностью до 1200 кВт, что позволяет выплавлять слитки массой до 12 т при годовом объеме выпуска до 3000 т, например, для производства валов и лопаток турбин, камер сгорания, высокоскоростных подшипников.

Процесс плавки

Типичная схема электронно-лучевой плавки представлена на рис. 3.10.

Такой способ плавки называют капельным переплавом (когда капли жидкого материала в виде капель стекают прямо в кристаллизатор).

Однако из-за потока паров и брызг с оплавляемой поверхности, которые непосредственно влияют на работу генератора пучка, возникает некоторая нестабильность в его работе. При чрезмерном накоплении паров происходят высоковольтные пробои. Давление в плавильной камере вследствие выделения газов и паров из расплава лежит в пределах 10^{-1} - 1 Па.

Переплавляемый материал обычно имеет вид штабиков или прутков. При замене кристаллизатора на охлажденные прокатные валки такой способ позволяет получать тонкую фольгу. Возможна и периодическая разливка

расплава из литейного тигля в специальные формы для изготовления литых изделий.

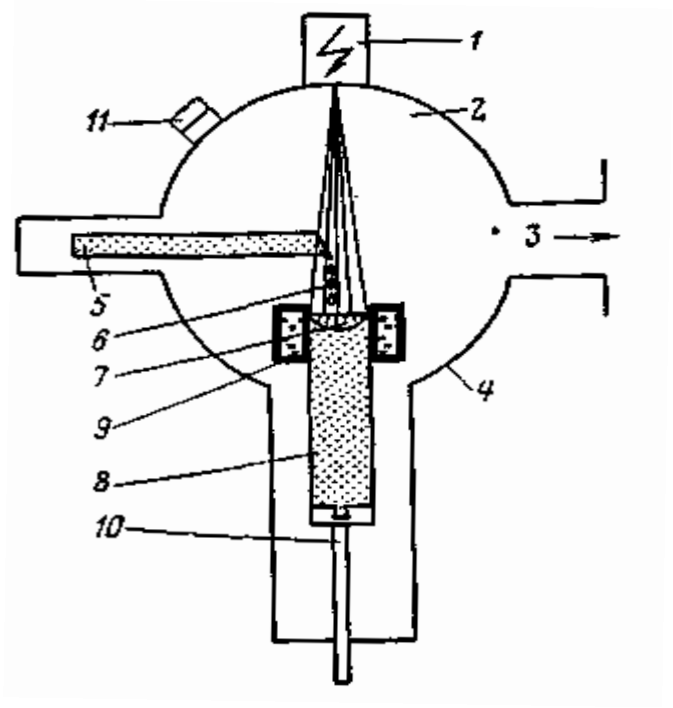


Рис. 3.10. Принцип электронно-лу-чевого переплава: 1 - электронная пушка; 2 - электронный пучок, направленный на сплавляемый штабик 5 и ванну расплавленного металла 7; 3 - к вакуумной системе; 4 - плавильная камера; 6 - капли переплавляемого металла; 8 - выплавляемый слиток; 9 - водоохлаждаемый кристаллизатор; 10 - устройство вытяжки слитка; 11 - смотровые окна

Другая разновидность электронно-лучевой плавки представлена на рис. 3.11.

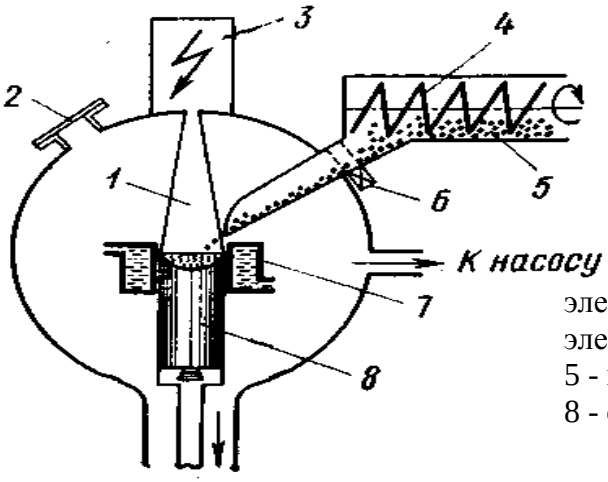


Рис. 3.11. Схема осуществления электронно-лучевой плавки: 1 - пучок электронов; 2 - окно; 3 - пушка; 4 - шнек; 5 - шихта; 6 - затвор; 7 - кристаллизатор; 8 - слиток

Здесь сыпучий материал непрерывно подается в кристаллизатор и плавится там под действием электронной бомбардировки. Такой способ плавки называют плавкой в жидкой ванне.

Данный способ уступает капельному переплаву, так как в расплав поступает неочищенный и холодный материал, в результате чего процесс рафинирования затягивается.

Варианты процесса плавки

Существует несколько вариантов электронно-лучевой плавки. Типичные варианты представлены на рис. 3.12.

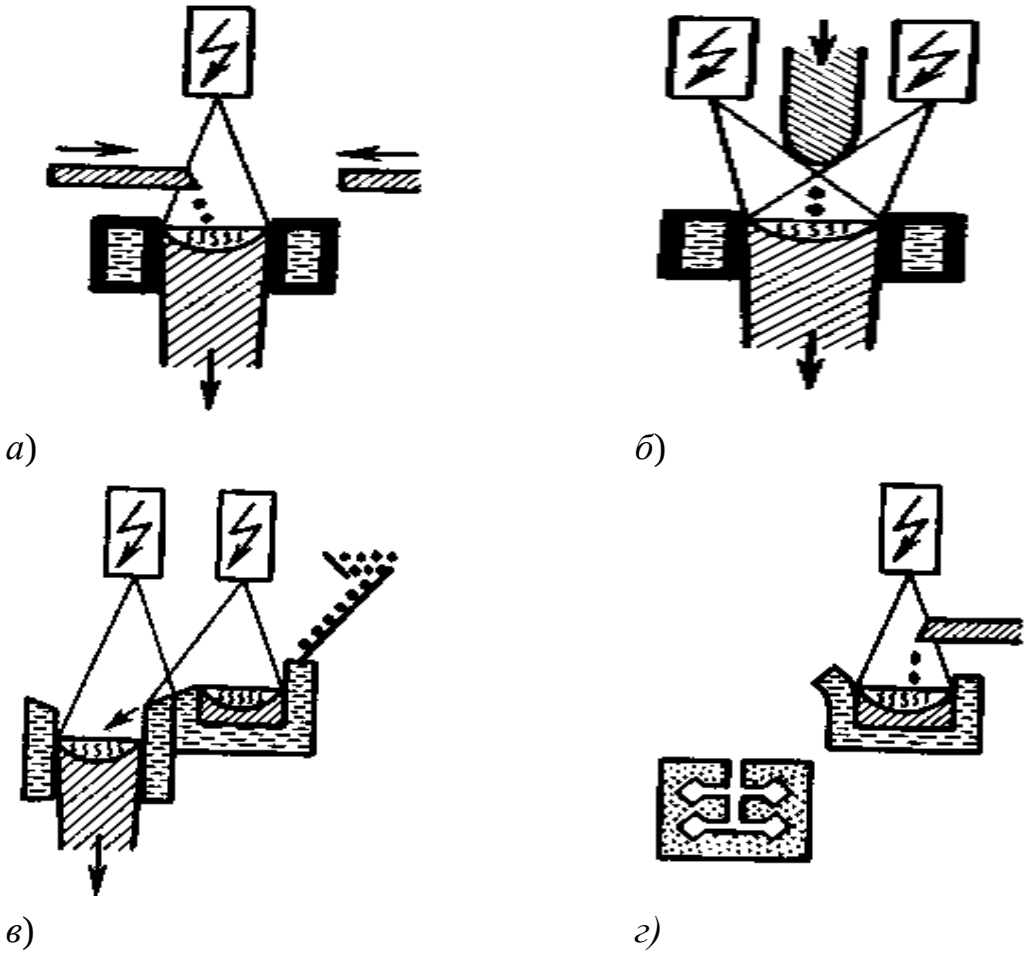


Рис. 3.12. Схемы осуществления электронно-лучевой плавки и литья:
а) - капельный переплав с горизонтально подаваемым штабиком; *б*) - капельный переплав с вертикально подаваемым штабиком с применением аксиальных пушек; *в*) - получение слитков путем переплава кускового или гранулированного материала в плавильном типе; *г*) - точное литье

Специальные виды переплава представлены на рис. 3.13.

Гранулирование (рис. 3.13б) – получение металлов в виде комков или окатышей малых размеров. Материал, расплавленный в литейном тигле, в виде капель попадает на вращающийся охлажденный барабан и там застывает. Образованные таким путем комочки отделяются и передаются в накопитель. Если при попадании на барабан капли разбрызгиваются, то окатыши получаются очень мелкими, вплоть до порошкообразных (рис. 3.13в).

Для проведения металловедческих исследований требуются образцы в виде таблеток. Для их получения углубления в медной водоохлаждаемой плите заполняют исследуемым материалом, который затем расплавляют (рис. 3.13г) с помощью электронного луча.

Электронно-лучевую плавку можно использовать для зонной очистки при применении кольцевого генератора пучка (рис. 3.13д).

Монокристаллы получают, выращивая их с использованием электронных пучков (рис. 3.13ж).

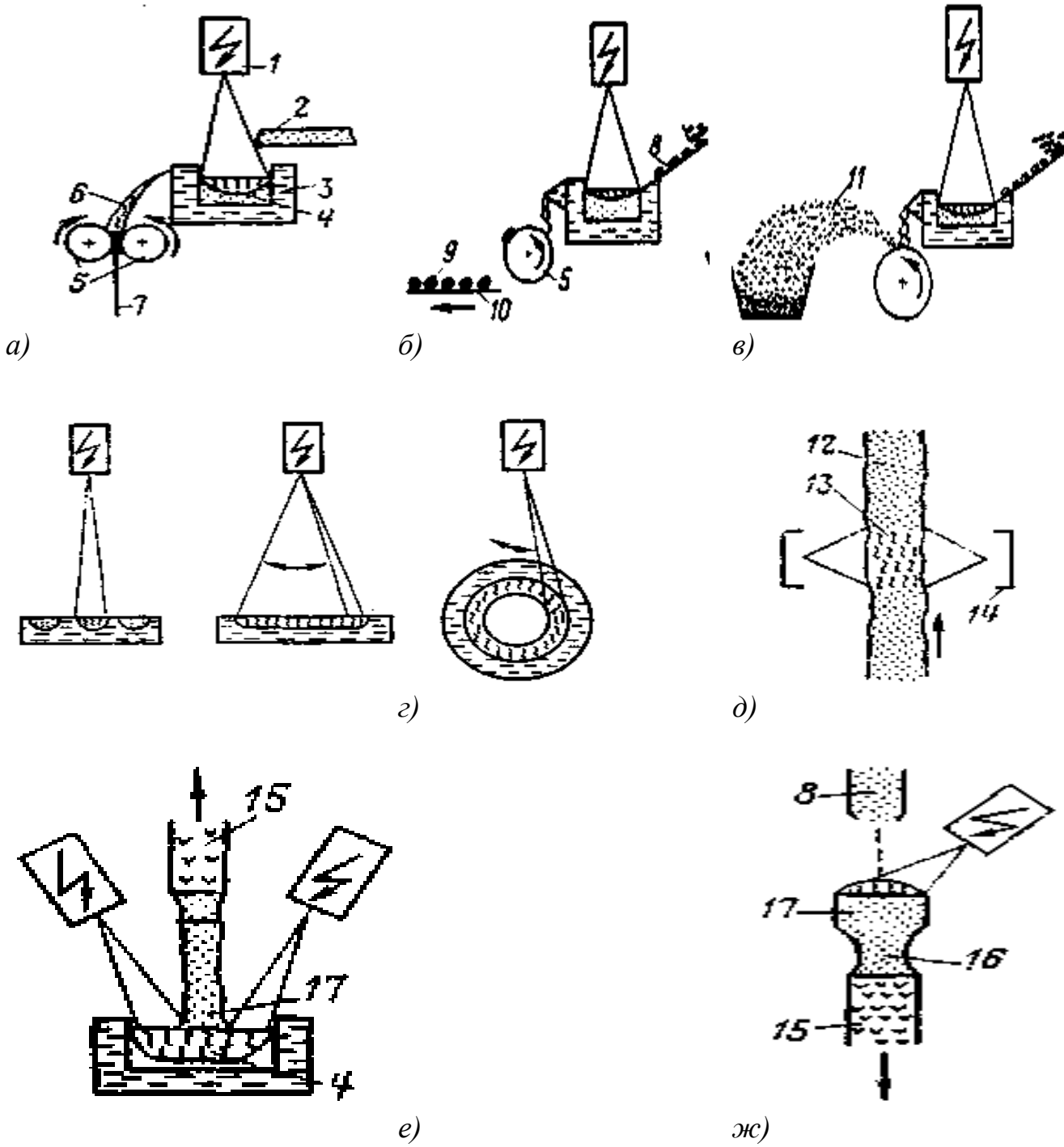


Рис. 3.13. Специальные виды электронно-лучевой плавки: *а* - получение фольги литьем в валковые пары; *б* - гранулирование; *в* - получение порошков; *г* - выплавка таблеток, плоских штабиков и кольцеобразных изделий (например, из тантала); *д* - зонная плавка; *е* - выращивание монокристаллов; *ж* - выращивание монокристаллов; 1 - пушки; 2 - сплавляемый штабик; 3 - тигель; 4 - расплав; 5 - охлаждаемый валик; 6 - струя расплава; 7 - фольга; 8 - подача материала; 9 - гранулы; 10 - транспортер; 11 - порошок; 12 - очищаемый штабик; 13 - зона плавления материала; 14 - кольцевой генератор пучка; 15 - устройство вытяжки; 16 - ядро кристалла

3.2.2. Электронно-лучевая сварка

Электронно-лучевая сварка является одной из самых распространенных видов сварки. При электронно-лучевой сварке кинетическая энергия электронов пучка используется для того, чтобы расплавить жестко ограниченные участки примыкающих друг к другу деталей с тем, чтобы расплав, застывая, соединил детали. Положительной стороной электронно-лучевой сварки является возможность создания относительно высокой удельной поверхностной мощности в пятне пучка при достаточно высоких мощностях всего пучка.

Свойства электронного пучка открывают возможности сварки тугоплавких материалов, а подчас и таких комбинаций материалов и деталей, которые не поддаются сварке иными способами.

Электронно-лучевая сварка позволяет получать сварные соединения с отношением глубины шва к его ширине, намного большим единицы, чего невозможно добиться другими способами сварки с оплавлением.

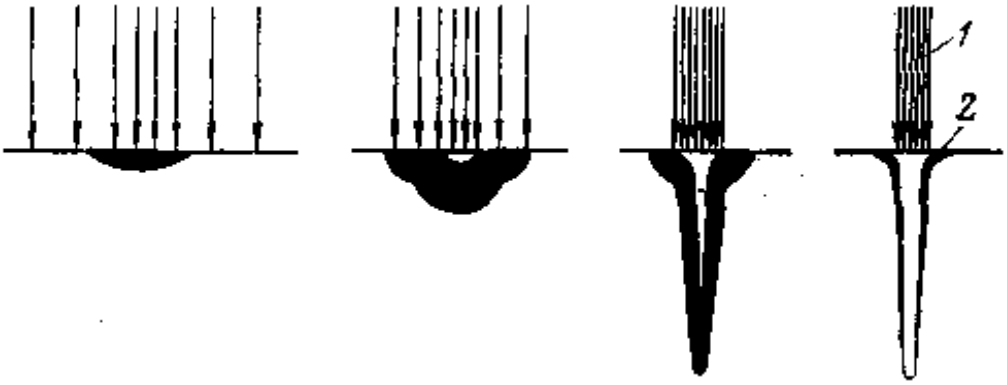
Процессы сварки

При достаточных мощности и удельной поверхностной мощности электронного пучка в месте его встречи с поверхностью детали, изготовленной из плавящегося материала, появляется небольшая ванночка с расплавом. Если увеличить удельную поверхностную мощность, например, сфокусировав пучок более остро, то над местом непосредственной бомбардировки материала и в особенности над центром этого места возникает локальная область повышенного давления пара.

В состоянии равновесия между этим давлением пара и гидростатическим давлением расплава на поверхности расплава появляется лунка глубиной около 3 мм. Рабочее пятно пучка смещается вниз на то же расстояние. Соответствующую деформацию претерпевает и дно ванночки расплава (рис. 3.14).

При дальнейшем увеличении удельной поверхностной мощности, а значит, и температуры бомбардируемой поверхности продолжает расти и давление пара. Это в конце концов приводит к образованию капилляра со стенкой, представляющей собой жидкий металл, заполненный металлическим паром. Если довести удельную поверхностную мощность до некоторого экстремального значения, то давление пара и скорость испарения возрастают настолько, что весь расплав с потоком пара выбрасывается из капилляра. Если отвод тепла от зоны действия пучка происходит только теплопроводностью, то соотношение глубины и ширины ванночки расплава оказывается подобным такому, которое получается при непрерывной сварке с оплавлением, т. е. около единицы. Однако, используя описанное выше образование капилляра, можно довести в нем отношение «глубина - ширина», а значит, и

шва до значений, гораздо больше единицы. Этот эффект называют эффектом глубокого проплавления шва («кинжальный шов»).



Т = 1900 К Т = 2200 К Т = 2900 К Т = 3800 К

а) *б*) *в*) *г*)

Рис. 3.14. Образование парового капилляра и слоя расплава при повышении удельной поверхностной мощности электронного пучка, бомбардирующего поверхность стального изделия посредством фокусировки: *а*) – ванночка расплава; *б*) - начало деформации ванночки под действием давления пара; *в*) - образование парового капилляра с жидкометаллическим слоем (эффект глубокой сварки); *г*) - канал после выброса расплава; 1 - пучок; 2 - поверхность детали

Причиной того, что паровой капилляр вообще может образовываться, является давление пара на внутреннюю поверхность элементарного объема (рис. 3.15).

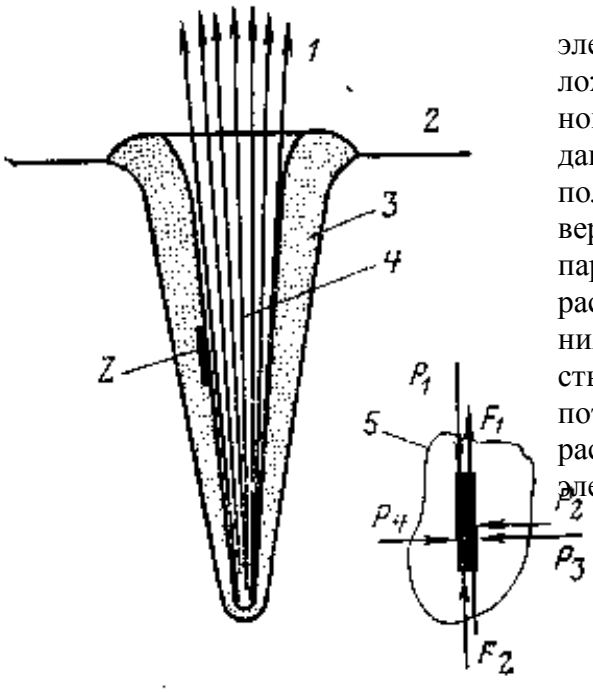


Рис. 3.15. Силы, действующие на элемент объема слоя расплава Z, расположенный у его поверхности, обращенной к капилляру: P_1 - гидростатическое давление столба жидкого металла, расположенного над элементом; P_2 - поверхностное натяжение; P_3 - давление пара в капилляре; P_4 - давление пара в расплавленном материале; F_1 - сила трения между потоком пара и поверхностью капилляра; F_2 - подъемная сила; 1 - поток пара; 2 - поверхность детали; 3 - расплав; 4 - паровой капилляр; 5 - элемент Z

Когда деталь имеет ограниченную толщину, а параметры пучка достаточно высоки, может оказаться, что паровой капилляр пронизывает деталь на всю ее толщину. В этом случае возникает так называемый сквозной ток. Он является частью тока пучка, поступающего на деталь, которая, пройдя весь капилляр, покидает деталь. Анализ сквозного тока позволяет в определенной степени судить о геометрии капилляра и изменениях ее во времени.

Во всех изложенных рассуждениях не принималось во внимание относительное перемещение детали и электронного пучка, которое служит необходимым условием для получения сварного шва. Между тем с увеличением скорости сварки это перемещение все сильнее влияет на геометрию парового капилляра и особенно на механизм образования слоя расплава. На рис. 3.16 показано, каким образом паровой капилляр и слой расплава деформируются при перемещении электронного пучка относительно детали. Если при $v = 0$ они обладают осевой симметрией, то при $v > 0$ можно говорить лишь о наличии плоскости симметрии, проходящей через ось пучка и вектор скорости сварки.

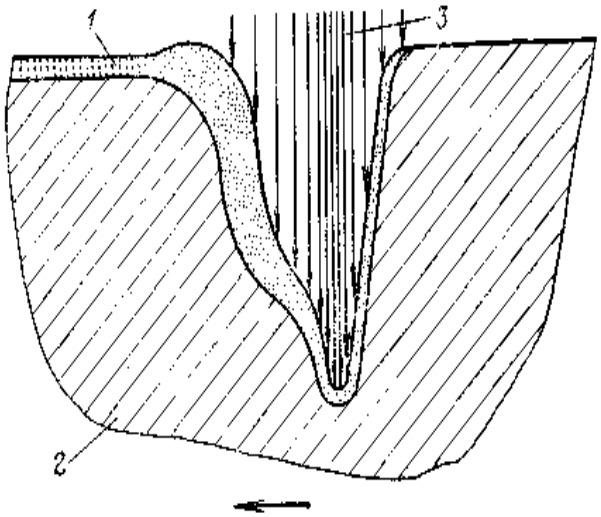


Рис. 3.16. Паровой капилляр и жидкометаллический слой при относительном перемещении детали и пучка (стрелкой показано направление перемещения детали): 1 - застывший металл шва; 2 - деталь; 3 – пучок

В изложенных рассуждениях не принималась во внимание конечность глубины проникновения электронов в твердое или жидкое вещество. Так, при U_B =30 и 150 кВ глубина проникновения электронов в алюминий плотностью $\rho = 2{,}7$ г/см^3 составляет соответственно 7 и 175 мкм. Следует учесть, что зона максимального поглощения энергии располагается под поверхностью объекта. Вследствие этого при достаточно высоких ускоряющем напряжении и удельной поверхностной мощности может наступить перегрев области, лежащей под поверхностью, причем этот перегрев не компенсируется отводом тепла теплопроводностью. В области перегрева возникает еще более высокое давление пара, которое может привести к вспучиванию вышележащего слоя и образованию пузырей. В экстремальном случае перегретый материал выбрасывается наружу. На рис. 3.17 схематически изображено образование парового капилляра в результате последовательного расплавления нижележа-

щих слоев материала и вытеснения его наверх при высоких ускоряющем напряжении и удельной поверхностной мощности пучка, а также при малой плотности материала.

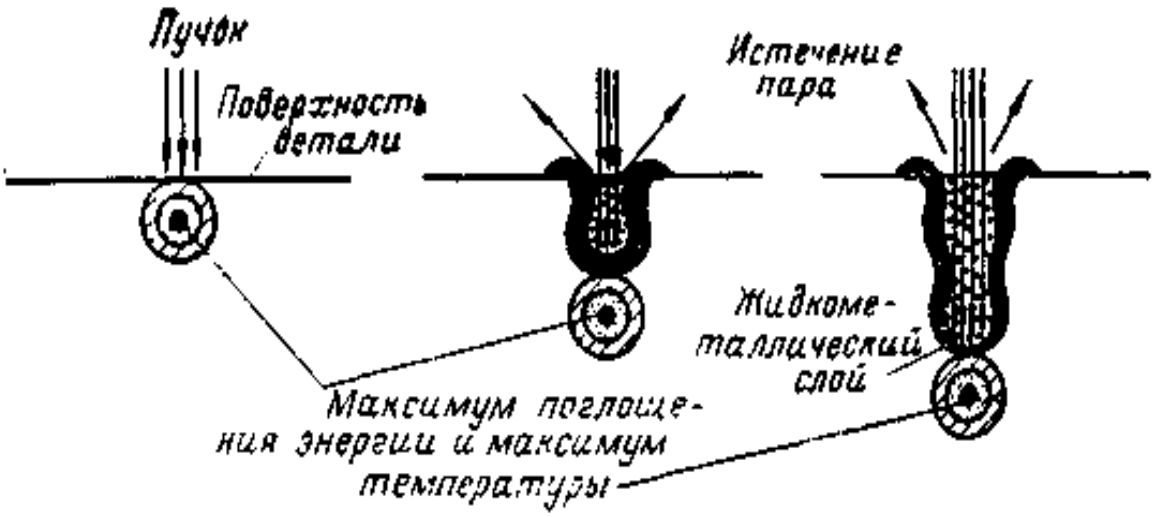


Рис. 3.17. Образование парового капилляра

Описанная модель процесса представляет собой лишь весьма грубое приближение к истинной картине процессов, происходящих при электронно-лучевой сварке.

Режимы процесса электронно-лучевой сварки

Процесс можно вести при низком (до 30 кВ), среднем (до 60 - 80 кВ) и высоком (до 200 кВ) ускоряющем напряжении. Электронный пучок на поверхности стыка материалов фокусируют в пятно диаметром от 0,1 мм до нескольких миллиметров, что при мощности сварочных пушек 1 - 100 кВт позволяет достигать плотности мощности $q = 10^5 - 10^7$ Вт/см^2.

Изменяя параметры процесса, можно получать различные соотношения глубины h проплавления к ширине d шва. По назначению этого соотношения различают следующие режимы сварки: мягкий ($h << d$), переходный ($h = d$), жесткий ($h > d$), с «кинжальным» проплавлением ($h >> d$).

Параметры пучка

Сварочный шов обычно характеризуется глубиной, шириной и их отношением. В общем случае задача сварки состоит в том, чтобы для данного материала и при заданной скорости сварки добиться требуемой глубины проплавления шва. Отсюда вытекает необходимость выбора таких параметров электронного пучка, которые обеспечили бы выполнение всех этих условий. Глубину проплавления можно определить по формуле

$$h = 2\frac{U_B I_B}{dv}\left(\frac{1}{c\rho T_S - H_S}\right)\times\left[\frac{1}{1+1{,}2\cdot 10^{-6}\lambda\left(\frac{1}{dv}+\frac{1}{2a}\right)}\right], \qquad (3.18)$$

где h - глубина проплавления, м; U_B – ускоряющее напряжение, В; I_B – сила тока пучка, А; d – диаметр фокусного пятна на детали, м; ν – скорость сварки, м/с; с – удельная теплоемкость, Дж/(кг/К); ρ - плотность материала, кг/м^3; T_S – разность температуры плавления и температуры окружающей среды, К; λ - теплопроводность, Вт/(м К); а – температуропроводность, м^2/с; H_S – энтальпия плавления, Дж/м^3.

Согласно выражению (3.18), при заданном диаметре пучка и постоянных прочих условиях для проплавления шва определяющей является только мощность пучка $P_0 = U_B I_B$. Из-за тех потерь энергии, пренебречь которыми все же нельзя, в особенности из-за потерь с отраженными электронами, проплавление шва получается менее глубоким, чем это следовало бы ожидать на основании выражения (4.2).

В выражении (3.18) не учитывается взаимодействие электронного пучка с паром в капилляре, образующемся при проплавлении материала. Несмотря на это, при относительно малой и средней удельной поверхностной мощности пучка эта формула вполне приемлема для ориентировочных оценок.

Связь глубины проплавления с ускоряющим напряжением при условии, что остальные параметры (мощность пучка и диаметр) остаются постоянными, можно представить выражением

$$h_1/ h_2 = (U_{B1} / U_{B2})^{1/2}, \qquad (3.19)$$

где h_1 – соответствует ускоряющему напряжению U_{B1}, а h_2 – U_{B2}.

Или

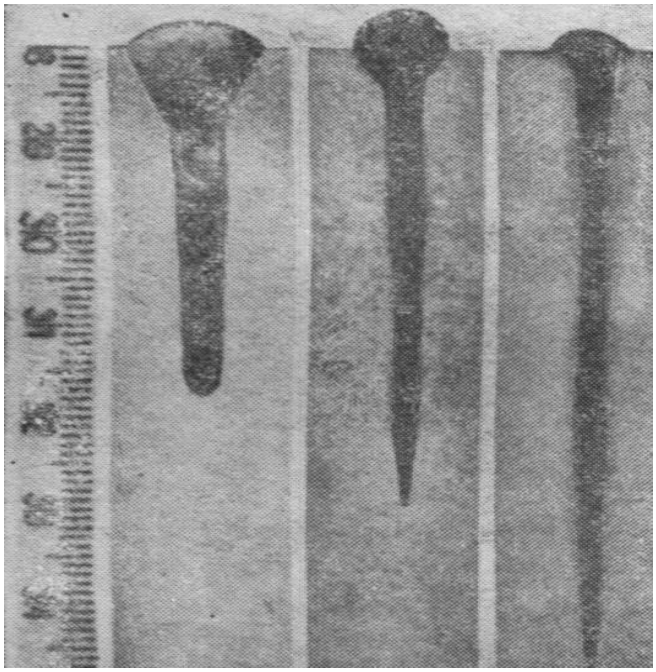
$$h \approx I_B\, U_B^{\ 3/2}. \qquad (3.20)$$

Сечение плавящегося материала при этом постоянно. Отсюда следует, что при увеличении ускоряющего напряжения U_B ширина шва b уменьшается пропорционально $\sqrt{U_B}$. Тогда для отношения «глубина - ширина» шва получаем, что отношение глубины шва к его ширине пропорционально ускоряющему напряжению:

$$\frac{h_1 / b_1}{h_2 / b_2} = \frac{U_{B1}}{U_{B2}}, \qquad (3.21)$$

где b_1 – соответствует ускоряющему напряжению U_{B1}, а b_2 – U_{B2}.

Влияние ускоряющего напряжения на соотношение h/b (рис. 3.17) проявляется в широком диапазоне скоростей сварки.



а) *б*) *в*)

Рис. 3.17. Влияние ускоряющего напряжения на проплавление шва при фиксированных значениях мощности и радиуса пучка и скорости сварки:

P_0 = 10 кВт; r = 0,25 мм;

v = 3 мм/с; материал - нержавеющая сталь;

а) – U_B = 30 кВ; *б*) – U_B = 63 кВ; *в*) – U_B = 100 кВ

При заданной общей мощности пучка проплавление шва тем глубже, чем меньше диаметр пучка и, следовательно, чем выше удельная поверхностная мощность в его пятне.

Положение фокуса пучка

При сварке деталей большой толщины ширина шва увеличивается из-за рассеяния электронов материалом, а также потому, что пучок имеет форму сходящихся лучей (апертура пучка около 10^{-2} рад). При такой апертуре на расстоянии точки минимального сечения пучка от поверхности, равном 50 мм, в глубине материала диаметр пучка увеличивается на 1 мм.

Диаметр пучка

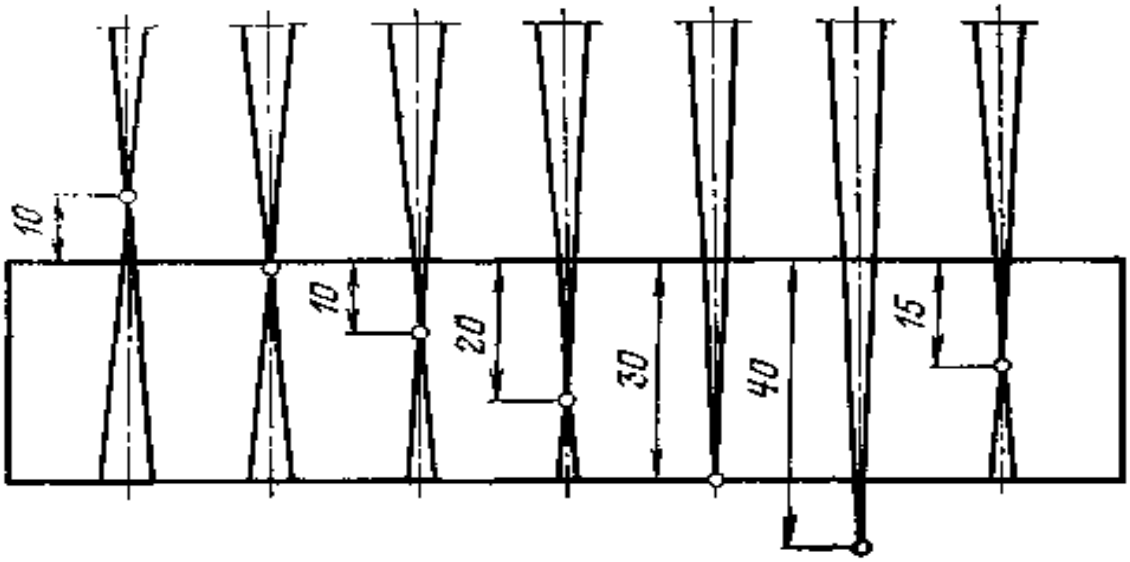
$$d_z^2 = d_0^2 + 4\alpha^2 + z^2, \qquad (3.22)$$

где d_Z – диаметр пучка на расстоянии z от фокуса; d_0 – диаметр пучка при z = 0; α - апертура (половина угла раскрытия) пучка.

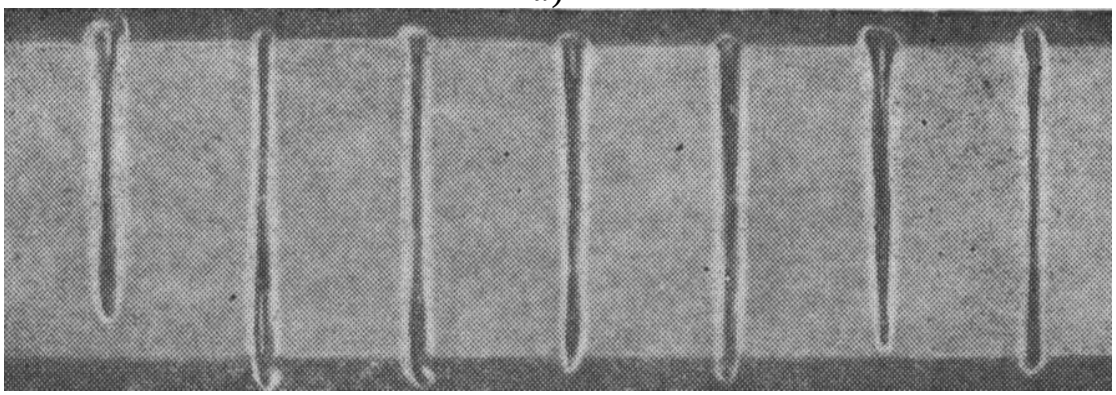
Полученные на практике формы проплавления швов при различной фокусировке пучка относительно детали, показаны на рис. 3.18.

Если фокус расположен над поверхностью, то часто пучок называют перефокусированным, а если фокус расположен под ней, - недофокусированным. Из рисунка видно, что положение фокуса влияет на глубину, ширину проплавления, а следовательно, на их отношение и форму проплавления шва. Кроме того, от положения фокуса зависят процессы образования головки и

корня шва. Желая получить максимальную глубину проплавления, следует выбирать положение фокуса, соответствующее 0,5 - 0,75 этой глубины. При максимальной глубине проплавления достигается и максимум отношения «глубина - ширина» проплавления, а энергия, израсходованная пучком на единице длины шва и отнесенная к глубине проплавления, достигает минимума.



а)



б)

Рис. 3.18. Проплавление шва при различных положениях фокуса относительно поверхности детали: *а*) - схема положений фокуса; *б*) - фотография среза детали с проплавлением швов

Использование энергии, КПД процесса

При электронно-лучевой сварке не вся подводимая с электронным пучком энергия непосредственно используется для процесса сварки. Существенные потери ее обусловлены отражением электронов. Степень отражения энергии, помимо рода материала, сильно зависит от угла между направлением электронного пучка и нормалью к бомбардируемой поверхности. Рассеяние энергии при отражении в значительной мере определяется усредненной

во времени геометрией поверхности, разграничивающей паровой капилляр и слой расплава. Вследствие того, что электронный пучок направлен к этой поверхности преимущественно под большим углом от нормали, существенную роль играет его многократное отражение. Возможный угол выхода отраженных электронов, а значит, и вероятность отражения электронов из капилляра тем меньше, чем выше отношение глубины капилляра к его ширине.

Если сварку проводят в высоком вакууме, то потери мощности на ионизацию газа тоже незначительны. Кроме того, при сварке тепловые потери за счет теплопроводности и излучения невелики вследствие квазиадиабатического характера нагрева и небольшой площади расплава у поверхности образца. Испарение части материала из парового капилляра также не сопровождается заметными потерями теплоты, так как согласно оценкам за время сварки испаряется не более 1 % всей массы расплавленного материала. Все эти факторы обуславливают высокий КПД электронно-лучевой сварки.

Тепловое воздействие на окрестности шва

Электронно-лучевая сварка отличается от других способов сварки с проплавлением тем, что область номинально высоких (требующихся для сварки) температур ограничена непосредственной окрестностью сварного шва. Причина этого заключается в высокой концентрации мощности в пучке. На рис. 3.19 показаны кривые максимальных температур в функции расстояния от края шва, типичные для газовой, дуговой и электронно-лучевой сварки стали. Как следует из рисунка, при электронно-лучевой сварке максимальное повышение температуры на расстоянии около 1 мм от края шва в стали составляет всего лишь 250 К.

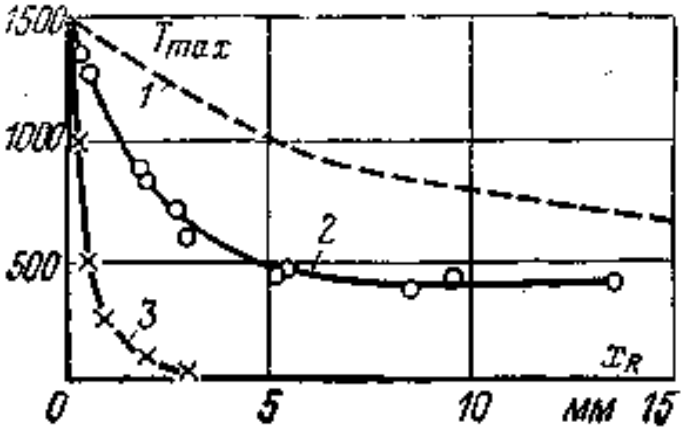


Рис. 3.19. Максимальная температура T_{MAX} как функция расстояния x от края шва при различных способах сварки: скорость сварки 0,6 мм/с; материал – сталь 37; 1 - газовая сварка; 2 - ручная дуговая сварка; 3 - электронно-лучевая сварка

Так как концентрация мощности и скорость электронно-лучевой сварки весьма высоки, распространение тепла вперед по ходу сварки в материале почти отсутствует. Характерный пример хода изотерм показан на рис. 3.20. Их практическое слияние у фронта сварки свидетельствует о высоких градиентах температуры и малой протяженности волны на этом участке.

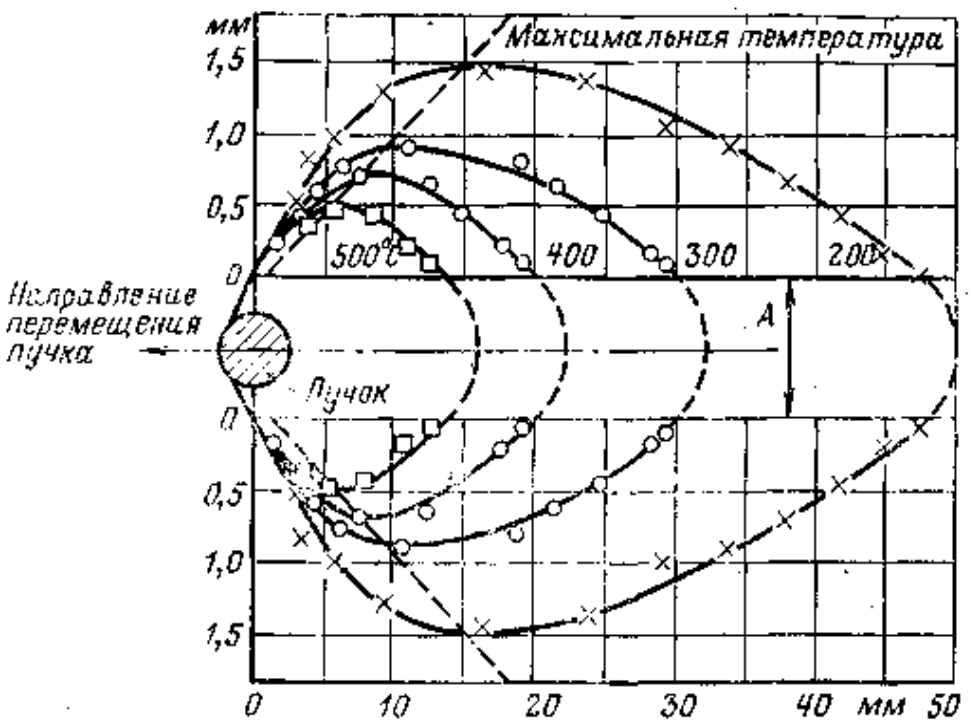


Рис. 3.20. Поле изотерм при электронно-лучевой сварке: скорость сварки 10 мм/с; материал – хромомолибденовая сталь; по оси абсцисс – длина шва; по оси ординат – расстояние от края шва (А – ширина шва)

Для температуры в середине шва, т.е. для $x = 0$, пренебрегая конвекцией, для стали получаем

$$T(t) \approx 1{,}67 \cdot 10^3 \frac{U_в I_в}{s v \sqrt{t}}; \qquad (3.23)$$

для скорости охлаждения

$$\frac{dT}{dt} \approx -8{,}4 \cdot 10^2 \frac{U_в I_в}{s v \sqrt{t^3}}, \qquad (3.24)$$

скорость охлаждения в случае стали составляет:

$$\frac{dT}{dt} \approx -1{,}8 \cdot 10^{-7} \frac{(T - T_0)^3}{(e_m s)^2}, \qquad (3.25)$$

где $U_В$ – ускоряющее напряжение, В; $I_В$ – сила тока пучка, А; ν – скорость сварки, м/с; s – толщина листа, м; t – время; e_m – энергия на единицу длины шва, Дж/м.

Следовательно, скорость охлаждения тем выше, чем меньше переданная в шов погонная энергия e_m, отнесенная к толщине листа. Поэтому энергия, затрачиваемая на единицу длины шва, особенно мала, а скорость охла-

ждения соответственно особенно высока при больших отношениях «глубина - ширина» шва и при высоких скоростях сварки.

Скорость охлаждения имеет особенно большое значение при сварке материалов, испытывающих структурные превращения, например, низколегированных или углеродистых сталей. Процессы структурных превращений в области сварного шва и в его непосредственной окрестности, где материал подвергается сильным тепловым нагрузкам, зависят от той скорости, с которой материал проходит критические интервалы температур. Закаленная зона перекрывает ширину шва, и твердость в этой зоне в несколько раз выше, чем твердость исходного материала. Одним из следствий закалки материала является опасность образования трещин. Поэтому при электронно-лучевой сварке материалов, склонных к образованию закалочных трещин, оптимальные параметры сварки приходится подбирать экспериментально.

Осцилляция пучка

Колебательные перемещения (осцилляция) пучка в непосредственной близости от точки сварки дают возможность дополнительно влиять на процесс сварки, а значит, и на образование шва. Если частота осцилляции пучка достаточно мала, то паровой капилляр следует за мгновенным положением места бомбардировки поверхности пучка. При более высокой частоте происходит расширение парового капилляра и слоя расплава. Существенным результатом осцилляции пучка является усиление испарения летучих компонент из сварочной ванны. Такими методами, например, можно снизить склонность материала к образованию пор. При соответствующем выборе частоты и амплитуды осцилляция пучка приводит к образованию мелкочашуйчатого шва.

Применение электронно-лучевой сварки

Широта области применения электронно-лучевой сварки объясняется тем, что этому способу присущи широкие возможности варьировать мощность, удельную поверхностную мощность и диаметр пятна электронного пучка, возможность управлять пучком во времени и пространстве и специфический эффект глубокого проплавления, с которым связан чрезвычайно малый ввод тепловой мощности. Спектр применений охватывает широкую номенклатуру материалов, часть которых не поддается сварке другими способами, габариты свариваемых изделий могут различаться на несколько порядков, свариваться могут самые разнообразные конструкции. Благодаря этой широте и присущих ему возможностей автоматизации электронно-лучевой способ существенно расширяет область применения сварки.

Некоторые типичные виды сварочных соединений схематически представлены на рис. 3.21.

Кинжальное проплавление дает возможность за один проход сваривать без разделки кромок заготовки толщиной до 100 мм, в то время как при дуговой сварке для этой цели необходима разделка кромок и несколько десятков проходов. Вакуум как защитная среда при сварке целого ряда химически активных и тугоплавких металлов и сплавов позволяет получать значительно более высокие показатели свойств сварного шва, чем при сварке в защитных газах. Поэтому сварные конструкции из таких материалов, как вольфрам, молибден, титан, цирконий, тантал и др., изготовляются в основном с помощью электронно-лучевой сварки.

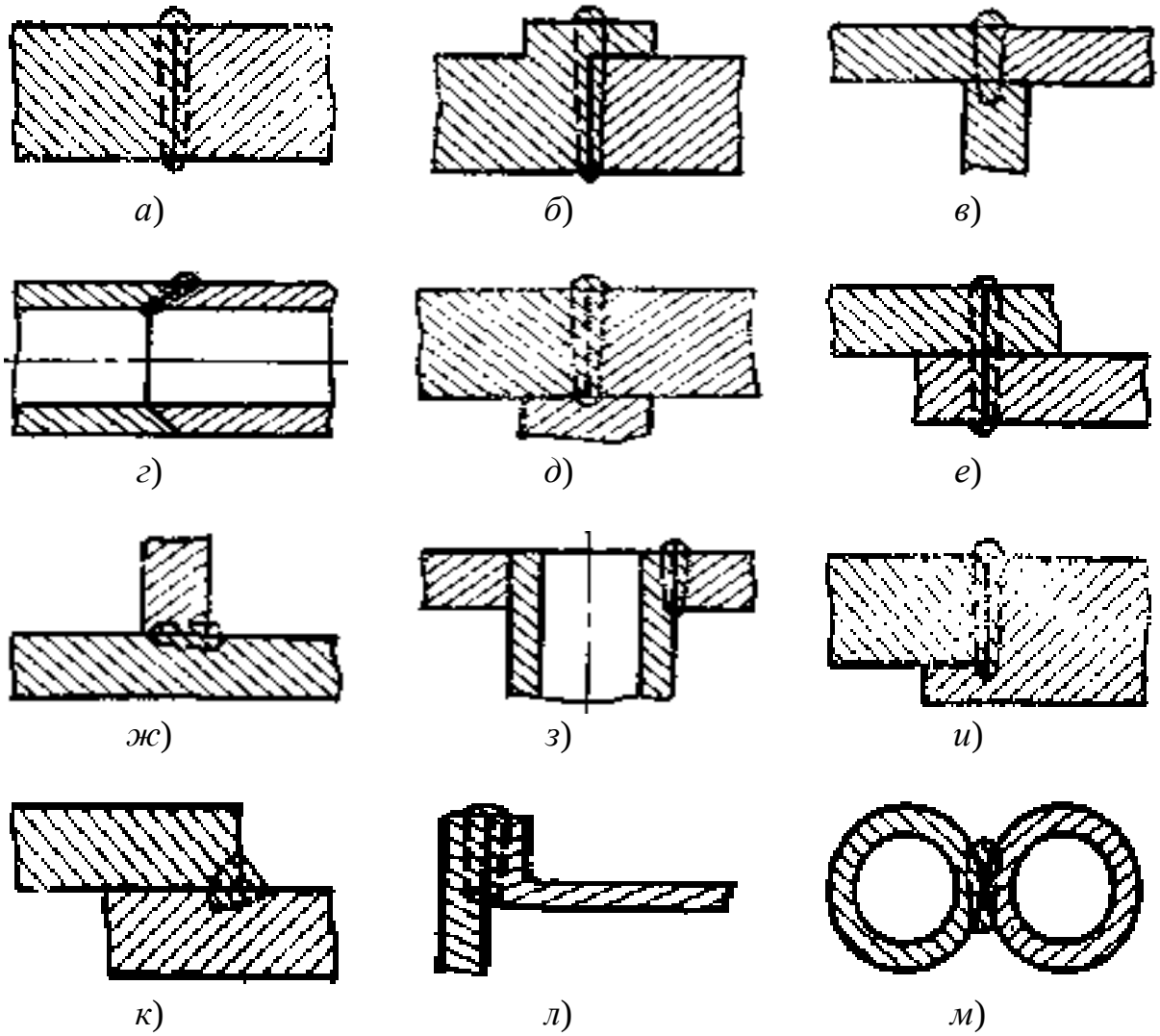


Рис. 3.21. Возможные типы сварных соединений, получаемых электронно-лучевой сваркой : *а*) - стыковой шов; *б*) - то же внахлестку по верхней стороне; *в*) - Т-образное соединение со сквозным швом; *г*) - окружной наклонный шов; *д*) - стыковой шов с опорой; *е*) - соединение внахлестку; *ж*) - Т-образное соединение с угловым швом; *з*) - лобовой шов; *и*) - стыковой шов внахлестку по нижней стороне; *к*) - соединение внахлестку с угловым швом; *л*) - отбортовочный шов; *м*) - тангенциальный шов при сварке параллельно расположенных труб в пучок

Малый объем ванны расплавленного металла, получаемый при электронно-лучевой сварке, резко снижает деформации свариваемых изделий.

Открывается возможность сваривать конструкции из уже окончательно обработанных деталей с незначительной последующей размерной обработкой или вовсе без нее. Возможна также сварка термообработанных изделий, например, после закалки. Зона разупрочнения в результате сварки настолько мала, что это не сказывается на работоспособности изделия в целом.

Электронно-лучевую сварку целесообразно применять при изготовлении толстостенных конструкций, так как за один проход можно получить проплавление глубиной до 200... 300 мм. Преимущество метода заключается в снижении остаточных деформаций благодаря малому количеству расплавляемого металла и в сокращении времени сварки. Таким способом сваривают узлы тяжелого энергетического оборудования (атомных реакторов, бойлеров электростанций и т. д.).

Используя электронно-лучевую технологию сварки, можно получать швы малых размеров в конструкциях различных радиоэлектронных схем и устройств, где сварку часто приходится вести с применением микроскопа.

В автомобильной промышленности электронно-лучевая сварка нашла применение при изготовлении зубчатых блоков коробок передач. С точки зрения технологичности этих узлов целесообразно изготовлять отдельные шестерни, проводить их полную термическую обработку, а затем собирать на валу и фиксировать с помощью сварки. По такой технологии производят сотни тысяч изделий в год. На предприятиях используют специализированные сварочные установки, встроенные в общий технологический цикл.

Микросварка применяется для соединения элементов микросхем. Электронно-лучевым способом сваривают различные выводы и контактные элементы толщиной не более 0,3 мм и проводники диаметром 10...300 мкм. Как правило, число соединений в одной микросхеме может достигать нескольких сотен. Сварка ведется с использованием микроскопа для точной наводки на место будущего соединения или в автоматическом режиме со сканированием луча малой мощности по всей поверхности. В последнем случае на места сварки наносится специальное флюоресцирующее вещество; при попадании электронного луча на место сварки световой сигнал улавливается фотоэлектронным устройством, управляющим мощностью луча. В месте сварки мощность луча резко увеличивается и происходит образование сварного соединения.

Электронным лучом в вакууме сваривают герметичные мембранные узлы приборов для измерения давления, корпуса микросхем, полупроводниковых приборов, реле.

Электронно-лучевая сварка позволяет получать сварные соединения самых различных сочетаний металлов с керамикой и даже металлов с графитом. Точная оценка свариваемости может быть дана только с учетом конкретных условий, но несмотря на это существуют многочисленные возможности комбинаций материалов.

В целях экономии дорогостоящих инструментальных сталей в промышленности с помощью электронно-лучевой сварки налажено производ-

ство заготовок для ленточных пил. Лента 2 (рис. 3.22) шириной 1 ... 3 мм из инструментальной стали сваривается с материалом полотна, выполненного из менее дефицитного материала (обычно вязкой конструкционной стали). При нарезке корни 3 зубьев специально доводятся до зоны более вязкого металла полотна 1, что снижает выкрашивание зубьев при эксплуатации пилы по сравнению с полотном, выполненным целиком из инструментальной стали.

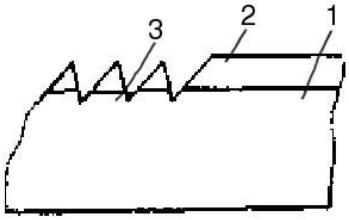


Рис. 3.22. Изготовление составной пилы
с помощью электронно-лучевой сварки

3.2.3 Электронно-лучевое испарение материалов

Испарение в вакууме материалов при нагреве их электронным лучом широко используют для получения тонких пленок. В отличие от других способов испарения, где энергия подводится к испаряемой поверхности через стенку тигля или высокотемпературный нагревательный элемент, при электронно-лучевом испарении осуществляется прямой нагрев поверхности испаряемого материала. Это позволяет испарять материалы из водоохлаждаемых тиглей, что особенно важно при работе с химически активными и тугоплавкими материалами. Испарение материала из охлаждаемого тигля дает возможность получать покрытия высокой чистоты, поскольку при этом почти полностью исключается реакция испаряемого материала с материалом тигля, а материал тигля и продукты реакций практически не испаряются.

Важно отметить, что при электронно-лучевом испарении удается управлять электронным пучком в пространстве и во времени, регулируя тем самым интенсивность ввода энергии в испаряемое вещество, а следовательно, скорость испарения и распределение плотности потоков пара.

При испарении материалов наличие вакуума обеспечивает получение чистых по составу пленок и улучшает адгезию осажденной пленки.

В зависимости от назначения процесса в промышленности применяют электронные пушки мощностью от 250 Вт до 200 кВт, а производительность процесса составляет от 1 г/ч до 100 кг/ч. Электронно-лучевое испарение применяют в микроэлектронике при нанесении различных металлических покрытий на стальную ленту при изготовлении фольги из псевдосплавов сложного состава. Электронным лучом можно испарять и различные неметаллические материалы - диоксид кремния, оксид алюминия, различные виды стекла. Такие покрытия применяются в оптической промышленности и в различных областях электроники.

Процессы испарения

Испарительное осаждение – это процесс вакуумного нанесения покрытий, при котором между испарителем и подложкой создается направленный поток пара.

Принцип электронно-лучевого испарения пояснен на рис. 3.23. В своих основных чертах установка для электронно-лучевого испарения состоит из технологической камеры со своей системой откачки, тигля с испаряемым материалом, электронной пушки, заслонки для пара и подложки с приспособлениями для ее крепления, а иногда - нагрева. В противоположность традиционным способам нагрева здесь испаряемый материал нагревается вследствие прямой бомбардировки его поверхности электронным пучком. При этом существенная доля кинетической энергии электронов пучка превращается в тепло, и поверхность нагревается до такой температуры, что становится источником пара. В этом потоке пара располагают подложку, на которую конденсируется часть пара, т. е. производится напыление. Испарительное устройство дополняют средствами измерения и контроля, которые особенно важны для управления параметрами электронного пучка в процессе напыления.

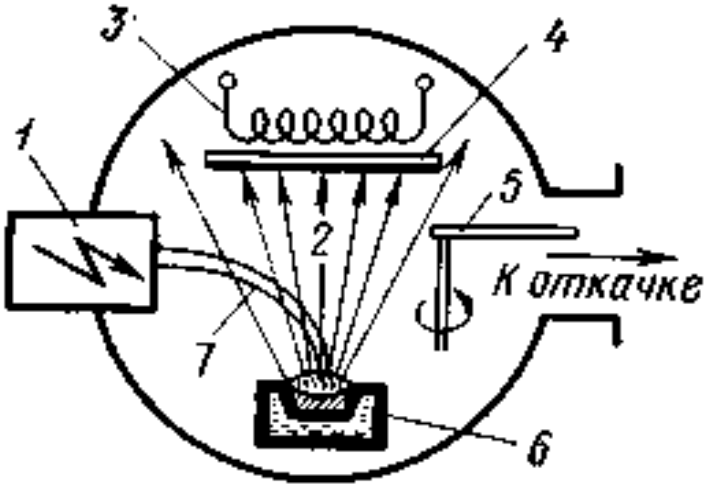


Рис. 3.23. Схема осуществления электронно-лучевого испарения:
1 - пушка; 2 – поток пара; 3 - подогреватель; 4 - подложка;
5 - заслонка; 6 - тигель; 7 - пучок электронов

Для получения особо чистых пленок при электронно-лучевом испарении возможен бестигельный вариант испарителя. В простейшем случае материал можно испарять из жидкой лунки на поверхности массивного слитка. Для сублимирующихся материалов в качестве испарителя обычно используют заготовку в виде стержня или штабика, непрерывно перемещающегося под пучком. Наконец, если не требуются высокие скорости испарения, возможно нанесение покрытия из капли расплава, висящей на торце облучаемого электронами штабика.

Нанесение покрытий из сплавов и химических соединений

Сплавы

Масса материала, испаряемая в единицу времени с поверхности S_1, определяется по формуле

$$G_{ИСП} = a g_{ИСП} S_1 , \qquad (3.26)$$

где а - коэффициент, учитывающий обратное осаждение части испаренного материала в результате рассеяния на приповерхностном облаке пара; $g_{ИСП}$ - скорость испарения, г·см$^{-2}$·с$^{-1}$:

$$g_{ИСП} = 4{,}4 \cdot 10\text{-}4 \cdot \sqrt{A / Tp_s} , \qquad (3.27)$$

которая для вещества с атомным весом А подчиняется уравнению Лэнгмюра;

$p_s = K_1 \exp(- K_2/T)$ - упругость пара материала при температуре Т, Па. Коэффициенты K_1 и K_2 зависят от материала, поэтому при одной и той же температуре скорости испарения различных веществ могут сильно отличаться (рис. 3.24). Это существенно затрудняет термическое получение покрытий сложного состава, в которых необходимо выдерживать заданное соотношение между различными компонентами.

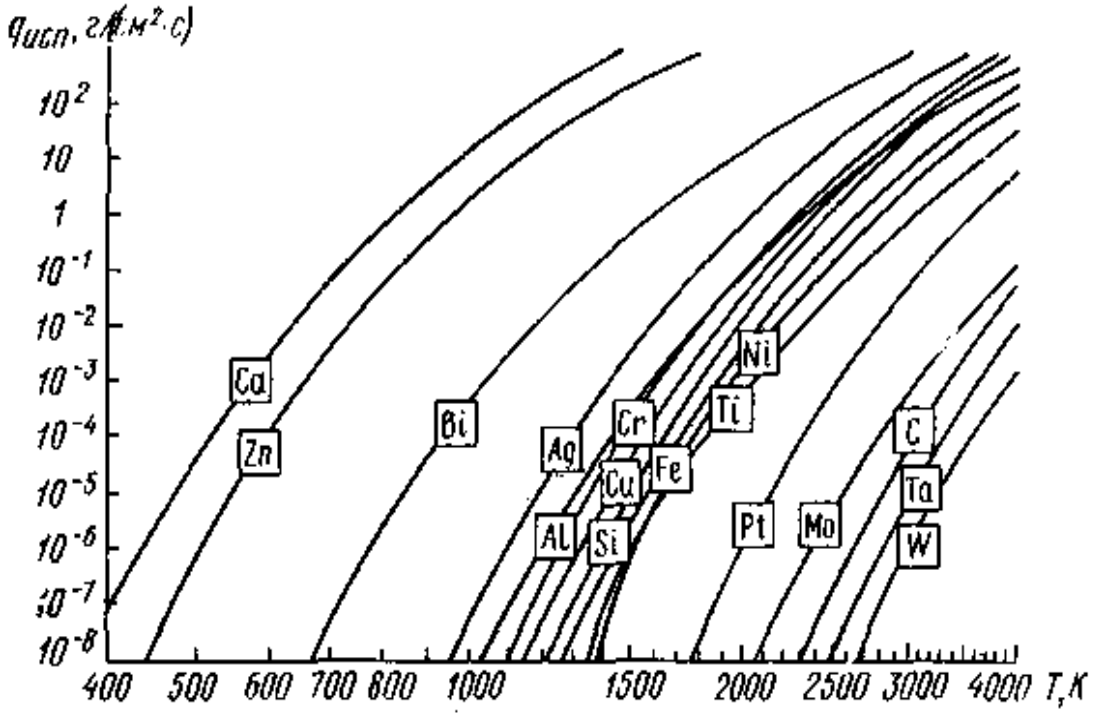


Рис. 3.24. Зависимость скорости испарения различных материалов от температуры

При нанесении покрытий из сплавов металлов требуется выдерживать соотношение компонент сплава одинаковым как по всей поверхности подложки, так и по толщине слоя. Слои из сплавов напыляют по двум принци-

пиальным схемам: либо по схеме многотигельного испарения, либо по схеме однотигельного испарения (рис. 3.25).

При многотигельном испарении компоненты испаряются порознь, каждая из своего тигля, а конденсируются на подложке совместно. При однотигельном испарении поток пара создается и конденсируется, имея тот состав, который требуется для покрытия.

Особенностью многотигельного испарения является то, что под обоими тиглями устанавливаются различные потоки пара, а если тигли расположены близко друг к другу, то между подложкой и тиглем возникает обширная область, в которой поток пара содержит обе компоненты.

Для получения покрытий из сплавов с неизменным составом по схеме многотигельного испарения необходима высокая стабильность скоростей испарения, что требует поддержания с высокой точностью постоянства температур в испарителях.

Многотигельное испарение можно вести, используя несколько самостоятельных электронно-лучевых испарителей или нагревая несколько тиглей поочередно одним и тем же пучком.

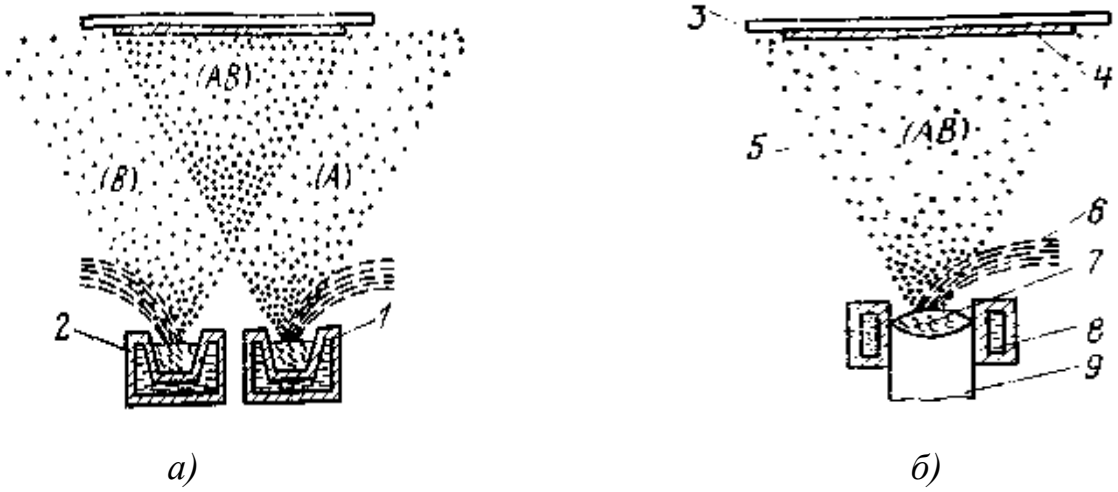


Рис. 3.25. Принципы получения пленок сплавов с заданным составом слоев (на примере бинарного сплава АВ): *а*) - многотигельный метод: смешение в паровой фазе путем раздельного испарения компонент А и В; *б*) – однотигельный метод: испарение из общего расплава с непрерывной подпиткой в стационарном режиме; 1 - тигель с компонентой А; 2 - тигель с компонентой В; 3 - подложка; 4 - слой; 5 - поток пара; 6 - электронный пучок; 7 - лунка расплава; 8 - кольцевой тигель; 9 - штабик из испаряемого сплава (твердый)

Метод многотигельного испарения для получения покрытий из сплавов применяют в том случае, если испаряемый материал трудно или невозможно приготовить в том же составе, как и тот, который должен быть у покрытия, и, следовательно, применить однотигельную схему нельзя. Применяя многотигельное испарение, удавалось менять долю карбида ниобия в сплавах типа Fe-Ni-NbC в пределах от нескольких десятых долей процента до 10 %. Смешение компонент в паровой фазе целесообразно производить тогда, когда давления паров компонент чрезвычайно сильно (на четыре порядка и более)

отличаются друг от друга. Кроме того, такое смешение применяют, если доля одной из компонент в слое должна быть весьма небольшой.

Для определения состава покрытия, которое получается по схеме однотигельного испарения, следует принять допущение о справедливости закона парциальных давлений.

Для того чтобы процесс однотигельного испарения был стационарным, подпитывающий материал должен иметь точно такой же состав, который нужно получить в сплаве.

При применении однотигельного испарения с постоянной подпиткой существенную роль играет время переходного процесса – время, необходимое для того, чтобы концентрация компонентов в расплаве изменилась от начальной до некоторого значения. Необходимым является условие, чтобы масса компонентов и общая масса, подводимые за единицу времени к расплаву, были равны скоростям испарения компонентов и общей скорости испарения.

Для нанесения покрытий время переходного процесса является непроизвольным и всегда следует стремиться его уменьшить. Малое время переходного процесса достигается при высоких температурах испарения и высоком давлении пара. При испарении из больших тиглей велико и время переходного процесса. Для того чтобы добиться малого времени переходного процесса, применяют так называемую стартовую заправку тигля. Она представляет собой материал, количество которого соответствует объему жидкой лунки, а состав – сплаву расплава в стационарном режиме.

Кроме того, с помощью времени переходного процесса можно судить и о степени влияния примесей при испарении. Менее летучие примеси, т.е. примеси с меньшим давлением пара, обладают бо′льшим временем переходного процесса, которое в большинстве случаев велико по сравнению со временем напыления слоя. Поэтому при нанесении покрытий доля примесей ниже, чем в подводимом материале. Этому благоприятному эффекту противостоит то обстоятельство, что расплав обогащается менее летучей примесью, вследствие чего скорость испарения постоянно уменьшается.

Например, при нанесении покрытия из сплава Ag-Cu концентрация более летучей компоненты – серебра в начале испарения очень высока – от 80 до 90 %; в дальнейшем в ходе испарения она снижается и по истечении времени переходного процесса составляет уже около 16 %. Кроме того, хорошо прослеживается уменьшение времени переходного процесса при повышении температуры испарения. Таким образом, выбирая те или иные интервалы времени, можно получить покрытие с содержанием серебра от 85 до 90 %.

Испарение связано также с очисткой сплавов от определенных примесей. В табл. 3.2 представлены результаты химических анализов исходных материалов и полученных покрытий. У покрытий вследствие их повысившейся чистоты такие свойства, как пределы прочности на растяжение и изгиб, оказались даже более высокими, чем у прокатанных материалов при той же толщине.

Таблица 3.2

Сравнение результатов химического анализа испаряемого материала и покрытия Ti90-Al16-V4% (усредненные значения, масс. %)

Элемент	Al	V	Fe	N	C	O	H	Прочие	Ti
Исходный состав	6,10	4,00	0,30	0,05	0,08	0,20	0,015	0,4	Остальное
Состав покрытия	5,93	3,97	0,15	0,007	0,021	0,12	0,0051	0,4	Остальное

Пределы применимости однотигельного испарения сплавов с непрерывной подпиткой составляют материалы с очень большой разницей в давлениях паров и колебаниях состава расплава. Сильные различия в давлениях паров приводят к недопустимо большим временам переходного процесса. Причинами колебаний состава расплава могут явиться изменения мощности электронного пучка во времени или колебания мощности тепловых потерь в тигле. Подобного рода нестабильности приводят к изменению объема ванны расплава, что при определенных условиях может вызвать критические изменения состава слоя покрытия.

Следовательно, изменение концентрации компоненты в слое покрытия зависит от изменения объема ванны расплава и от соотношения концентраций ее в подводимом материале и в расплаве.

Если необходимо получить покрытие, состоящее более чем из двух компонент, и если давление пара одной из них отличается от давления пара какой-либо другой более чем в 10^3 раз, то можно применить комбинацию схем одно-и многотигельного испарения, когда компоненту с большим отличием по давлению пара испаряют из отдельного тигля.

В особых случаях колебания состава слоя покрытия, полученные при его образовании, могут быть устранены последующей термообработкой покрытия. Таким путем по схеме однотигельного испарения были получены покрытия из сплавов, компоненты которых имели давления паров, различающиеся в 10^6 раз.

Химические соединения

Большинство соединений при термическом испарении диссоциирует частично или полностью, и получить из таких соединений простым испарением тонкие покрытия стехиометрического состава невозможно. Однако для ряда соединений, таких как хлориды, сульфиды, селениды, теллуриды, в ограниченной степени оксиды, а также полимеры, благодаря малой степени диссоциации или вследствие рекомбинации компонент при конденсации возможность термического напыления все же существует.

Пригодность соединения для указанной цели ограничивается не только диссоциацией, но зачастую еще и способностью его реагировать с материалом тигля, что приводит к изменениям в составе слоя. Эти границы частично расширяются при применении электронно-лучевых способов испарения, использующих водоохлаждаемые тигли; возможность избежать таким путем реакций в тигле позволяет проводить испарение некоторых химически высокоактивных соединений. Поскольку при нагреве электронным пучком можно достичь высоких температур на поверхности испарения, поддаются испарению таким путем и нелетучие, и тугоплавкие соединения, например окись алюминия, окись кремния, различные стекла, а также карбиды.

Для того чтобы получать из определенных соединений покрытия с составом, близким к стехиометрическому, несмотря на процессы термической диссоциации при столкновениях, при термическом и особенно при электронно-лучевом способах используют различные приемы.

Из них наибольшее значение имеет реакционное напыление, т. е. образование химического соединения во время процессов испарения и конденсации из испаряемой компоненты и реагента, вводимого в рабочий объем в газообразном состоянии. Реакционное напыление вначале применялось для получения окислов испарением металлов или низших окислов; в настоящее время оно используется при получении покрытий и из других соединений, в первую очередь из карбидов и нитридов.

Для осуществления реакционного напыления в технологической камере напуском газа устанавливают требуемое полное или парциальное давление газа-реагента, находящееся в общем случае в пределах от 10^{-2} до 10^{-1} Па. Если давление газа-реагента выбрано чересчур высоким, то газовые включения и потери энергии частицами испаряемой компоненты вследствие повышенной частоты столкновений с газом могут отрицательно сказаться на свойствах напыляемого слоя.

Для нанесения оксидных и нитридных покрытий в качестве газа-реагента чаще всего используют кислород и азот. В особых случаях окислительные процессы осуществляют с участием водяного пара. Для реакционного напыления карбидов используют легко диссоциирующие углеводороды, например C_2H_2 или C_2H_4.

Другая возможность получения покрытий из соединений заключается в испарении, например, двух компонент, которые реагируют друг с другом при совместной конденсации на подложке в требуемом соотношении. Таким способом были в числе прочих получены тонкие пленки соединения Nb_3Sn при раздельном электронно-лучевом испарении ниобия и олова.

Тонкие покрытия определенного химического состава можно получать также в результате реакций конденсируемого материала с материалом подложки или адсорбированного на ней слоя. Такой способ образования промежуточных слоев играет важную роль в производстве покрытий определенных материалов с повышенной кроющей способностью или промежуточных сцепляющих слоев.

Режимы процесса испарения
Схема испарения

В состав электронно-лучевого испарителя входят электронная пушка и тигель. Электронно-лучевые испарители строятся по различным принципам. Наиболее важные из них представлены на рис. 3.26.

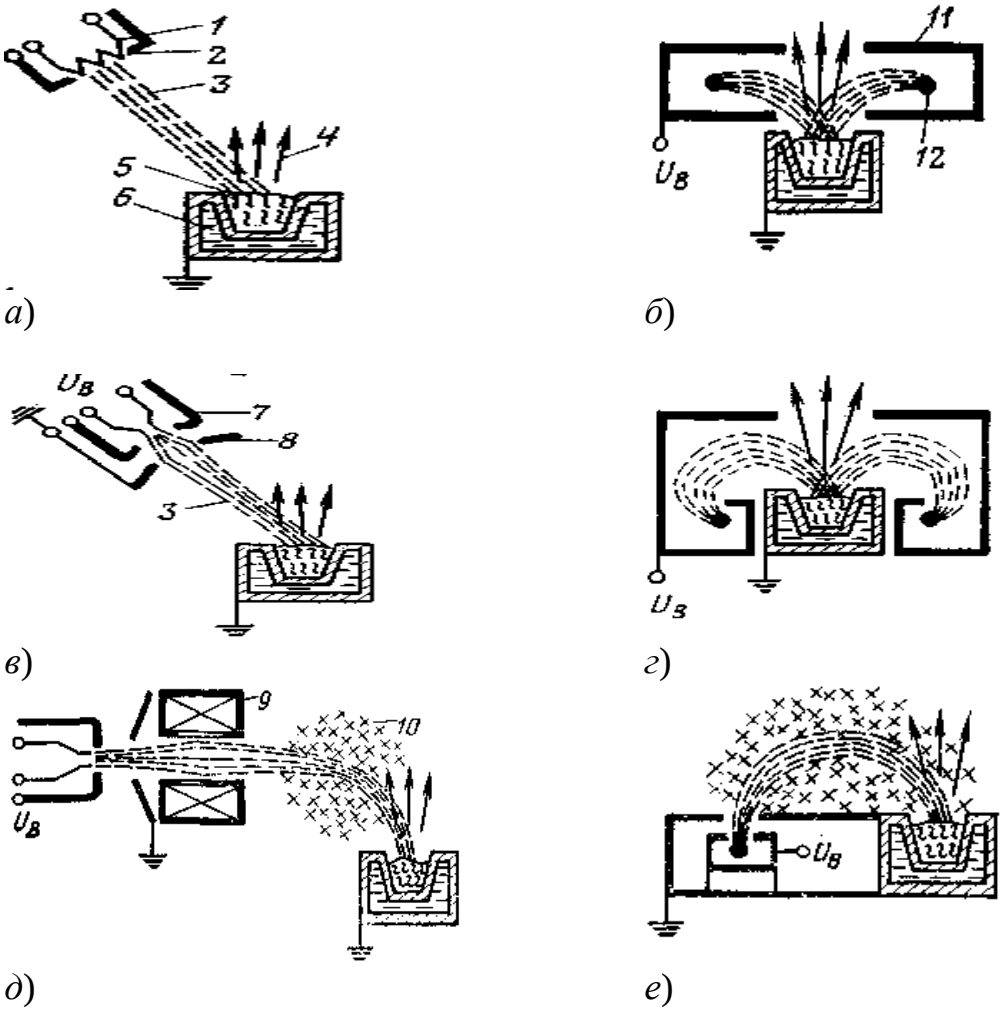


Рис. 3.26. Принципы устройства электронно-лучевых испарителей: *а*)-испаритель с нагревом электронной бомбардировкой, с линейным катодом и электростатической фокусировкой; *б*) - испаритель с нагревом электронной бомбардировкой, с кольцевым катодом и электростатической фокусировкой; *в*) - испаритель с аксиальной пушкой и длиннофокусной электростатической фокусировкой; *г*) - испаритель с нагревом электронной бомбардировкой, с кольцевым катодом, электростатической фокусировкой и отклонением пучка; *д*) - испаритель с аксиальной пушкой, магнитной фокусировкой и магнитным поворотом пучка на 90°; *е*) – испа-ритель с плосколучевой пушкой и магнитным поворотом пучка на 180°; 1 - катод; 2 - электрод под потенциалом катода; 3 - электронный пучок; 4 - поток пара; 5 - испаряемый материал; 6 - водо-охлаждаемый тигель; 7 - управляющий электрод; 8 - анод; 9 - магнитная линза; 10 - поперечное магнитное поле; 11 - кольцевой электрод; 12 - кольцевой катод

В простых устройствах с нагревом электронной бомбардировкой катод расположен вблизи испаряемого материала или тигля. Под действием уско-

ряющего напряжения между катодом и тиглем поток электронов устремляется на испаряемый материал. Для того чтобы поток электронов, попадающих на испаряемый материал, увязать с определенным диаметром тигля, применяют управляющий электрод, который находится под потенциалом катода. Если катод кольцевой, то и управляющему электроду придают форму кольца, концентрически охватывающего тигель.

Если в пространство между тиглем и управляющим электродом с катодом поместить еще и анод, то электронный поток будет формироваться в пучок. Существенное достоинство такой схемы заключается в том, что пространство между генератором пучка и источником пара свободно от полей, т. е. что генерация электронного пучка и испарение пространственно разделены.

Другим способом фокусировки пучка является использование магнитных линз. Размещение пушки над тиглем имеет тот недостаток, что пушка находится в прямом потоке пара. К вредным последствиям этого относится не только напыление испаряемого материала и детали пушки, но и ограничение полезного места для размещения подложки из-за затенения части технологической камеры пушкой. Указанных недостатков можно избежать, размещая пушку горизонтально и отклоняя электронный пучок на испаряемый материал с помощью электростатических или, что делается чаще всего, электромагнитных систем.

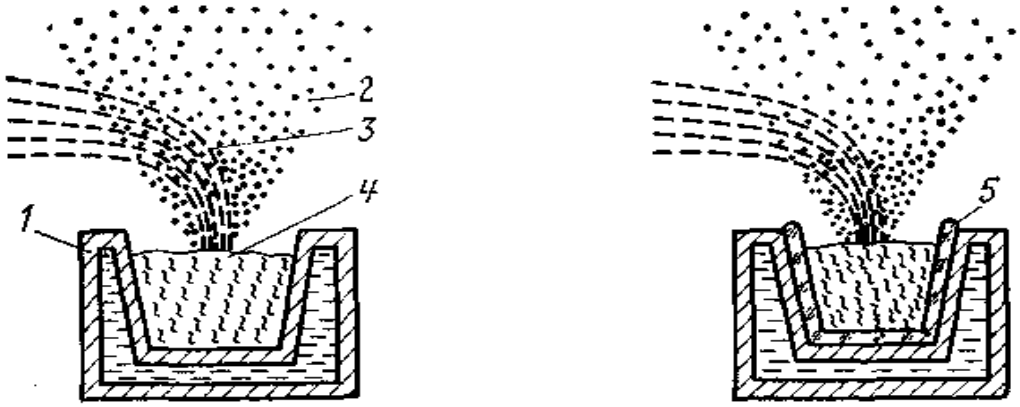
В тигле находится испаряемый материал. Выбор материала и технического решения тигля определяется основными особенностями электронно-лучевого нагрева: передачей энергии поверхности испаряемого материала и высокой удельной поверхностной мощностью.

Материал тигля должен обладать низкой упругостью пара и малой склонностью к реакциям с испаряемым материалом и газом в технологической камере при высокой температуре.

В зависимости от требований конкретной технологии применяют либо водоохлаждаемые, либо так называемые горячие тигли, т. е. тигли с водяным охлаждением и с керамическими внутренними вставками (рис. 3.27). Кроме того, в ряде специальных случаев применяют бестигельное испарение.

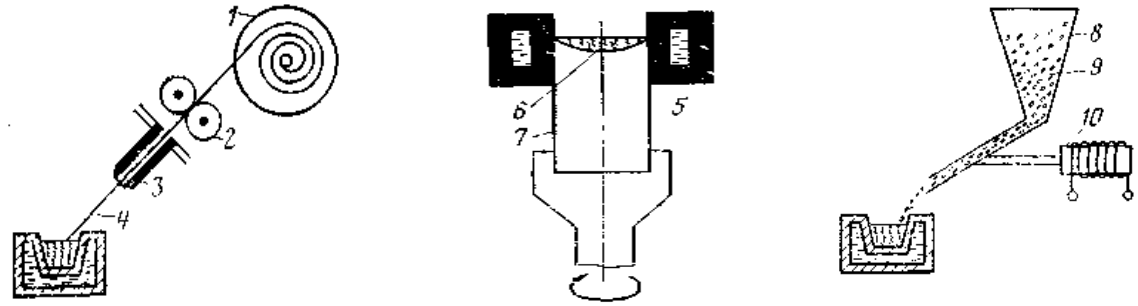
Для того чтобы в течение длительного времени поддерживать условия нанесения покрытия неизменными, во время работы испарителя необходимо пополнять запас испаряемого материала в тигле. Подпитка тигля особенно нужна тогда, когда устройство работает с высокими скоростями испарения и когда за время одного рабочего цикла испаряется очень большое количество материала. Получение слоев из сплавов возможно только при непрерывной подпитке тигля, которая обеспечивает постоянство состава потока.

В зависимости от рода подаваемого материала форма его может быть различной (проволока, штабики, гранулы и т. д.). На рис. 3.28 показаны различные устройства подпитки.



а) *б*)

Рис. 3.27. Типы тиглей электронно-лучевых испарителей: *а*) - медный водоохлаждаемый; *б*) - «горячий»; 1 - медный водоохлаждаемый тигель; 2 - поток пара; 3 - электронный пучок; 4 - испаряемый материал; 5 - тигельная вставка



а) *б*) *в*)

Рис. 4.28. Принципы подачи испаряемого материала в тигель: *а*) - подача проволоки; *б*) - подача штабика; *в*) - подача порциями, например, с помощью вибропитателя; 1 - магазин с бухтой проволоки 4; 2 - подающие ролики; 3 - направляющее сопло; 5 - водоохлаждаемый тигель; 6 - расплав; 7 - испаряемый материал в форме стержня; 8 - бункер питателя с материалом 9 в виде гранул; 10 - вибратор

Толщина напыляемой пленки

Ожидаемое распределение толщины напыляемой пленки вдоль ее поверхности можно оценить, если известно пространственное распределение плотности потока пара, исходящего из испарителя. Для точечного испарителя распределение плотности пара по углам вылета изотропно: $\Phi(\theta)=const$. Такое приближение, однако, справедливо только при бестигельном испарении из расплавленной капли. Больший интерес представляет характер распределения $\Phi(\theta)$ для пара, испускаемого плоским элементом поверхности, которое, как известно, подчиняется закону $\Phi(\theta) = \Phi_0 \cos\theta$ (θ - угол, отсчитываемый от нормали к поверхности). Если на расстоянии R_f от источника параллельно

его поверхности поместить плоскую подложку (рис. 3.29), то, зная $\Phi(\theta)$, можно рассчитать толщину наносимого слоя в любой выбранной точке.

Действительно, в плоскости подложки плотность потока пара, убывающая при удалении от испарителя обратно пропорционально квадрату расстояния, составляет $\Phi(\theta)\cos^2\theta / R_f^2$ Так как этот поток падает на подложку под углом θ, то на расстоянии r_f от нормали к испарителю толщина пленки

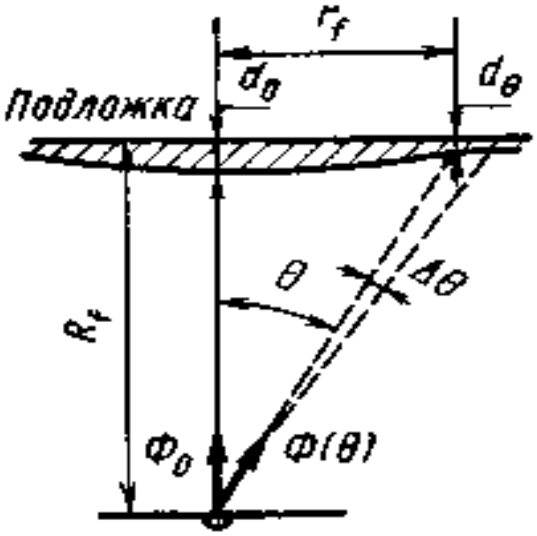


Рис. 3.29. К определению толщины слоя по угловому распределению плотности потока пара

$$d_\theta = d_0 \frac{\Phi(\theta)}{\Phi_0}\cos^3\theta = d_0(\cos\theta)^{m+3} = \frac{d_0}{\left[1+(r_f/R_f)^2\right]^{(m+3)/2}}, \tag{3.28}$$

где d_θ и d_0 – толщина пленки при $\theta = \mathrm{arctg}(r_f/R_f)$ и при $\theta = 0$ соответственно. Согласно формуле (3.28) относительное изменение толщины вдоль слоя тем больше, чем больше показатель степени m, а следовательно, и удельная мощность электронного пучка:

$$\Delta d_\theta / d_\theta = (m+3)\mathrm{tg}\theta\Delta\theta. \tag{3.29}$$

При заданных требованиях к однородности толщины слоя формула (3.29) определяет максимально допустимый угловой размер подложки θ_{MAX}.

Чтобы получать при термическом испарении однородные по толщине пленки большой площади, можно использовать, например, развертку электронного пучка по поверхности широкого тигля или непрерывно перемещать подложку относительно испарителя.

Баланс мощности и тепловой КПД

Для того чтобы получить в электронном пучке мощность P_0, потребляемая мощность оборудования P должна быть больше нее на сумму потерь мощности во вторичных источниках питания и электронно-оптических узлах ΣP_e:

$$P_0 = P - \Sigma P_e . \qquad (3.30)$$

В испаряемом материале в теплоту преобразуется лишь часть мощности пучка P_0, поскольку пучок на своем пути до материала теряет часть своей мощности при рассеянии в газе и облаке пара, а при встрече с материалом - вследствие различных вторичных эффектов ΣP_f. Мощность, преобразуемая в теплоту:

$$P_q = P_0 - \Sigma P_f . \qquad (3.31)$$

Потери мощности при испарении происходят за счет рассеяния электронов, а при высоком давлении пара - за счет взаимодействия с облаком пара.

При испарении, например, алюминия, из керамического тигля и при условии, что подложки достигает только около 40 % испаренного материала, общий эффективный КПД равен 0,2 %. Из мощности электронного пучка только 38-40 % расходуется на осаждение алюминия, остальная часть - на следующие процессы: рассеяние электронов остаточными газами на стенки камеры - 14-16 %; отражение электронов на стенки камеры - 8-10 %, тепловое излучение на стенки камеры – 3-4 %, отвод теплоты стенкой тигля - 4-6 %; рассеяние пара в камере - 21-23 %; возбуждение рентгеновского излучения - 1 %.

Вследствие тепловых потерь ΣP_w в расплаве из мощности, преобразовавшейся в теплоту P_q, лишь часть P_V является полезной, т.е. расходуется на испарение материала. Из тепловых потерь расплава наиболее существенны потери мощности на излучение P_S и теплопроводность P_λ. Таким образом, полезная мощность

$$P_V = P_q - \Sigma P_w = P_q - P_S - P_\lambda. \qquad (3.32)$$

Если для упрощения принять, что температура T одинакова по всей поверхности, что излучающая поверхность и поверхность испарения совпадают, что распределение температур, определяющее теплопроводность, постоянно, а удельные скрытые теплоты не зависят от температуры, то полезную мощность можно вычислить с достаточной точностью по формуле

$$P_V = 4{,}4\cdot10^{-4}\{F[c(T - T_0) + q_S + q_V]\}\alpha\sqrt{\frac{M}{T}}, \qquad (3.33)$$

где F - площадь поверхности испарения, см^2; c - удельная теплоемкость, Дж / (г·К); T и T_0 - соответственно температура испарения и начальная температура вещества, К; q_S и q_V - удельная скрытая теплота соответственно плавления и испарения, Дж/г; α - коэффициент испарения; M - массовое число испаряемого вещества, а.е.м.

Скорость испарения

Скорость испарения определяется уравнением Лэнгмюра. Поскольку скорость испарения экспоненциально зависит от температуры, с увеличением удельной поверхностной мощности на поверхности испарения скорость испарения растет.

При оптимальной фокусировке скорость испарения возрастает с мощностью электронного пучка до тех пор, пока не начинают проявляться потери в облаке пара. Однако в большинстве случаев приходится считаться с иного рода ограничением, возникающим из-за искривления поверхности жидкой ванны и ее разбрызгиваниям. Причиной этих эффектов является реактивное действие струи пара, т. е. действие давления пара на жидкую ванну (рис. 3.30). С возрастанием удельной поверхностной мощности, т. е. с возрастанием давления пара, увеличивается глубина h мениска на поверхности расплава.

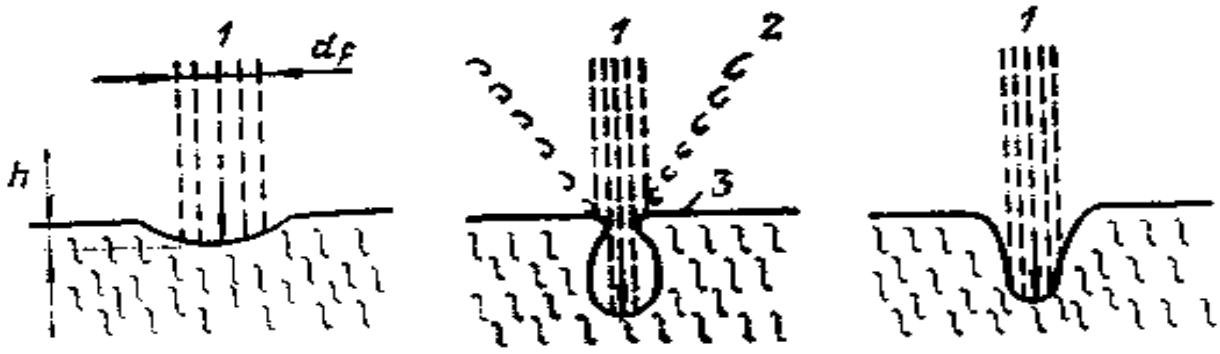


Рис. 3.30. Деформация поверхности расплава и образование брызг при увеличении удельной поверхностной мощности пучка: h - глубина мениска; d_F - диаметр пучка; 1 - пучок; 2 - брызги; 3 - поверхность ванночки расплава

При большой глубине мениска скорость испарения может снизиться вследствие так называемого «эффекта дымовой трубы». Если углубление, заполненное паром, время от времени закрывается, то происходит разбрызгивание расплава, которое при нанесении покрытий в большинстве случаев не-

допустимо. Местные различия в давлении пара и движение расплава способствуют разбрызгиванию. Склонность к разбрызгиванию зависит не только от удельной поверхностной мощности, но также от чистоты испаряемого материала и градиентов температуры в тигле. У многих материалов начало разбрызгивания наблюдалось при удельной поверхностной мощности 10^8 – 10^9 Вт/м^2.

Если пучок с большой удельной поверхностной мощностью развертывают по определенной программе по поверхности испарения, то вместе с ним перемещается и волна давления пара, которая может привести к волнообразным движениям поверхности ванны.

Независимо от мощности установки, т. е. во всем диапазоне мощностей от 3 до 250 кВт, для целей испарения применяют удельные поверхностные мощности 10^8 - 10^9 Вт/м^2. В испарителях с плосколучевыми пушками в настоящее время используют их значения до $5 \cdot 10^8$ Вт/м^2, в испарителях с аксиальными пушками - верхнюю границу указанного диапазона.

В табл. 3.3 приведены максимальные скорости испарения различных материалов для испарителя мощностью 5 кВт.

Таблица 3.3

Скорость испарения
(диаметр тигля 20 мм, глубина 15мм, тигель - медный водоохлаждаемый)

Испаряемый материал	Скорость испарения, г/мин
Сталь 30 % Co	2,1
Сплав 20 % Cr – 80 % Ni	1,8
Mo	1,5
W	1,4
Al	0,4

Режимы

Электронно-лучевое испарение занимает ведущее место по распространенности среди способов электронно-лучевой технологии.

Внедрение электронно-лучевого испарения в технику нанесения покрытий в новых отраслях промышленности произошло в первую очередь благодаря тому, что были разработаны испарители большой мощности. Поскольку вакуумное нанесение покрытий удовлетворяет таким требованиям, как экономное расходование материалов за счет малой толщины пленок, возможность получения композиций с новыми свойствами и поддержание чистоты окружающей среды, следует ожидать, что это направление будет и впредь развиваться. Традиционные испарители будут все больше вытеснять-

ся электронно-лучевыми, построенными на основе простых, надежных и экономичных устройств.

Общее направление дальнейшего развития техники нанесения покрытий состоит в комбинировании электронно-лучевого испарения с другими способами, например с распылением, для того чтобы оптимально решать сложные задачи по нанесению покрытий.

3.2.4. Электронно-лучевая размерная обработка

Размерная обработка производится с помощью остросфокусированного потока электронов с плотностями мощности более $5 \cdot 10^8$ Вт/см^2. Кинетическую энергию электронов пучка, превращающуюся при встрече пучка с компактным телом в тепло, можно использовать для изменения химического состава или структуры материала в бомбардируемой зоне, обусловленных термическими процессами.

Интенсивное испарение материалов из зоны воздействия пучка с минимальным образованием жидкой фазы позволяет удалять материал с получением всевозможных поверхностей. Примерами такой обработки могут служить получение отверстий или пазов с заданным профилем, бесконтактная резка дефицитных и труднообрабатываемых материалов, фрезерование, полировка и т.п. Главная особенность электронно-лучевой обработки заключается в том, что ее ход и результаты определяются не механическими свойствами материала, как при традиционных способах, а его теплофизическими свойствами. Это изменяет характер обработки, а иногда (например, для хрупких, пластичных и твердых материалов) расширяет ее технологические возможности.

Размерная обработка массивных изделий
Процесс обработки

В основе размерной обработки лежат процессы уноса материала в результате испарения, взрывообразного выброса расплава или квазисублимации. Вместе с тем для обработки материалов, обладающих специфическими свойствами (сублимирующихся, разлагающихся при нагреве и т. п.), можно использовать их непосредственный переход из твердой фазы в газообразную или удаление продуктов их разложения при последующем травлении в агрессивной среде.

В общем случае под обработкой массивных тел понимают такие разновидности обработки, при которых глубина обработки превышает глубину проникновения электронов пучка в данный материал. Необходимо учитывать следующее:

- максимум удельной поглощаемой мощности находится в центре фокусного пятна под поверхностью мишени на глубине, равной 0,33 глубины

проникновения электронного пучка, и приблизительно вдвое превышает удельную поглощаемую мощность на поверхности заготовки;

- с удалением от центра фокусного пятна, в котором имеет место максимум, удельная поглощаемая мощность монотонно уменьшается, стремясь к нулю;

- для относительных поверхностных мощностей, превышающих 0,5 максимальных, поверхности равных значений являются замкнутыми сферами, целиком расположенными под поверхностью мишени.

Все процессы, лежащие в основе методов размерной обработки, интенсивно протекают лишь при нагреве до температур, превышающих некоторое пороговое значение. Поэтому геометрия обработки определяется в основном той граничной поверхностью в объеме образца, на которой достигнута пороговая температура. Чтобы локализовать эту область, необходимо свести к минимуму распространение теплоты за ее пределы, т. е. обеспечить малую продолжительность воздействия электронного пучка в каждой точке.

На рис. 3.31 показано влияние мощности электронного пучка на ход размерной обработки.

При отношениях глубины канала к его диаметру, равных 3 - 5 и более, доля КПД мощности практически достигает единицы (рис. 3.31а). С возрастанием апертуры пучка и расстояния между его фокусом и дном канала основное поглощение мощности все более перемещается на стенки канала (рис. 3.31б). Значительная часть периферийных электронов, попадая на стенку канала под очень небольшими углами к ее поверхности, отражается от нее и вносит свой вклад в энергию, поглощаемую дном канала. Пар, образующийся в канале при обработке, может существенно увеличить рассеяние электронного пучка и тем самым снизить удельную поверхностную мощность пучка у дна канала, что повышает энергетическую нагрузку на его стенки (рис. 3.31г). Положительные ионы, образовавшиеся в результате взаимодействия пучка с паром, компенсируют, а иногда и перекомпенсируют пространственный заряд пучка. Это может, по крайней мере, при очень малой апертуре пучка, оказывать на пучок фокусирующее воздействие (рис. 3.31д). Дополнительное рассеяние и поглощение энергии пучка могут вызывать также брызги материала в канале (рис. 3.31е).

Термическая размерная обработка сопровождается рядом эффектов, которые представлены в табл. 3.4.

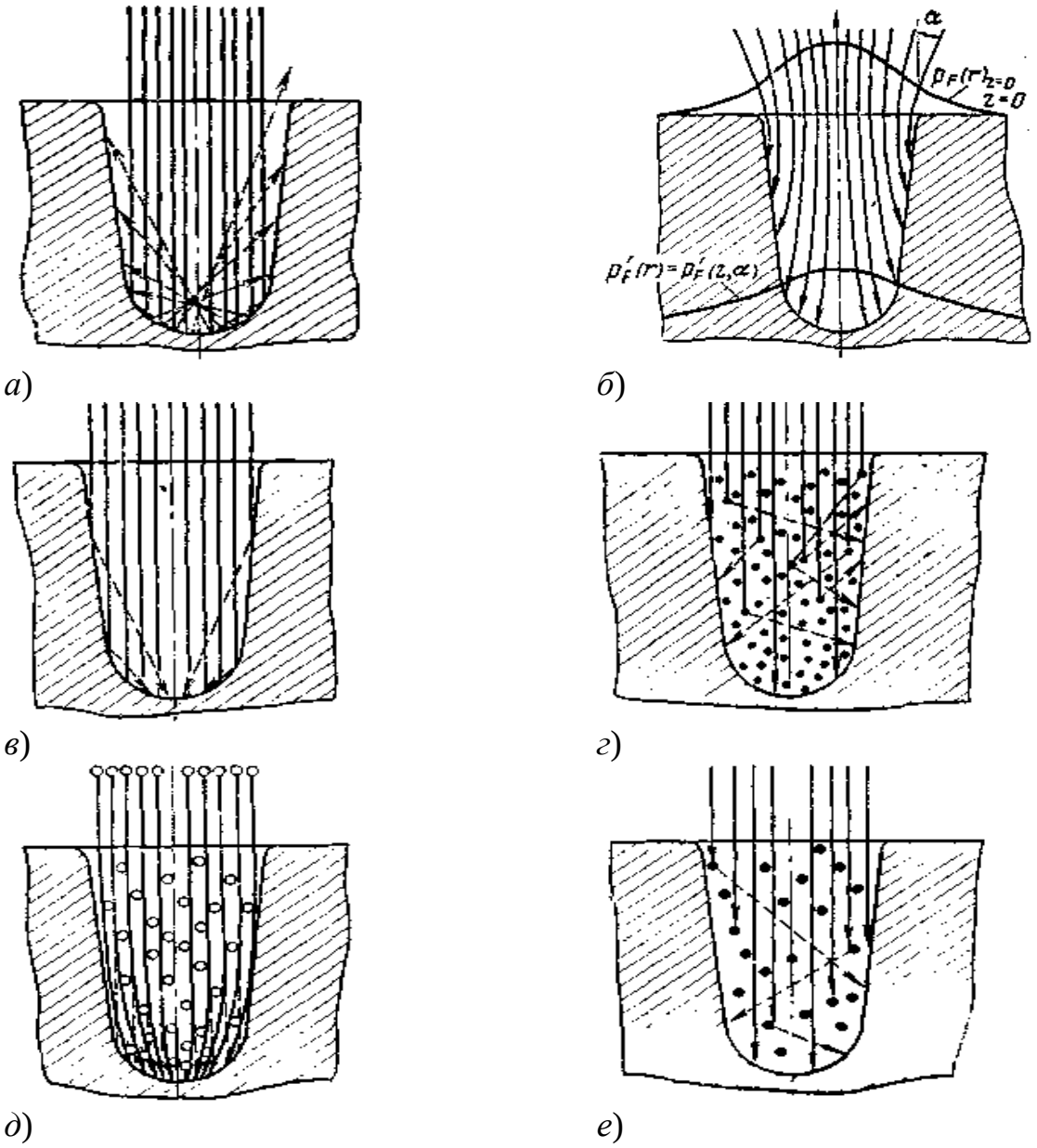


Рис. 3.31. Влияние удельной поверхностной мощности на поверхности обрабатываемого изделия на ход размерной термической обработки с уносом материала: а) - уменьшение потерь с отраженными электронами при возрастании глубины канала; б) - возрастание тепловой нагрузки на стенки и ее снижение на дно канала при появлении апертуры пучка α (pF, p'F - кривые распределения удельной поверхностной мощности на поверхности заготовки и у края канала); в) - повышение удельной поверхностной мощности на дне канала при высоком коэффициенте отражения периферийных частей пучка; г) - повышение нагрузки на стенки канала и ее снижение на дно канала вследствие повышенного рассеяния в парах материала; д) - фокусирующее действие положительного пространственного заряда, образовавшегося вследствие ионизации металлического пара; е) - поглощение и рассеяние энергии вследствие разбрызгивания материала

Таблица 3.4

Процессы размерной обработки

Технологический процесс	Физический эффект
Вынос материала (выполнение отверстий, пазов, гравирование, резка)	Сублимация
	Испарение
	Разложение твердого материала на летучие компоненты
	Разложение с образованием хотя бы одной твердой компоненты
Дробление материалов	Ударные волны
Нанесение рисок оплавлением	Плавление

Режимы обработки

Результаты обработки существенным образом зависят от мощности, поглощаемой определенным элементом объема или подведенной к этому объему путем теплопроводности. Вследствие порогового характера таких явлений, как плавление, сублимация и им подобные, геометрия результатов обработки в основном определяется такой граничной поверхностью, в точках которой достигнутые температура или плотность энергии в точности равны необходимым для данного эффекта. Так как для разных материалов тот или иной эффект требует различных удельных объемных расходов энергии, параметры электронных пушек необходимо выбирать так, чтобы они удовлетворяли требованиям вполне конкретной задачи обработки.

Следовательно, пригодность того или иного материала для размерной электронно-лучевой обработки и требования к электронной пушке определяются в конечном счете теплофизическими свойствами материала: температурой его плавления, удельной теплоемкостью, теплопроводностью и плотностью. Механические свойства материала (твердость, вязкость и т. д.) в противоположность этому не оказывают на сам эффект обработки никакого влияния.

В связи с этим электронный луч нашел применение в первую очередь для размерной обработки твердых материалов – алмаза, кварца, керамики, кристаллов кремния и германия; материалов, которые трудно обрабатывать другими методами.

На практике для размерной электронно-лучевой обработки используют три режима.

1. Моноимпульсный режим, когда обработка ведется одиночным импульсом, т. е. отверстие получают за время действия только одного импульса.

2. Многоимпульсный режим, когда отверстие получают воздействием на заданное место заготовки несколькими импульсами.

3. Режим обработки с перемещением электронного луча по заготовке с заданной скоростью. Последний режим реально осуществим в основном для прямолинейных профилей получаемых деталей.

Образование полостей с помощью электронно-лучевой размерной обработки обычно происходит в многоимпульсном режиме (время импульса 10^{-7} - 10^{-3} с). В периоды пауз между импульсами материал в зоне обработки успевает охладиться до температуры, близкой к начальной температуре заготовки, и общий нагрев заготовки невелик. С увеличением числа импульсов глубина обрабатываемой полости растет по логарифмической зависимости. При очень большом числе импульсов скорость обработки резко уменьшается, поэтому на практике размерную электронно-лучевую обработку обычно ведут на глубину не более 15 ... 20 мм.

Диаметр получаемого отверстия и длительность импульса тока электронного луча связаны эмпирической зависимостью

$$d_{ОТВ} \approx K \ln \tau_И, \qquad (3.24)$$

где К – коэффициент, зависящий от свойств обрабатываемого материала; $\tau_И$ – длительность импульса. Диаметр $d_{ОТВ}$ зависит также от числа импульсов.

Помимо управления во времени подводом энергии к объекту необходимо управлять пучком и деталью в пространстве, перемещая деталь относительно неподвижного пучка или пучок относительно неподвижной детали. Эта необходимость возникает прежде всего тогда, когда в направлении, перпендикулярном оси пучка, подлежащая обработке структура по своим размерам превышает диаметр фокусного пятна пучка. Обычно зона перемещения луча ограничивается размерами 10 × 10 мм. При необходимости обработки большей поверхности используют дополнительное механическое перемещение заготовки.

Точность размеров и качество поверхности при размерной обработке зависят от рода материала, вида обработки, параметров процесса и характеристик электронной пушки. Погрешность размеров при этом не превышает ±5 мкм, а шероховатость поверхности R_Z = 5 мм.

При жестких режимах электронно-лучевой обработки, когда в зоне воздействия луча возникают значительные градиенты температур, достигающие 10^8 К/м, в хрупких материалах образуются микротрещины. В этом случае обычно или уменьшают удельную поверхностную мощность луча, или подогревают заготовку перед обработкой.

На рис. 3.32. приведены значения энергии, необходимой для уноса единицы объема материала при выполнении отверстий.

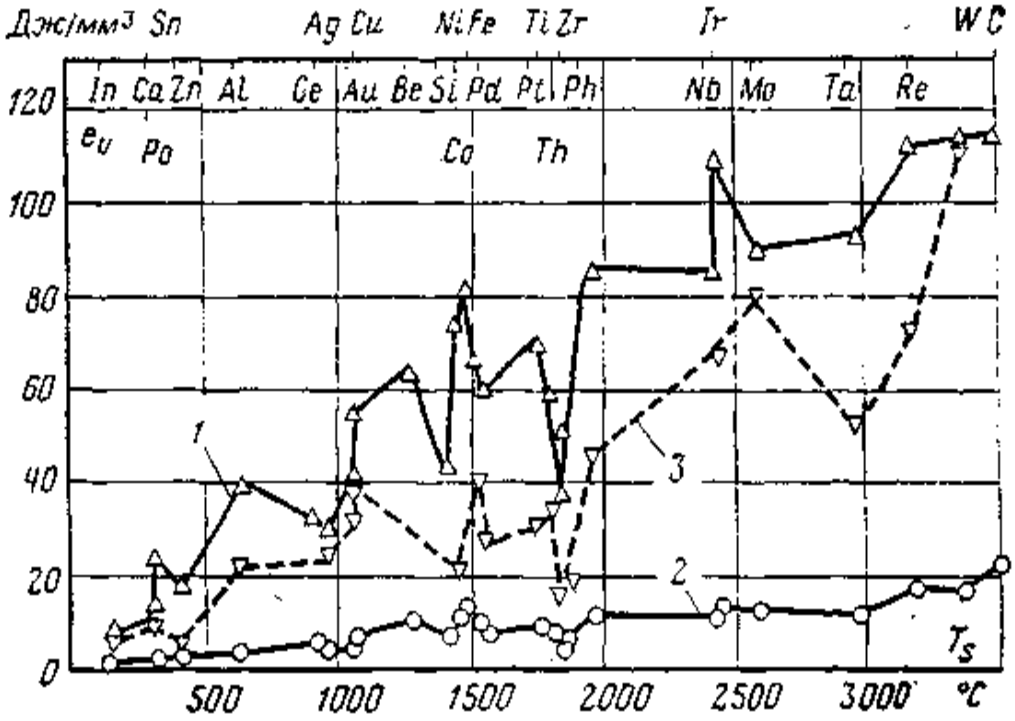


Рис. 3.32. График зависимости энергии, необходимой для плавления, испарения и уноса при электронно-лучевой обработке, от температуры плавления материала: 1 - испарение; 2 - планка; 3 - унос при электронно-лучевой обработке

Эти цифры сопоставлены с расходами энергии на плавление и испарение единицы объема тех же материалов и расположены по температурам их плавления. На рисунке видно, что с возрастанием температуры плавления растут как удельный расход энергии на расплавление и испарение, так и расход энергии на унос единицы объема материала. В соответствии с изложенными выше соображениями о природе процесса уноса как взрывообразного испарения, при котором подавляющая часть уносимого материала выбрасывается из зоны обработки в расплавленном виде, значения энергии, необходимой для уноса, лежат между ее значениями, необходимыми для расплавления и испарения. Однако приведенные абсолютные энергии уноса неоднозначны, так как они зависят и от выбранных параметров обработки, и от удельной поверхностной мощности, которую способна обеспечить имеющаяся в наличии электронная пушка. При современном состоянии технических средств энергия уноса не может быть меньше 130 % энергии на расплавление, этому соответствует наличие приблизительно 5 % паровой фазы в удаляемом материале.

При уносе материала испарением погрешности обработки могут появиться за счет неполного уноса или возврата жидкого материала в зону обработки. Вместе с нарушениями равномерности энергетического воздействия, обусловленными характером процесса, эти погрешности определяют качество обработанной поверхности.

Область применения

Размерная обработка имеет широкую область применения благодаря своим возможностям. Промышленное внедрение этого вида обработки определяется в первую очередь исходя из экономических оценок.

Электронные пушки и источники их питания дороги. Но и производительность электронно-лучевой обработки, как правило, высока и зачастую намного превосходит производительность других способов микрообработки. В полной мере это достоинство можно использовать, применяя устройства-автоматы, специально предназначенные для конкретной цели обработки. Такие автоматы, кроме собственно устройства электронно-лучевой обработки, включают в себя приспособления для транспортировки, шлюзования заготовок и других манипуляций с ними, соответствующие задаче обработки и типу изделий, а также устройства программированного управления пучком во времени и пространстве, координации работы узлов перемещения, обработки деталей и блоков управления применительно к специфике обработки.

Достаточным основанием для такого применения может служить только необходимость обработки больших количеств заготовок со схожими параметрами. Число же типов структур, получаемых в результате обработки, напротив, почти не ограничено благодаря широким возможностям программирования процесса.

3.2.5. Электронно-лучевая термообработка

Однородность химического состава, твердость и прочность материала тесно связаны с его кристаллическим строением, которое зависит от способа получения материалов и условий кристаллизации. Напряжения, появляющиеся в детали после ее изготовления, сказываются при эксплуатации (часто прочность детали снижается по сравнению с расчетной). Во многих случаях локальные переплав или закалка участков деталей с помощью электронных пучков позволяют получить значительное улучшение свойств материала и повысить тем самым эксплуатационные свойства детали.

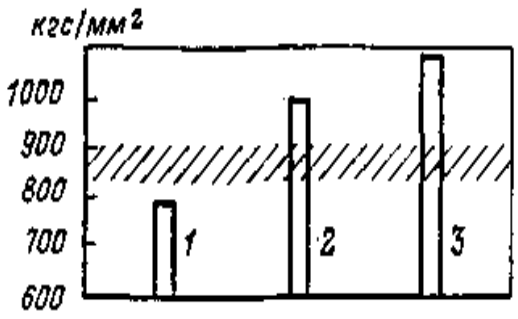
Электронно-лучевая обработка позволяет получить высокую удельную поверхностную мощность, а следовательно, и высокие скорости роста температуры в зоне действия пучка, а также точное дозирование энергии в пространстве и времени, приспосабливаемость параметров обработки к конкретным условиям и задачам.

При обработке материала методом локального расплавления кратковременно нагреваются до температуры выше точки плавления очень малые участки. Последующее охлаждение за счет отдачи теплоты посредством теплопроводности в соседние, оставшиеся холодными, области приводит к чрезвычайно высоким скоростям кристаллизации. Образуется структура, в значительной степени совершенно отличная от тех, которые получаются при нор-

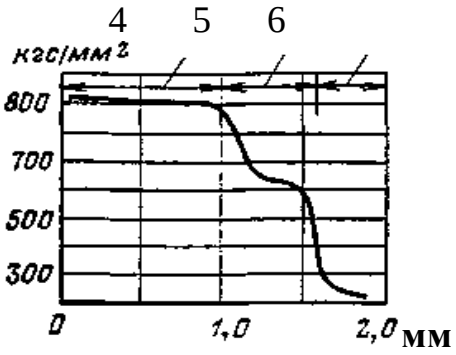
мальных процессах кристаллизации, существенно расширяются границы растворимости для твердых растворов.

Быстрое нарастание температуры и чрезвычайно короткое по сравнению с другими способами закалки время пребывания локальной зоны в нагретом состоянии у закаливаемых сталей приводят к образованию особо мелкозернистого аустенита и тем самым - мартенсита с очень высокой твердостью. Эффект закалки имеет место и при облагораживающем переплаве закаливаемых материалов. При закалке без плавления время нагревания составляет около 10^{-5}…10^{-1} с, при облагораживающем переплаве – 10^{-3}…1,0 с.

При переплаве быстрорежущей стали с последующим отжигом растворяются карбидные включения, возникшие при вышивке такой стали, и образуется очень мелкозернистая дендритная структура. В результате твердость повышается на 20 % по сравнению с той, которую можно достичь при обычной технологии (рис. 3.34а). Подобный эффект имеет место и при облагораживающем переплаве других сталей.



а)



б)

Рис. 3.34. Влияние облагораживающего переплава на твердость материалов:

а) для стали S10-4-3-10: 1 - только переплав; 2 - переплав и отжиг при 500 °С в течение 1 ч; 3 - переплав и двукратный отжиг по 1 ч при 500 °С; зона твердости, достижимая с помощью традиционных способов, заштрихована; б) для серого чугуна: 4 – переплавочная зона; 5 – зона термического воздействия; 6 – основная структура

Чрезвычайно резко выражен эффект облагораживания при переплаве серого чугуна, когда происходит наложение отбеливающего застывания и образование мартенсита при быстром охлаждении. При этом достигается повышение твердости до 900 кгс/мм^2 (по Виккерсу), которую невозможно получить другими, обычными, способами (рис. 3.34б).

Закалка без плавления режущего инструмента также позволяет повысить твердость, а ресурс работы инструмента при этом возрос вдвое по сравнению с инструментом, закаленным обычными способами.

Кроме того, при обработке электронным лучом морфология интерметаллических соединений может измениться таким образом, что первоначально хрупкие материалы становятся пластичными.

Для облагораживающего переплава и для закалки можно использовать электронно-лучевые сварочные машины с мощностью пучков до нескольких киловатт и удельной поверхностной мощностью 10^4 - 10^6 Вт/см^2, но их системы управления пучком и отклонения пучка следует приспособить к решению данной специфической задачи. Обрабатывать можно структуры точечной, линейной формы и в форме площадок. Необходимые скорости отклонения пучка лежат в пределах 0,02 - 1 м/с при облагораживающем переплаве и до 10 м/с - при закалке. Импульсный режим пучка можно использовать в первую очередь для точечной обработки. При определении пространственных и временных характеристик процесса обработки следует учитывать условия распространения тепла в детали.

Термообработка металлических лент

Термообработка листового материала (фольга) или кремниевых пластин может оказаться необходимой для получения чистой, без адсорбированных пленок, поверхности и разогрева до температуры, необходимой для технологического процесса нанесения покрытия путем конденсации, повышения пластичности материала или его очистки.

При термообработке с целью поверхностного обезуглероживания требуется разогреть поверхность материала, по крайней мере, до 200 °С. При таких температурах с поверхности удаляются адсорбированные на ней газы и пары, в особенности водяной пар. Удаление пленки протекает тем быстрее, чем выше температура поверхности. Количество адсорбированных на единице площади поверхности газов зависит главным образом от состояния поверхности и от предшествовавшей обработки.

С увеличением удельной поверхностной мощности пучка при соответствующем уменьшении времени его воздействия на материал достигается нагрев поверхности ленты до температур, желательных для быстрого удаления пленки. В этом случае относительно высокий градиент температуры вызывает эффект дополнительной очистки, при котором остатки окислов, имевшиеся после предварительной очистки, отрываются от поверхности и удаляются с нее вместе с прилипшими к ним частицами пыли. Ленту нагревают, проводя пучок по направлениям, перпендикулярным к направлению ее движения.

Так как при промышленных масштабах термообработки расходы энергии весьма велики, большое значение имеет информация об эффективности использования энергии. На рис. 3.35 представлена диаграмма баланса мощности на примере нагрева стальной ленты. Как видно, от 45 до 55 % потребляемой электрической мощности, т. е. около 60 % мощности электронного пучка, воспринимаются лентой в виде тепла. Наибольшая часть потерь мощности пучка обусловлена отражением электронов от поверхности ленты.

Несмотря на относительно невысокий энергетический КПД (около 50 %), который лежит между значениями КПД непрерывных и периодических

способов обычной термообработки в вакууме, электронно-лучевую обработку благодаря ее технологическим достоинствам можно рекомендовать к применению в первую очередь для предварительной термообработки лент в установках вакуумного напыления.

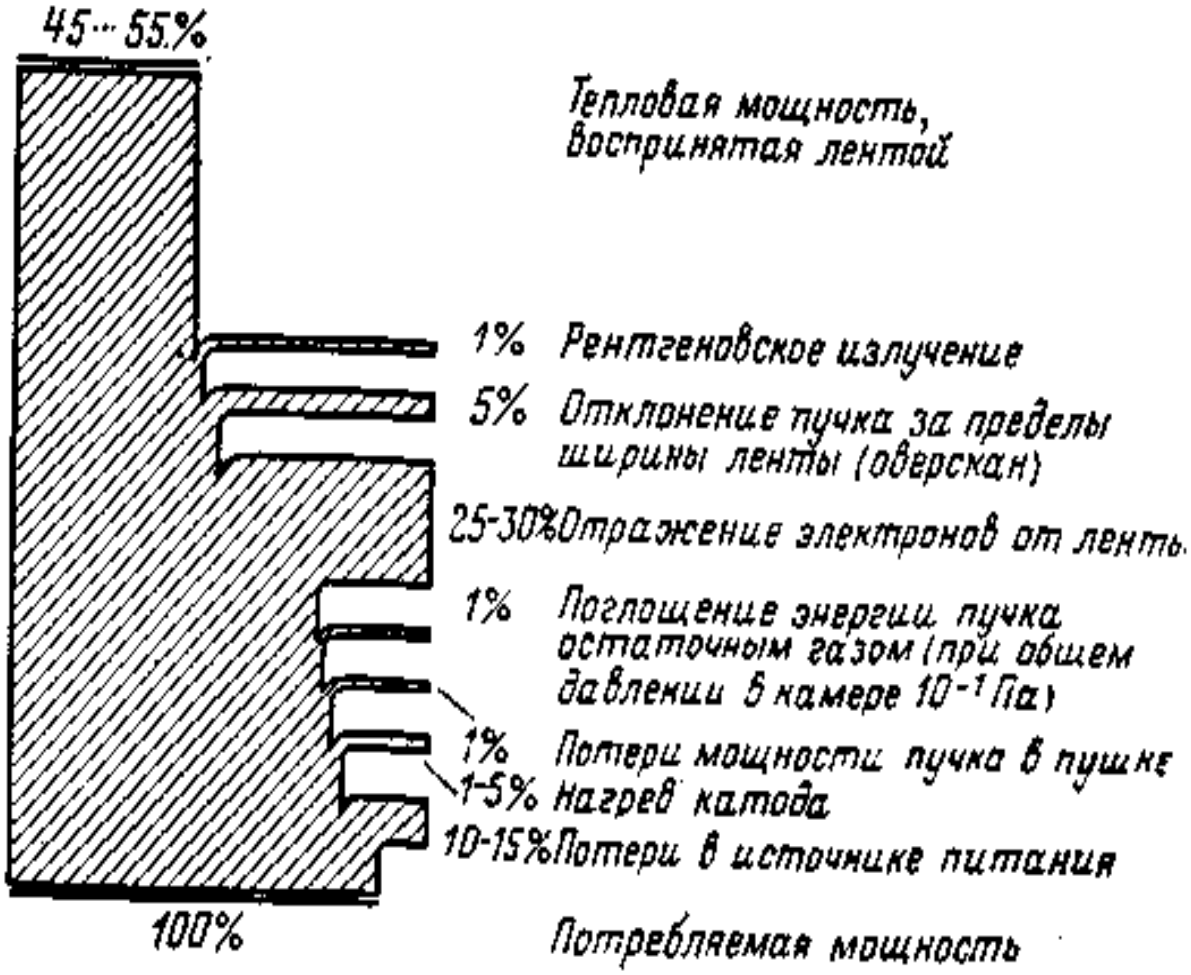


Рис. 3.35. Баланс мощности при термообработке стальных лент электронным пучком

4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СОВРЕМЕННЫХ АВИАЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

4.1. Общие сведения

Условия эксплуатации авиационной и космической техники обусловливают крайне жесткие требования к материалам, которые должны обеспечить прочность конструкции при минимальных удельной массе, габаритах и расходе топлива; надежность и длительный ресурс при воздействии переменных и значительных силовых нагрузок, чередования повышенных и пониженных (до -253°С) температур, коррозионно-активных сред, корпускулярных, электромагнитных, рентгеновских излучений и др.

При разработке новых материалов делается упор на такие параметры свойств, объединенные понятием «качество авиационных материалов», как: весовая эффективность (отношение прочности к удельной массе); надежность и ресурс, характеризующиеся, в первую очередь, показателями выносливости, сопротивлением малоцикловой усталости (МЦУ), статической (K_{1c}, K_c и др.) и циклической трещиностойкостью ($\sigma_{кр}$, K_{Iscc} и др.); контролепригодность, технологичность и ремонтоспособность.

От качества материалов, применяемых в летательных аппаратах (ЛА), в существенной мере зависит конкурентоспособность техники. Для военной техники – это обеспечение требуемых тактико-технических характеристик (ТТХ) и других параметров: дальность, полезная нагрузка, скорость, маневренность, точность, всепогодность, обеспеченность производства отечественным сырьем, для гражданской – надежность, пожаробезопасность, комфортность, экологичность и др., при минимизации стоимости затрат на разработку, освоение и эксплуатацию. Очевидно, что подавляющая часть материалов, разработанных по столь высоким меркам, может быть использована и успешно применяется в других отраслях машиностроения и народного хозяйства: судостроении, атомной промышленности, транспортном, химическом, энергетическом машиностроении, медицине и др.

Применение перспективных конструкционных материалов в изделиях авиационной отрасли (планер самолетов и вертолетов) должно обеспечить:

- повышение коммерческого срока эксплуатации с 20 до 25–30 тыс. ч;
- повышение ресурса с 15–20 до 40 тыс. ч;
- повышение межремонтного срока с 6–8 до 10–12 лет;
- снижение массы конструкций на 20–25%.

4.2. Материалы для планера самолетов и вертолетов

Материальный облик летательных аппаратов определяют более 120 конструкционных и функциональных материалов.

Благодаря применению новых алюминиевых сплавов, полимерных композиционных материалов, титановых сплавов, конструкционных сталей, комплекса неметаллических материалов – лакокрасочных покрытий, клеев, герметиков – обеспечено повышение срока эксплуатации изделий (в 1,5–2 раза), ресурса (в 1,5–2 раза), пожаробезопасности интерьера, межремонтного срока при эксплуатации.

4.2.1. Алюминиевые сплавы

Основным конструкционным материалом для планера остаются алюминиевые сплавы. В 2000–2015 гг. их доля в структуре применения сохраняется на уровне 50%.

Задача повышения надежности, улучшения характеристик трещиностойкости, повышения усталостных свойств сплавов для фюзеляжа, крыла и силового набора решалась путем значительного повышения чистоты сплавов (уменьшение содержания примесей кремния и железа, количества избыточных фаз), разработки новых режимов термообработки, улучшения качества полуфабрикатов. Сплав 1163-АТ системы Al–Cu–Mg не уступает по свойствам американскому сплаву 2524.

Высокопрочный сплав системы 1933 в виде ковочных и прессованных полуфабрикатов, обладающий уникальным сочетанием прочности ($\sigma_в$=450–500 МПа) и вязкости разрушения, превосходит по этим показателям сплавы США (7175 и 7050).

Проведенные в последние годы исследования по оптимизации высоколегированной композиции системы Al–Zn–Mg–Cu с малой добавкой Zr (1965 – сплав В96Ц3) позволили обеспечить в новых состояниях Т12, Т2 на 10–20% более высокую прочность (по сравнению со сплавом В95п.ч., В95о.ч.). Сплав имеет благоприятное сочетание сверхвысокой прочности и повышенной коррозионной стойкости при хорошем уровне вязкости разрушения и технологической пластичности. Сплав В96Ц3 (в виде длинномерных катаных и прессованных полуфабрикатов) предназначен для элементов, работающих преимущественно на сжатие в полете (верхние обшивки крыла и др.).

Перспективный путь повышения весовой эффективности – совершенствование слоистых металлокомпозитов типа АЛОР и СИАЛ. По сравнению с алюминиевыми сплавами СИАЛ обладает более высокой статической прочностью (в 1,5–2 раза), чрезвычайно низкой скоростью роста усталостной трещины (в 10–20 раз), пониженной на 10–17% плотностью и большим сопротивлением усталости (в 1,5–2 раза).

Еще один способ повышения весовой эффективности – уменьшение плотности, который реализуется путем создания рецептур алюминиевых сплавов, легированных литием. Создана серия сплавов средней (1420, 1424, 1441) и высокой прочности (типа 1460). Высокопрочный свариваемый сплав типа 1460 предназначен для эксплуатации в широком интервале темпе-

ратур – от +175 до -253°С; его применение в космических конструкциях взамен сплавов типа АМг6 возможно вследствие существенного повышения прочностных свойств сварных соединений (до 0,94 вместо 0,65 от прочности основного металла) при температурах -253°С, что позволяет снизить массу конструкции (на ~35%).

В области жаропрочных алюминиевых сплавов предстоят работы по уточнению рецептур: например, сплава 1143 системы Al–Cu–Mg–Fe–Ni, в частности содержания Fe, Ni и влияния примесей на длительную прочность на базе не менее 1000 ч при температурах испытания 150 и 175°С; оптимизации интервала легирования, режимов термической обработки, исследованию коррозионной стойкости сплава Д25 (системы Al–Cu–Mn) для собеспечения длительной прочности $\sigma_{10000}^{175°}$=270 МПа; изучению влияния состава сплава 1215 (Al–Cu–Mg–Ge) на кинетику процесса разупрочнения при температурах 150–200°С с выдержкой до 30000–60000 ч; исследованию режимов искусственного старения для промышленных партий полуфабрикатов сплава 1151 (Al–Cu–Mg) повышенной жаропрочности, свариваемости ($\sigma_{15000}^{150°}$- 200 МПа; K_c^y =88,5 МПа√м; $\sigma_{в.св}$=390 МПа) которая может заменить сплавы Д16, Д19, АК4-1ч., АК6, АК8 и 1201 для изготовления обшивки самолета, и особенно греющихся элементов планера (противообледенители, мотогондолы, передняя кромка крыла и т.п.), с целью повышения надежности и ресурса сверхзвуковых самолетов на 10-15%.

Коррозионностойкие высокотехнологические сплавы систем Al–Mg–Si и Al–Zn–Mg – Cu используют для обшивки фюзеляжа гидросамолетов и палубной авиации (АД37), а также в виде штамповок и прессованных полуфабрикатов (В91-Т3) для самолетов морской авиации. Это позволяет увеличить календарный срок службы изделий и их узлов, сократить в 3-3 раза количество ремонтов при эксплуатации морской авиации и снизить трудоемкость изготовления деталей на 10-20%. Алюминиевые сплавы занимают большой объем от всех используемых в авиации материалов. Поэтому им уделяется пристальное внимание.

4.2.2. Высокопрочные титановые сплавы

В области конструкционных, в том числе литейных, титановых сплавов повышение ресурса и надежности будет решаться созданием нового поколения комплексно-легированных сплавов с повышенными характеристиками предела выносливости (на 30%) и трещиностойкости (КСТ – на 200%) при снижении стоимости сплава (на 20-30%) за счет полного перехода на отечественное сырье и недефицитные легирующие компоненты (снижение содержания молибдена и ванадия).

Перспективные сплавы типа ВТ23, ВТ22 за счет комплексного легирования (α+β)-твердых растворов могут упрочняться на различные уровни прочности – от 1100 до 1400 МПа.

Сочетание широкого ассортимента полуфабрикатов и высокой технологичности позволяет изготовлять практически все силовые элементы конструкций ЛА из сплавов ВТ23 и ВТ22 с обеспечением снижения массы конструкций (на 20–30%), стоимости и трудоемкости изготовления.

Создание нового класса конструкционных сплавов с регламентированным типом упрочнения для высоконагруженных деталей при использовании прогрессивных технологических процессов сверхбыстрого охлаждения из жидкой фазы, гранулирования, газостатирования и изотермического прессования должно обеспечить повышение прочностных и ресурсных характеристик на 15–25%.

4.2.3. Конструкционные стали

Стали стабильно применяются в современном самолетостроении, и объем их применения находится на уровне 5–10%. В некоторых самолетах, например, сверхзвуковых истребителях, стали являются профилирующим материалом. Основное назначение сталей – использование их в конструкциях, от которых требуются высокие жесткость, удельная прочность, усталостная долговечность, теплопрочность, коррозионная стойкость и ряд других параметров. Кроме того, как при производстве полуфабрикатов, так и при изготовлении сложных, в том числе сварных, конструкций, для которых сварка должна являться финишной операцией, применение сталей особенно целесообразно из-за их хорошей технологичности.

Благодаря новым разработкам удалось повысить минимальный уровень прочности стали до 1950 МПа при сохранении значений величины K1c. В последнее время созданы новые экономнолегированные высокопрочные конструкционные свариваемые стали ВКС-8 ($\sigma_в$=1800–2000 МПа) и ВКС-9 ($\sigma_в$=1950–2150 МПа), которые по значениям трещиностойкости не уступают стали 30ХГСН2А, а в ряде случаев и превосходят ее.

В области среднелегированных свариваемых сталей для шасси и силовых деталей планера должны быть достигнуты высокие характеристики прочности, вязкости и надежности: $\sigma_в$≈2100–2300 МПа, $\sigma_{0,2}$=1600 МПа, $K_c^у$ ≥62 МПа√м, МЦУ; (при σ_{max}=500 МПа): N=300 циклов.

Для шасси и силовых деталей планера гидросамолетов с целью обеспечения снижения массы узлов, высоких коррозионной стойкости и сопротивления повторным нагрузкам будут разработаны коррозионностойкие высокопрочные свариваемые стали с прочностью $\sigma_в$≈1700–1900 МПа, KCU≥0,7 МДж/м^2, ψ>40% (для сравнения: наиболее прочная сталь этого класса ВКС-43 имеет $\sigma_в$≈1600 МПа, зарубежная АМ-355 - $\sigma_в$≈1500 МПа).

Для получения принципиально новых паяных сотовых конструкций должны быть разработаны свариваемые стали с прочностью $\sigma_в$>1350 МПа; это позволит обеспечить ремонтопригодность теплообменных аппаратов с помощью сварки.

Важным направлением исследований является совершенствование износостойких сталей. В частности, для увеличения (в 1,5–2 раза) ресурса шестерен агрегатов управления будут разработаны износостойкие, не подвергаемые поверхностному упрочнению стали с высокой твердостью (>60 HRC), вязкостью KCU>0,4 МДж/м^2, прочностью $\sigma_{в.изг}$=2500–3000 МПа, теплопрочностью до 500°С.

4.2.4. Полимерные композиционные материалы (ПКМ)

Благодаря существенным преимуществам по удельной прочности и жесткости, исключительному сочетанию конструкционных, теплофизических, специальных свойств ПМК все в большем объеме применяются в конструкциях ЛА. Если в конструкции планера и в интерьере самолета Ту-204 объем применения ПКМ составил 14% от массы, то в перспективных пассажирских аэробусах (типа А3ХХ) он достигнет 25%.

Применение ПКМ на основе углеволокна – одно из эффективных средств снижения массы конструкции. Совершенствование прочностных, деформационных, теплофизических характеристик углепластиков и повышение их теплостойкости даст возможность использовать их не только в слабо- и средненагруженных конструкциях пассажирских самолетов (интерьер, средства механизации крыльев, зализы и т. п.), но и в перспективе, по аналогии с военными самолетами – в высоконагруженных деталях типа крыльев, вертикальных рулей и др.

С целью создания теплостойких ПКМ, способных работать при температурах 300–400°С, разработаны научные основы получения полимерной матрицы методом изомеризационной полициклизации непосредственно на наполнителе предварительно полученного форполимера, образующего в процессе реакционного формирования макрогетероциклическую структуру лестничного типа, содержащую конденсированные ароматические и гетероциклические фрагменты.

Формирование лестничного полимера методом изомеризационной полициклизации протекает без выделения низкомолекулярных продуктов реакции и приводит к образованию плотноупакованной сверхжесткой лестничной структуры с высоким уровнем межмолекулярного взаимодействия и тепло- и термостойкостью, находящимися практически на максимально возможном уровне, характерном для органических полимеров.

Полученные таким образом полимерные матрицы с плотностью 1,44–1,5 г/см^3 характеризуются физико-механическими показателями, не уступающими свойствам лучших эпоксидных связующих, и обладают одновременно термоокислительной устойчивостью вплоть до температур 500–520°С и температурой стеклования T_c>400°С.

На основе разработанного связующего изготовлены опытные образцы угле-, стекло- и органопластиков. Полученный на первой стадии синтеза форполимер подвергается измельчению в порошок и напыляется

на наполнитель в электростатическом поле, что позволяет реализовать экологически чистую безрастворную технологию и получить препреги практически неограниченной жизнеспособности. Благодаря отверждению связующего по механизму многостадийной ступенчатой изомеризационной полициклизации без выделения летучих продуктов возможно использование упрощенного технологического процесса формования, включающего в себя формообразование при 200°С в оснастке с последующей термообработкой при 200–350°С в свободном состоянии.

Изготовленные по указанной технологии опытные образцы ПКМ обладают следующими прочностными характеристиками:

углепластик – $\sigma_{в.и}^{400°}$ до 1320 МПа, $\tau_{сдв}^{350°}$ до 40 МПа,

стеклопластик - $\sigma_{в.и}^{350°}$ до 670 МПа, $\tau_{сдв}^{300°}$ до 280 МПа,

Объем применения в конструкциях вертолетов ПКМ (стекло-, органо-, углепластики) и гибридных материалов существенно выше, чем в самолетных конструкциях и достигает в изделиях последних модификаций до 60% от массы. Их применение в конструкциях несущих винтов, лонжеронов, обшивки и нервюр хвостовых секций, обшивок сотовых панелей руля, киля, стабилизатора, топливных баков, антенных обтекателей обеспечивает снижение массы на 30%, увеличение ресурса в 2–4 раза, существенное повышение боевой живучести.

Особенно эффективно применение ПКМ для изготовления лопастей вентиляторов для двигателей самолетов Ан-70, Ил-114, Ан-140, Ан-38.

Благодаря снижению массы лопастей (по сравнению с алюминиевым сплавом на 66%) обеспечиваются: высокая тяга на старте, сокращение разбега при взлете и посадке, снижение в 2–3 раза шума и вибрации, расхода топлива на 25% и повышение КПД до 0,85–0,88.

Дальнейший прогресс в применении ПКМ для сильнонагруженных конструкций связывается с разработкой нового класса слоисто-волокнистых анизотропных полимерных материалов – адаптирующихся композиционных материалов (АКМ).

Применение традиционных композиционных конструкций может принести определенный эффект, однако применение адаптирующихся КМ этот эффект значительно увеличивает. Например, согласно расчетам применение обычных КМ в концевой части крыла самолета на одной трети размаха приводит к уменьшению массы конструкции планера на 150 кг, в то время как применение адаптирующихся КМ, деформирующих крыло в нужном направлении, при расчетных режимах позволит уменьшить массу крыла на 3200 кг.

На практике реализована возможность достижения высоких массовых и аэродинамических характеристик при использовании адаптирующегося материала – углепластика АКМ-ly в крыле обратной стреловидности истребителя С-37 «Беркут» АО ОКБ «Сухого».

Эффект адаптации можно использовать во многих областях техники: машиностроении, строительстве, медицине и др.

Дальнейшее развитие получит направление использования клеев при изготовлении авиационных конструкций (в том числе сотовых), что обеспечит повышение уровня прочности (на 25%), ресурса и надежности (в 2–3 раза), снижение энергозатрат (в 1,5 раза) за счет снижения температуры отверждения клеев до 100°С.

Высокопрочные клеи ВК-25, ВК-31, ВК-40, ВК-36, ВК-51, ВК-41 и другие и клеевые препреги (КМК) широко применяются в конструкциях практически всех современных ЛА. Так, площадь клеевых соединений в самолетах «Руслан», Ил-96-300 составляет более 3000 м^2.

Важнейшей задачей по реализации на практике концепции создания безопасно повреждаемых конструкций планера с увеличением ресурса является разработка новых высокопрочных материалов – информкомпозитов, способных нести нагрузку и осуществлять передачу информации о повреждениях, возникающих в материале в процессе эксплуатации. В последние годы дальнейший прогресс в совершенствовании свойств полимерных материалов, в частности клеев, композитов, компаундов и др., связывают с исследованиями в области наноструктурированных материалов и технологий.

Особые свойства материи на наномасштабном уровне проявляются в силу того, что размеры частицы (молекулы, кластера, зерна, домена) становятся сравнимы с масштабами таких физических величин, как средний пробег электронов в металлах, размеры доменов в ферромагнетиках, пробег фононов в кристаллах, эффективные размеры экситонов в полупроводниках. В основе функционирования наносистем лежат, таким образом, квантовые проявления материи. На базе этих представлений и уже наработанного эксперимента прогнозируется создание наноструктурированных углеродных и керамических материалов, в десятки раз более прочных, чем сталь; полимерных материалов в 3 раза более прочных, чем существующие полимеры, – для применения в самолетостроении.

Исключительный интерес представляют углеродные наномодификаторы – фуллерены и нанотрубки (H.W. Kroto, R.E. Smalley – Нобелевская премия, 1996 г.).

Фуллерены следует рассматривать как особый универсальный объект для широкого круга прикладных разработок. В рамках проблем авиационного материаловедения целесообразность применения фуллеренов, нанотрубок рассматривается также при разработке таких авиационных материалов на полимерной основе, как клеи и герметики с повышенной адгезионной и когезионной прочностью, резины с улучшенной сопротивляемостью истиранию, лакокрасочные покрытия с повышенной адгезией и стойкостью к эрозии, тепло- и электропроводящие неметаллические покрытия.

4.3. Материалы для газотурбинных двигателей (ГТД)

В настоящее время идет конструкторская, технологическая и материаловедческая проработка проблемы создания двигателя нового шестого поколения. При этом задача по повышению работоспособности материалов в условиях жесткого комплексного воздействия высоких температур, напряжений и агрессивной среды является одной из важнейших.

В двигателе шестого поколения необходимо обеспечить отношение тяга/масса на уровне 20:1. Для сравнения это отношение для двигателей четвертого поколения (1970–1975 гг.) равняется 8:1, а для современных двигателей пятого поколения (1985–2000 гг.) – 10:1.

В области материаловедческих задач исследования по этому направлению предусматривают как разработку классических жаропрочных сплавов (титановых, никелевых – литейных и деформируемых), теплобарьерных покрытий, уплотнительных материалов, так и создание новых классов материалов – таких как интерметаллидные сплавы, металлические композиционные материалы.

Применение материалов и технологий должно обеспечить:

- рост рабочей температуры газа двигателей нового поколения с 1300–1400 до 1600–1800°С;
- снижение расхода топлива с 0,6 до 0,4 кг топлива/кг тяги в час;
- рост тяги с 280 до 400 кН (с 28000 до 40000 кгс);
- повышение надежности и ресурса дисков в 2–3 раза, рабочей температуры на 50–70°С, снижение массы дисков на 10–15%;
- снижение расхода дефицитных легирующих элементов (Co, W, Nb, Re и др.).

Для повышения ресурса и надежности жаропрочных титановых сплавов в первую очередь предстоит наиболее полно реализовать потенциальные возможности отечественных сплавов (стабильность свойств) путем усовершенствования технологических схем производства серийной продукции (сплавы ВТ8М-1, ВТ8-1, ВТ25У, ВТ18У). Необходимо жестко регламентировать состав, равномерную по сечению и длине предварительных заготовок макро- и микроструктуру.

Вместе с тем потенциальных возможностей по дальнейшему повышению жаропрочности титановых сплавов при температурах >620°С остается крайне мало, а возможности легирования практически исчерпаны.

Основные перспективы в разработке и освоении нового поколения конструкционных жаропрочных титановых сплавов с повышенной плотностью, пониженными окисляемостью и горючестью связаны с развитием интерметаллидных сплавов на основе Ti_3Al и TiAl для работы при температурах 600–800°С.

Предстоит завершить комплекс исследований и разработок по многокомпонентному легированию базовых композиций активными элементами, освоению новых методов плавки, технологий производства поко-

вок, листов и плит, регламентации структуры в процессе деформации и термообработки, поверхностной обработке готовых деталей.

Завершение перечисленных исследований и разработок позволит получить следующие характеристики для интерметаллидных титановых сплавов:

- на основе Ti_3Al: d=5,0 г/см^3; $\sigma_в$=1200 МПа; δ>6%; σ_{-1}=750 МПа; $\sigma_{100}^{650°}$= 420 МПа;
- на основе TiAl: d=3,8 г/см^3; $\sigma_в$=500 МПа; δ>2,5%; $\sigma_{100}^{850°}$= 300 МПа;
- для сплавов с интерметаллидным типом упрочнения $\sigma_в$=1250-1300 МПа; δ=8-16%; $\sigma_в^{650°}$= 1080 МПа;

Основной задачей при создании ГТД является повышение жаропрочности турбинных лопаток, испытывающих исключительно высокие температурные и силовые нагрузки.

В области создания перспективных ГТД авиационного и наземного назначения важнейшей задачей является изыскание новых жаропрочных сплавов для рабочих и силовых лопаток, разработка процессов и оборудования для производства монокристаллического литья, решение проблем эффективного охлаждения деталей, а также обеспечение выхода годной продукции по геометрическим и кристаллографическим параметрам и структурному совершенству получаемых отливок.

В отношении жаропрочных литейных сплавов поставленные задачи решаются как разработкой классических жаропрочных никелевых сплавов (ЖНС) путем поиска оптимальных композиций с повышенным содержанием тугоплавких элементов (Re, Ta, W), так и созданием сплавов на основе интерметаллидов (главным образом алюминидов никеля), а также освоением в качестве сверхжаропрочных материалов так называемых естественных композитов — направленно закристаллизованных эвтектических сплавов, упрочненных нитевидными карбидами ниобия и тантала.

Следует отметить, что способ повышения жаропрочных свойств монокристаллических сплавов путем оптимизации традиционного легирующего комплекса, включающего W, Mo, Ta, Ti, Cr, Co, в настоящее время исчерпан. Современная тенденция совершенствования монокристаллических ЖНС заключается в использовании в качестве легирующего элемента рения. Концентрация рения в промышленных ЖНС достигает 3–4% (2-е поколение); в опытных сплавах – 5–6% (3-е поколение). Наибольший эффект в повышении жаропрочности достигнут у опытного сплава с содержанием рения 9%. При этом должен быть достигнут уровень жаропрочности $\sigma_{100}^{650°}$≥300-320 МПа. Разрабатываемые композиции должны быть мало склонны к объемной и поверхностной рекристаллизации при проведении высокотемпературной термообработки и технологических нагревов. Сплав с такими показателями свойств обеспечит повышение рабочей температуры на 30–40°С и увеличение долговечности лопаток в 2–3 раза (в условиях эксплуатационных воздействий).

Необходимость дальнейшего повышения рабочих температур и ресурса деталей ГТД вызвала потребность в изыскании новой, более термостабильной основы сплавов, чем фазоупрочненный твердый раствор на основе никеля.

В качестве такой основы целесообразно использовать интерметаллические соединения типа Ni_3Al, ковалентные связи в которых способствуют более эффективному решению проблем жаропрочности (по сравнению с обычными металлическими связями твердого раствора). В зависимости от дополнительного легирования основы Ni_3Al, а также от структуры отливок, определяемой технологией литья, можно регулировать уровень жаропрочности этих сплавов. При этом при переходе от равноосной структуры к столбчатой и далее – к монокристаллу жаропрочность сплава возрастает.

Комплекс свойств интерметаллидного сплава с монокристаллической структурой ВКНА-1В МОНО представлен в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Свойства сплава ВКНА-1В МОНО

Свойства	Показатели свойств при температуре испытаний, °С							
	-70	20	800	900	1000	1100	1200	1250
$\sigma_в$, МПа	1350	1350	890	760	520	410	230	160
δ, %	14	14	26	25	30	22	24	29
σ_{100}, МПа	–	–	530	360	200	100	50	–
σ_{500},МПа	–	–	470	290	150	75	30	–

Следует отметить, что при одинаковом уровне жаропрочности (температура 1100°С) интерметаллидные сплавы содержат существенно меньшее количество дефицитных дорогостоящих тугоплавких элементов, таких как W, Mo и др. Наиболее эффективно применение сплавов на интерметаллидной основе для изготовления охлаждаемых и неохлаждаемых сопловых лопаток, деталей жаровых труб и реактивного сопла, работающих в интервале температур 900–1150°С.

Новейшие разработки в этом направлении позволяют повысить жаропрочность сплава до уровня $\sigma_{100}^{1200°}$>50-70 МПа.

Дальнейший прорыв в области жаропрочных материалов (рабочие температуры до 1300°С и более) обеспечивают также металлические композиционные материалы. В качестве матрицы используют различные материалы, такие как Al, Ti, интерметаллиды и др., а в качестве армирующих материалов – нитевидные кристаллы, дисперсные частицы тугоплавких соединений, в частности карбида кремния, оксидные или вольфрамовые волокна и др.

В настоящее время разрабатываются металлические композиционные материалы со следующим уровнем свойств:

$\sigma_в^{1200°}$>100 МПа; d<7 г/см^3 (интерметаллидная матрица);

$\sigma_в^{800°}$>300 МПа; d<6,5 г/см^3 (титановая матрица);

$\sigma_в^{400°}$>150 МПа; d<3 г/см^3 (матрица из легких сплавов);

К классу композиционных материалов относятся и естественные композиты, получаемые по технологии направленной кристаллизации эвтектических сплавов. В этих сплавах каждая из эвтектических фаз растет перпендикулярно фронту кристаллизации, что позволяет путем перемещения плоского фронта кристаллизации получить ориентированную структуру волокнистого строения. Упрочнителем в этих материалах является непрерывный взаимопроникающий каркас из нитевидных кристаллов монокарбидов тугоплавких металлов (TaC, NbC). Разработанные естественные композиты позволяют получить высокий уровень длительной прочности при температурах до 1200°С ($\sigma_в^{1200°}$>700 МПа). Анализ требований к материалам и достигнутый уровень свойств позволяет прогнозировать существенное возрастание объема применения КМ в перспективных ГТД (до 40%).

Эффективный способ повышения долговечности работы лопаток и других деталей ГТД – применение высокотемпературных защитных покрытий, формируемых в вакууме из многокомпонентной плазмы при высоких энергиях частиц (10–103 эВ). Стоит задача по разработке системы защиты металла лопаток от сульфидно-оксидной коррозии (ресурс >15000 ч), в том числе:

• металлических (конденсированных, конденсационно-диффузионных) систем Me–Cr–Al–Y; (Me–Cr–Al–Y)+(Me–Al–Cr–Y), где Me: Ni; Ni–Co; Co–Ni (рабочая температура до 1250°С);

• теплозащитных из конденсированной керамики на основе стабилизированного диоксида циркония;

• коррозионностойких на основе Ni–Co–Cr–Al–Y; (Ni–Co–Cr–Al–Y)+(Ni–Al–Si–B);

• эрозионно-стойких, коррозионностойких на основе карбидов и нитридов металлов и других для лопаток компрессора из титановых и жаропрочных сплавов и сталей.

Применение таких покрытий обеспечивает также и повышение надежности работы деталей ГТД.

Особой задачей двигателестроения является создание сварных жаропрочных конструкций, таких как жаровые трубы, сварные корпуса камер сгорания и др. К ним предъявляется комплекс жестких технологических требований, в частности хорошая свариваемость, высокая технологическая пластичность. Наиболее перспективными являются отечественные никелевые жаропрочные свариваемые сплавы, такие как ВЖ145, ВЖ155, ВЖ159.

Сплав ВЖ155 является наиболее высокотемпературным свариваемым материалом для жаровых труб камер сгорания. По рабочей температуре (1200–1250°С) этот сплав превосходит все отечественные и зарубежные материалы на Cr–Ni и Cr–Ni–Co основе.

Сплав ВЖ159 по основной характеристике материалов для жаровых труб – термостатичности – в несколько раз превосходит серийные отечественные материалы. Он обладает высокими прочностными характери-

стиками, что позволяет снизить массу сварных узлов и использовать его в качестве материала как жаровых труб, так и корпусов (табл.4.2).

Таблица 4.2

Сравнительные свойства никелевых жаропрочных свариваемых сплавов

Сплав	σ_{100}, МПа, при температуре, °С			
	900	1000	1100	1200
ВЖ155	–	60	40	20
HS-188	71	35	15	–
ЭИ868	52	25	–	–
ВЖ145	70	35	15	–

Применение свариваемых сплавов ВЖ145, ВЖ155, ВЖ159 позволило повысить рабочие температуры жаровых труб на 150–200°С, увеличить ресурс в 2–5 раз, а для сварных корпусов существенно повысить удельную прочность, снизить массу (на 15%) и уменьшить трудоемкость при изготовлении и ремонте (на 15–30%).

4.4. Материалы для приборов и агрегатов

Целенаправленная разработка высокопрочных сталей, титановых сплавов, магнитных материалов, специальных клеев, теплоаккумулирующих материалов и т.п. позволила значительно повысить «весовую культуру» агрегатов и приборов, надежность их работы и ресурс, нечувствительность к помехам и многие другие важные специфические характеристики.

Для золотниковых пар гидроагрегатов разработан сплав на Cu–Ni основе вакуумной выплавки с высокими механическими свойствами в литом состоянии ($\sigma_в$=1120 МПа; KCU=0,4–0,5 МДж/м^2) и отсутствием газовой пористости. Сплав обладает высокой износостойкостью и коррозионной стойкостью (исключается «схватывание» деталей золотников при использовании в гидроагрегатах топлива с повышенным содержанием серы). Продолжаются исследования по разработке деформированного варианта этого сплава с целью повышения КИМ.

Для зубчатых пар редукторов ГТД и вертолетов разработана сталь ВКС-10 с поверхностной твердостью после химико-термической обработки 60 HRC. Сталь работоспособна при 300°С (длительно) и при 550°С (кратковременно – без разупрочнения в течение 2 ч). Применение сталей позволяет передавать значительные крутящие моменты при ограниченных размерах редуктора и обеспечивает безаварийность его работы при перегревах в зоне контакта зубьев в условиях «масляного голодания».

Разработка композиций элинварных сплавов, обладающих малоизменяющимися при колебаниях температуры упругими свойствами, позволила повысить точность срабатывания (в 5 раз) датчиков приборов измерения физических параметров (давление, плотность, скорость), обеспечить снижение массы и габаритов приборов. Быстродействие и

точность навигационных приборов и системы автоматики ЛА обеспечиваются также кольцевыми магнитами с радиальной структурой на основе магнитотвердых материалов системы Nd–Fe–B, разработанных в ВИАМ. Материалы обладают магнитной энергией 320–350 кДж/м^3 и в перспективе за счет новых систем легирования и микролегирования величина магнитной энергии достигнет 360–400 кДж/м^3.

Таким образом, широкое применение в самолетах, вертолетах и двигателях материалов нового поколения и технологий наряду с внедрением прогрессивных методов неразрушающего контроля, развитием системы управления качеством обеспечат создание и эксплуатацию конкурентоспособной отечественной авиационной техники XXI века.

5. НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ

5.1. Исторические предпосылки развития нанотехнологий и наносистем

В последние годы нанотехнология – это быстро развивающаяся область, хотя еще десять лет назад мало кто слышал об этом перспективном направлении. Исследования в области нанотехнологий и реальные разработки начались еще в 80-е года XX века. Многие нанотехнологические открытия и достижения были удостоены Нобелевских премий. Становление и развитие нанотехнологии непосредственно связано с развитием технических знаний, фундаментальных знаний, а также методов исследования.

Нанотехнология (греч. nanos карлик + technê искусство + logos учение, понятие) – междисциплинарная область фундаментальной и прикладной науки и техники, занимающаяся новаторскими методами (в сферах теоретического обоснования, экспериментальных методов исследования, анализа и синтеза, а также в области новых производств) получения новых материалов с заданными нужными свойствами.

Нанотехнология качественно отличается от традиционных инженерных дисциплин, так как в микромасштабах привычные макроскопические технологии обращения с материей неприменимы. Взаимодействия между микроскопическими элементами в макромире ничтожны по величине, но имеют высокие удельные показатели.

На микроуровне явления, пренебрежительно слабые в обычных масштабах, становятся намного более значительными и непредсказуемыми: свойства и взаимодействия отдельных атомов и молекул (или агрегатов молекул), квантовые эффекты принимают совершенно новый характер. Применение нанотехнологий позволяет искусственно связывать наночастицы, образующие микро- и макрообъекты, в которых определяющими становятся новые свойства и типы взаимодействия между отдельными атомами и молекулами, что определяет свойства получаемого в итоге вещества или объекта.

Автором термина «нанотехнология» в контексте обработки материалов путем добавления или удаления атома или молекулы1 является профессор токийского университета Норио Танигучи (1974 г.).

Основы нанотехнологий, как считает значительное число экспертов, заложены лауреатом Нобелевской премии Р. Фейнманом в 1959 г. в его знаменитой лекции «There\'s Plenty of Room at the Bottom» («Там, внизу, полно места») на заседании американского физического общества: «…Мне хочется обсудить одну малоизученную область физики, которая представляется весьма важной и перспективной и может найти множество ценных технических применений. Речь идет о проблеме контроля и управления строением вещества в интервале очень малых размеров. Внизу (т. е. «внизу или внутри пространства», если угодно) располагается поразительно сложный мир малых форм, и когда-нибудь <…> люди будут удивляться тому, что до 1960 г. никто не относился серьезно к исследованиям этого мира… Известные нам

принципы физики не запрещают создавать объекты «атом за атомом». Манипуляция атомами вполне реальна и не нарушает никаких законов природы…»2. Фейнман с общей точки зрения анализирует возможности изменения масштабов электромеханических приборов, электрических схем и проблему записи, сжатия и сохранения информации.

Он подробно рассматривает последствия безграничной миниатюризации с позиций теоретической физики. В своем выступлении Р. Фейнман постулирует, что физические законы позволяют манипулировать отдельными атомами и молекулами. Таким образом, если было бы известно точное месторасположение отдельных молекул и атомов вещества, то их можно было бы распределить в заданной последовательности. Он предполагает, что возможно перемещать атомы отдельно, механически, при помощи манипулятора соответствующих размеров. Этот манипулятор он предлагает сделать следующим способом.

Необходимо построить механизм, создающий свою копию, только на порядок меньшую. Полученный меньший механизм должен снова создать свою копию, опять на порядок меньшую, и так до тех пор, пока размеры механизма не будут соизмеримы с размерами порядка одного атома.

При этом будут нужны изменения в устройстве этого механизма, так как силы гравитации, действующие в макромире, будут оказывать все меньшее влияние, а силы межмолекулярных взаимодействий и силы Ван-дер-Ваальса будут все больше влиять на работу механизма. На последнем этапе полученный механизм соберёт свою копию из отдельных атомов. Принципиально число данных копий неограниченно, можно будет за короткое время создать любое количество таких машин. Эти машины смогут способом поатомной сборки собирать макрообъекты. Таким машинам нужно будет дать только необходимое количество молекул и энергию и написать программу для сборки требуемых предметов. До сих пор никто не смог опровергнуть эту возможность, но и никому пока не удалось создать такие механизмы.

Идеи Фейнмана развил Эрик Дрекслер в книге «Машины созидания» (Engines of Creation: The Coming Era of Nanotechnology), описав молекулярные устройства, которые в будущем будут производить различные продукты. Эрик Дрекслер внес большой вклад в развитие и продвижение нанотехнологии. Обратившись к идеям Фейнмана, он разработал физические принципы систем молекулярного производства, описал их с точки зрения физики, химии и квантовой механики. В этой книге в научно-популярном стиле с элементами научной фантастики была описана грядущая эра нанотехнологий.

В начале 80-х годов XX века был изобретен сканирующий туннельный микроскоп. Появилась измерительная аппаратура, необходимая для обращения с наноразмерными объектами. Это событие послужило началом эры развития нанотехнологий и нанонауки как самостоятельной дисциплины. Именно с этого момента можно говорить о нанотехнологиях как о ключевых технологиях XXI века, которые призваны повлиять на развитие общества: на основе достижений нанотехнологий создаются новые возможности в производ-

стве материалов, сфере здравоохранения, электронике, оборонном секторе, сенсорных технологиях, промышленном производстве. Нанотехнологии только входят в стадию бурного развития. Тем не менее, проведенные исследования уже сейчас дают практические результаты. Благодаря применению передовых научных исследований нанотехнологию относят к высоким технологиям.

При рассмотрении вопросов исторического развития нанотехнологий особое внимание следует уделить истории появления работ в области наноматериалов и наносистем.

При переходе вещества в наносостояние его свойства начинают сильно зависеть от размера составляющих его нанообъектов, что является следствием происходящего при уменьшении размера объектов изменения их свойств и характера взаимодействия с другими объектами. В этом заключаются размерные эффекты, которые возникают, когда размер объекта становится сопоставимым с каким-либо параметром вещества, оказывающим значительное влияние на протекание тех или иных процессов в веществе и, соответственно, на его свойства. Этот параметр может характеризовать процессы, описываемые в рамках классической физики либо на основании квантомеханических представлений. Для квантовых размерных эффектов (квантоворазмерных) соответствующим параметром чаще всего служит длина волны де Бройля.

При анализе квантоворазмерных эффектов удобно использовать еще один параметр наноструктур, называемый размерностью или наноразмерностью. Размерность наноструктур определяется числом измерений, в которых размеры рассматриваемого объекта лежат вне нанодиапазона и в которых, следовательно, не проявляются какие-либо особенности, связанные с размерными эффектами. По этому параметру все объекты можно разделить на четыре группы:

• 3D-объекты – объекты микро- и макродиапазонов (объемные материалы);

• 2D-объекты – нанопленки;

• 1D-объекты – нановолокна, нанотрубки и т. д.;

• 0D-объекты – наночастицы, нанокристаллы, квантовые точки.

Наносистемы по существующим классификациям относятся к ультрадисперсным коллоидным системам с размерами частиц, лежащими в интервале от 1 до 100 нм. Ультрадисперсными системами были названы такие системы, в которых морфологические элементы по размеру сравнимы хотя бы в одном измерении с одной из физических величин или с длиной процесса переноса в этом веществе. Ультрадисперсные системы характеризуются значительной долей поверхностных атомов, которая растет при увеличении степени дисперсности.

Вследствие размерного эффекта материалам в ультрадисперсном состоянии могут быть присущи уникальные сочетания химических, электрических, магнитных, тепловых, механических, сорбционных, радиопоглощаю-

щих и других свойств, не встречающихся в массивных телах. Все дисперсные системы являются гетерогенными, так как состоят из сплошной непрерывной фазы – дисперсионной среды и находящихся в ней раздробленных частиц – дисперсной фазы. Обязательное условие их существования – взаимная нерастворимость дисперсной фазы и дисперсионной среды.

Ультрадисперсные системы называют также ультрамикрогетерогенными: граница раздела фаз в них не может быть обнаружена с помощью оптических микроскопов. Свойства веществ и материалов зависят от их структуры, характеризующейся связанными между собой и влияющими на такие свойства уровнями. Выделяют три уровня.

Первый уровень структуры – кристаллический. Этот уровень определяет пространственное расположение атомов, ионов и молекул в кристаллической решетке твердого тела, на которое может накладываться влияние точечных дефектов (вакансий, атомов в междоузлиях, чужеродных атомов). Точечные дефекты подвижны и во многом определяют диффузионные и электрические свойства материалов, особенно полупроводников.

Второй уровень связан с присутствием в твердом теле различных линейных и плоскостных дефектов структуры (дислокаций), число которых в единице объема возрастает при механических нагрузках, приводящих к появлению внутренних напряжений в материале. Плотность дислокаций и способность к перемещению в твердом теле определяют механические свойства материалов, особенно металлов.

Третий уровень структуры – это объемные дефекты типа пор и капилляров, которые могут создаваться в материалах в процессе их формирования или использования. Они связаны с отсутствием некоторых участков твердого тела.

Ультрадисперсные системы классифицируются по степени дисперсности, агрегатному состоянию дисперсной фазы и дисперсионной среды, интенсивности взаимодействия между ними, отсутствию или образованию структур. Ультрадисперсные системы подразделяются на монодисперсные, если частицы дисперсной фазы имеют одинаковые размеры, и полидисперсные – разные размеры частиц дисперсной фазы.

Многообразие ультрадисперсных систем обусловлено тем, что образующие их фазы могут находиться в любом из трех агрегатных состояний; иметь неорганическую, органическую и биологическую природу.

Разработано достаточно большое число методов получения ультрадисперсных систем, позволяющих весьма тонко регулировать размеры частиц, их форму и строение. Эти методы могут быть разделены на две группы: диспергационные (механическое, термическое, электрическое измельчение или распыление макроскопической фазы) и конденсационные (химическая или физическая конденсация).

5.2 Общая классификация нанообъектов

Нанообъектами, как правило, называют частицы вещества размером от 1 до 100 нм. Именно в этом диапазоне размер морфологических элементов настолько мал, что становится соизмеримым с одним или несколькими фундаментальными физическими свойствами этого вещества: магнитными характеристиками, аномалиями фононного спектра и теплового расширения, изменением параметров кристаллической решетки, изменением границ существования фаз и т. д.

По мере уменьшения размеров частиц возрастает относительное количество атомов, образующих поверхностный слой частицы и находящихся в иных энергетических условиях, чем атомы внутри объемной фазы. Это приводит к возрастанию роли поверхностной энергии при взаимодействии, к аномальным изменениям свойств вещества.

Наиболее распространенной классификацией нанообъектов является классификация по геометрической размерности (по мерности). В соответствии с этой классификацией выделяют следующие классы нанообъектов: нульмерные, одномерные, двумерные, трехмерные (объемные). Иногда отдельно выделяют класс фрактальных нанообъектов, хотя в рамках приведенной классификации представители этого класса относятся к двумерным или трехмерным объектам. Приведем краткие характеристики классов нанообъектов.

Нульмерные нанообъекты имеют характерные линейные размеры (размеры в трех взаимно перпендикулярных направлениях), лежащие в нанометровом диапазоне (рис. 5.1, 5.2). К таким объектам относятся наночастицы (нанопорошки, нанокристаллы), квантовые точки (наночастицы с выраженной дискретностью системы уровней энергии – фрагменты проводника или полупроводника, ограниченные в трех взаимно перпендикулярных направлениях и содержащие электроны проводимости), кластеры (частицы, имеющие размер, как правило, менее 1 нм и представляющие химические соединения, содержащие ковалентную связь между атомами или молекулами).

Одномерные нанообъекты имеют наноразмеры в двух взаимно перпендикулярных направлениях (рис. 5.3, 5.4). К таким объектам относятся нанотрубки, нановолокна, нановискеры (разновидность нитевидного кристалла (вискера) с диаметром поперечного сечения 1–100 нм и отношением длины к диаметру > 100).

Двумерные нанообъекты имеют наноразмеры в одном из трех взаимно перпендикулярных направлений (рис. 5.5, 5.6). К таким объектам относятся графен, пленки, мембраны, покрытия с нанометровой толщиной.

К трехмерным (объемным) нанообъектам (рис. 5.7, 5.8) относят наноструктурированные материалы (металлы и сплавы с ультрамикрозернистой структурой, нанокерамика).

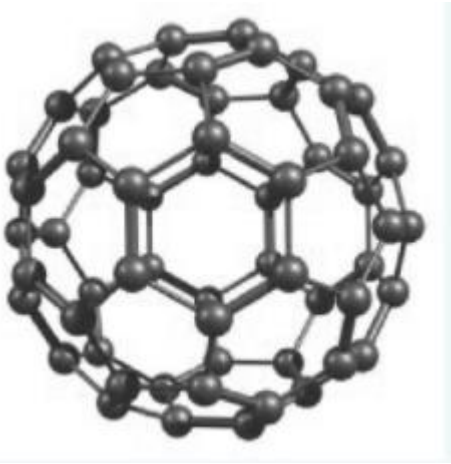


Рис. 5.1. Фуллерен C60

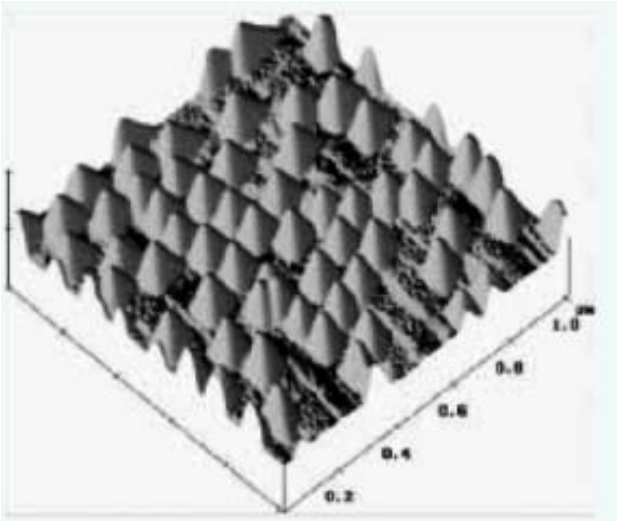


Рис. 5.2. Квантовые точки PbSe на поверхности слоя PbTe

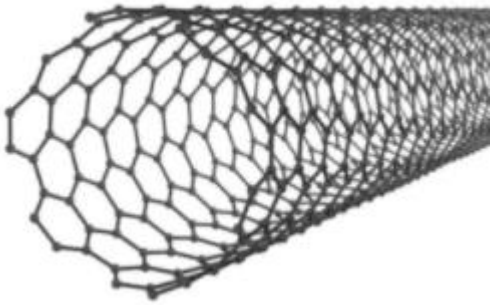


Рис. 5.3. Схематическое изображение нанотрубки

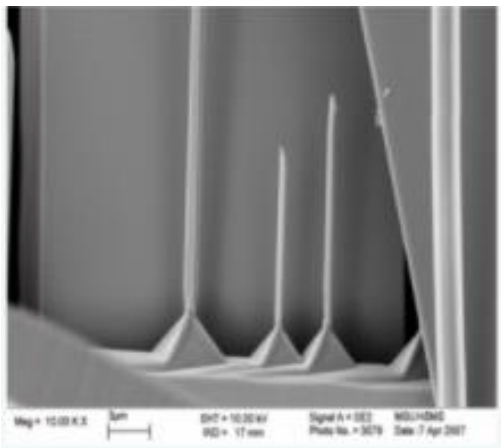


Рис. 5.4. Формирование сложных «фигур» роста при получении нитевидных кристаллов диоксида олова из газовой фазы

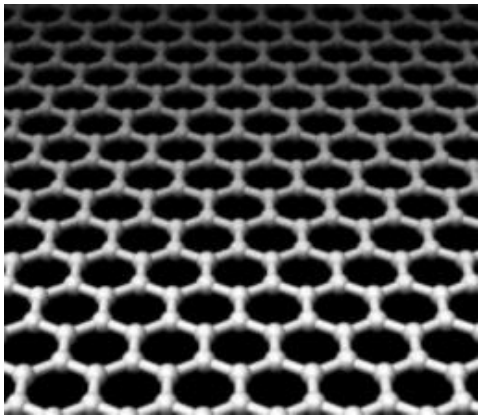


Рис. 5.5. Графен – нанопленка толщиной в один атом

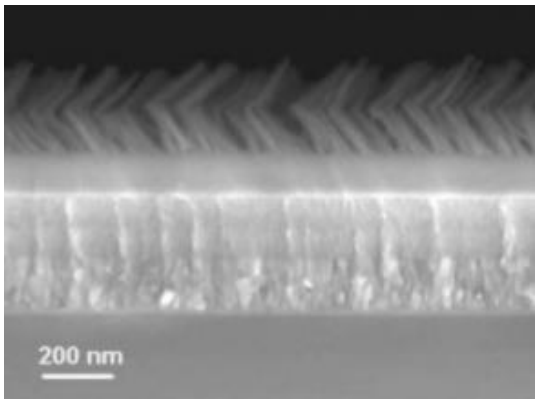


Рис. 5.6. Антиотражательное покрытие (увеличивает количество света, попавшего в солнечную панель, и позволяет панели принимать весь солнечный спектр под любым углом)

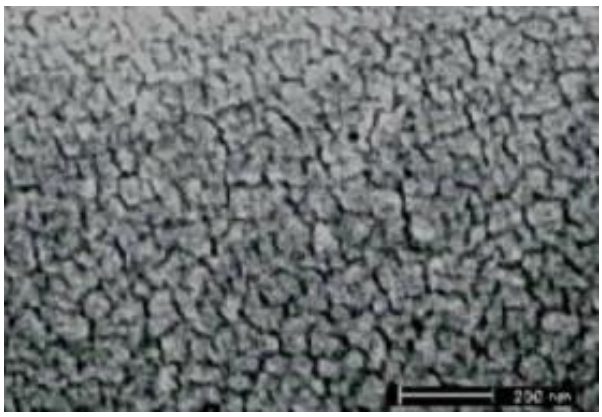


Рис. 5.7. Микроструктура нанокерамики стабилизированного оксида циркония, полученной спеканием при 1100°С

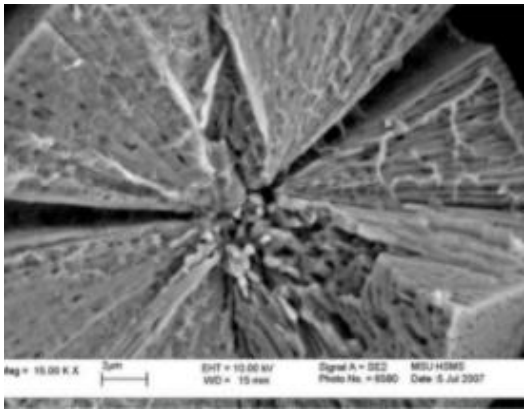


Рис. 5.8. Наноструктурированные образцы диоксида титана

5.3 Наноматериалы

5.3.1. Материалы на основе фуллеренов и нанотрубок. Графен

Материалы на основе фуллеренов. Фуллерены – это новая форма существования углерода в природе наряду с давно известными алмазом и графитом. Фуллерены были открыты в 1985 году при попытках астрофизиков объяснить спектры межзвездной пыли. Оказалось, что атомы углерода могут образовать симметричные молекулы, имеющие форму замкнутой поверхности, напоминающие футбольный мяч (рис. 5.9).

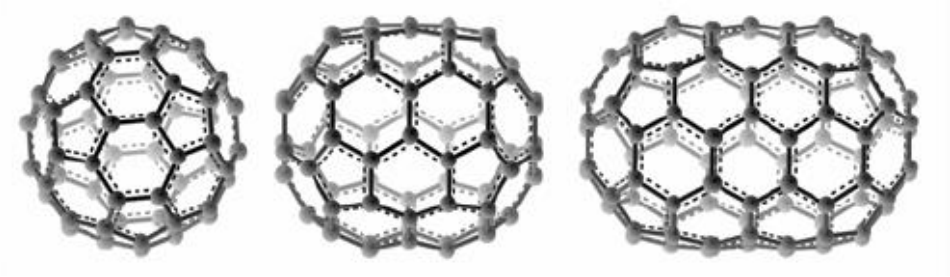


Рис. 5.9. Фуллерены.

Молекула названа в честь архитектора Р. Фуллера, построившего дом из пятиугольников и шестиугольников.

Обнаружено достаточно много разновидностей фуллереноподобных структур (рис. 5.10), количество атомов углерода в которых подчиняется определенной закономерности.

Следующим по распространенности за фуллереном С60 идет фуллерен С70, отличающийся от фуллерена С60 наличием 10 дополнительных атомов углерода, располагающихся подобно поясу в экваториальной области С60, в результате чего молекула С70 оказывается вытянутой и напоминает своей формой мяч для регби.

Так называемые высшие фуллерены (число атомов углерода достигает 400) образуются в значительно меньших количествах и часто имеют довольно сложный изомерный состав. Среди наиболее изученных высших фуллере-

нов можно выделить фуллерены, состоящие из 74, 76, 78, 80,82 и 84 атомов углерода.

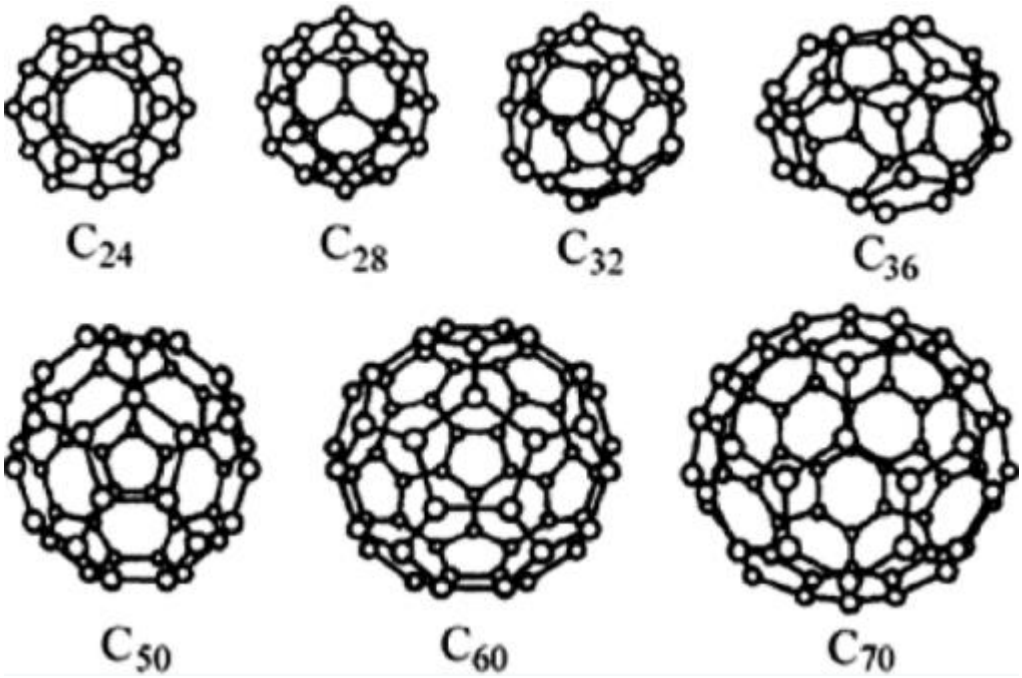


Рис. 5.10. Фуллерены

Предполагаемые и реализованные области применения фуллеренов связаны в основном с их химической устойчивостью и пустотелостью. Это, прежде всего, химия, микробиология и медицина: фуллерены можно использовать для транспортировки атомов и молекул.

Фуллерены можно применять как полупроводники с шириной запрещенной зоны порядка 1,5–2 эВ. Малое по сравнению с традиционными полупроводниками время фотоотклика (единицы наносекунд) обусловило проведение исследований по применению фуллеренов в качестве нового материала для традиционных приложений в электроники: диод, транзистор и др.

Наличие фуллерена на подложке можно использовать как эквивалент 1 бита информации, т. е. одно из перспективных направлений использования фуллеренов – создание новых принципов записи цифровой информации с высокой плотностью.

Кроме перечисленных выше, следует отметить применение фуллеренов в качестве добавок при изготовлении аккумуляторов и электрических батарей; для получения искусственных алмазов методом высокого давления; в качестве добавок в огнезащитные краски; при изготовлении солнечных элементов; при создании новых конструкционных и антифрикционных материалов; в качестве добавок при росте алмазных плёнок CVD-методом (Chemical Vapor Deposition); как материал для литографии и т. д.

Материалы на основе углеродных нанотрубок. Углеродные нанотрубки – протяженные структуры, состоящие из свернутых гексагональных сеток с атомами углерода в узлах. Углеродная нанотрубка, может иметь гигантское число атомов и представляет собой однослойную или многослой-

ную трубку с диаметром около нанометра и длиной в несколько десятков микрон (Рис. 5.11). На поверхности трубки атомы углерода расположены в вершинах правильных шестиугольников. Концы трубки закрыты с помощью шести правильных пятиугольников. Геометрия этих наноконструкций определяет их уникальные физические и химические свойства и, следовательно, возможность существования принципиально новых материалов и технологий их производства. Предсказание физико-химических свойств новых углеродных материалов осуществляется, как с помощью квантовых моделей, так и расчетов в рамках молекулярной динамики.

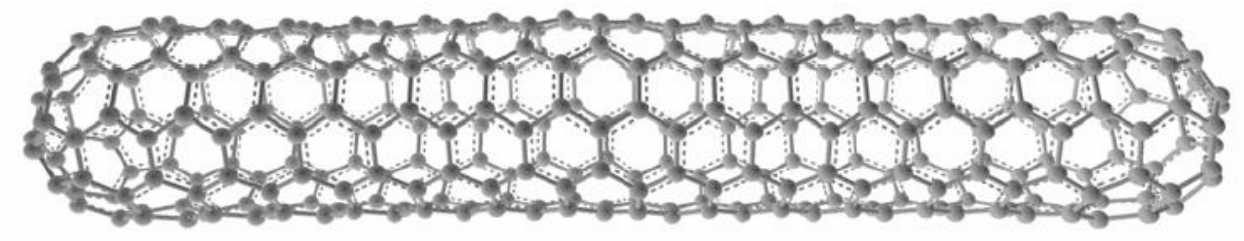


Рис. 5.11. Углеродная нанотрубка.

Связи между атомами углерода в графитовом листе являются самыми сильными среди известных, поэтому бездефектные углеродные трубки на два порядка прочнее стали и приблизительно в четыре раза легче ее. Одна из важнейших задач технологии в области новых углеродных материалов заключается в создании нанотрубок «бесконечной» длины. Из таких трубок можно изготовлять легкие композитные материалы предельной прочности для нужд техники нового века. Это силовые элементы мостов и строений, несущие конструкции компактных летательных аппаратов, элементы турбин, силовые блоки двигателей с предельно малым удельным потреблением топлива и т. п. В настоящее время научились изготавливать трубки длиной в десятки микрон при диаметре порядка одного нанометра.

Известно, что в кристаллическом графите проводимость вдоль плоскости слоя наиболее высокая среди известных материалов и, напротив, в направлении, перпендикулярном листу, мала. Поэтому ожидается, что электрические кабели, сделанные из нанотрубок, при комнатной температуре будут иметь электропроводность на два порядка выше, чем медные кабели. Для этого требуется технология, позволяющая производить трубки достаточной длины и в достаточном количестве.

К множеству нанообъектов относятся сверхмалые частицы, состоящие из десятков, сотен или тысяч атомов. Свойства кластеров кардинально отличаются от свойств макроскопических объемов материалов того же состава. Из нанокластеров, как из крупных строительных блоков, можно целенаправленно конструировать новые материалы с заранее заданными свойствами и использовать их в каталитических реакциях, для разделения газовых смесей и хранения газов. Большой интерес представляют магнитные кластеры, состоящие из атомов переходных металлов, лантиноидов, актиноидов. Эти кла-

стеры обладают собственным магнитным моментом, что позволяет управлять их свойствами с помощью внешнего магнитного поля.

Реализованные и перспективные применения углеродных нанотрубок весьма разнообразны:

– механические (сверхпрочные нити, композиционные материалы, нановесы, зонды для атомных силовых микроскопов);

– в микроэлектронике (транзисторы, нанопроводники, прозрачные проводящие поверхности, топливные элементы);

– для создания соединений между биологическими нейронами и электронными устройствами в новейших нейрокомпьютерных разработках;

– капиллярные (капсулы для активных молекул, хранение металлов и газов, нанопипетки); – оптические (дисплеи, светодиоды);

– в медицине (создание искусственных мышц, переносчики различных молекул для лечения и диагностики);

– в качестве миниатюрных датчиков для обнаружения молекул в газовой среде или в растворах с ультравысокой чувствительностью.

Возможные области применения нанотрубок не исчерпываются приведенным выше списком, кроме того, следует отметить, что свойства нанотрубок, определяющие их применение, могут быть значительно усилены за счет дополнительных манипуляций с ними. Этим направлением совершенствования параметров нанотрубок занимается особая отрасль нанонауки – химия углеродных нанотрубок.

Графен. Графен (graphene) – двумерная аллотропная модификация углерода, образованная слоем атомов углерода толщиной в один атом, соединенных посредством sp^2-связей в гексагональную двумерную кристаллическую решётку. Его можно представить как одну плоскость, отделенную от объемного кристалла графита (рис. 5.12). Графен состоит из шестиугольных ячеек. Присутствие пяти- и семиугольных ячеек приводит к различного рода дефектам. Комбинация этих дефектов и нормальных ячеек может приводить к образованию различных форм поверхности.

Графен получен в 2004 году. Российскими и британскими учёными в журнале Science была опубликована работа, где сообщалось о получении графена на подложке окисленного кремния. За «передовые опыты с двумерным материалом – графеном» А. К. Гейму и К. С. Новосёлову была присуждена Нобелевская премия по физике за 2010 год.

Основными методами получения графена на сегодняшний день являются механическое отщепление слоев графита и термическое разложение подложки карбида кремния. Подобные нетехнологичные методы не могут быть основой промышленного производства.

Графен обладает большой механической жёсткостью и хорошей теплопроводностью (~1 ТПа и ~5×10^3 Вт · $м^{-1}$ · $К^{-1}$ соответственно). Это перспективный материал для наноэлектроники благодаря высокой подвижности носителей заряда. Несмотря на отсутствие запрещённой зоны в этом материале (как следствие, невозможно добиться существенной разности в сопротивле-

нии при любых приложенных напряжениях к затвору), исследователи полагают, что в скором времени появится новый класс графеновой наноэлектроники с базовой толщиной транзисторов до 10 нм. Учёные из исследовательского центра IBM (IBM\'s Thomas J. Watson Research Center) создали графеновый полевой транзистор, работающий на частотах вплоть до 26 ГГц.

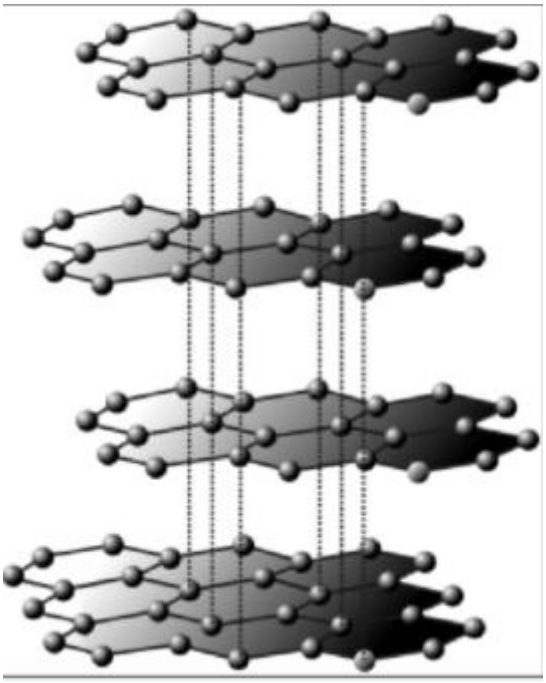


Рис. 5.12. Графен как одна плоскость, отделенная от объемного кристалла графита

Другая возможная область применения графена заключается в создании сверхчувствительного сенсора для обнаружения отдельных молекул химических веществ, присоединённых к поверхности плёнки. Принцип действия такого сенсора заключается в том, что различные молекулы могут выступать как доноры и акцепторы, что в свою очередь ведёт к изменению сопротивления графена. Ещё одна перспективная область применения графена – изготовление электродов в ионисторах (суперконденсаторах), которые планируется использовать в качестве перезаряжаемых источников тока. Создан новый тип светодиодов на основе графена. Графен является относительно новым материалом, поэтому следует ожидать, что нас ждут новые открытия, связанные с применением графена.

5.3.2. Биомитетические материалы

Нанотехнологии включают в себя манипулирование и построение структур размерами порядка нескольких нанометров. Однако некоторые живые организмы делают это уже давно. Живая клетка использует ДНК, РНК и большое количество белков для того, чтобы построить клеточные органеллы нанометровых размеров. Поэтому для нанотехнологов логично было бы воспользоваться природными примерами для построения «интеллектуальных»

наноматериалов, в природе не существующих, то есть биомитетических материалов (имитирующих природные).

Геккон и нановолокна. Исследователи использовали несколько методов для имитации природных материалов на нанометровом уровне. Один из подходов – создание материалов с уникальными свойствами с использованием примеров, уже имеющихся в природе. Так, например, маленькая ящерица геккон может ползать практически по любой поверхности.

Рис. 5.13. Геккон.

Для того, чтобы имитировать свойства геккона, необходимо было сначала разобраться в механизме работы его лапок. Эта работа была проделана в центре нанотехнологий в Манчестере. Результаты исследований показали, что на лапках у геккона расположен ряд кератиновых волосков размерами около 200 нм. Капиллярные силы помогают геккону ползать по влажным поверхностям, а силы Ван-Дер-Ваальса – по сухим. Каждая волосинка связывается с поверхностью с силой в 7 – 10 Н. Благодаря высокой плотности волосков на лапках геккона сила связи значительно увеличивается. Так поверхность размерами 10х10 см, состоящая из волосков кератина, может удерживать груз в 100 кг.

Рис. 5.14. Кожа геккона (справа) и изготовленные по «технологии геккона» искусственные волокна (слева).

Команда из Манчестера решила продолжить исследования, попробовав сконструировать такой же массив нановолокон. Однако в изготовленном с помощью электронно-лучевой литографии образце только некоторые волокна смогли эффективно соединяться с поверхностью. Это связано с тем, что

выращенные исследователями пластиковые волокна жестче, чем аналогичные у геккона. Далее, экспериментируя, исследователи нашли оптимальный вариант геометрии поверхности – диаметр волокон 500 нм, расстояние между волокнами – 1,6 мкм, и длина – 2 мкм. Полученная поверхность 10х10 см смогла удержать всего 30 кг, то есть была хуже природной. Дальнейшие эксперименты с гекконом показали, что присоединение лапок к поверхности происходит в несколько приемов. Исследователи решили материалы в будущем делать гидрофобными (подобно кератину геккона). В теории, волокна из такого материала не будут прилипать друг к другу. И, конечно же, встал вопрос о массовом выпуске «гекконовых лапок» с помощью не столь дорогих технологий, как электронно-лучевая литография.

Белковые структуры. Живые организмы конструируют необходимые продукты из белков, поэтому исследователи заинтересовались тем, как с помощью белков можно искусственно создать различные наноматериалы. Некоторые белки, например, могут формировать регулярные структуры в виде кристаллических решеток, которые можно использовать при конструировании наномашин и в наноэлектронных устройствах. Бактерии на своей поверхности формируют одномолекулярные слои кристаллического белка (рис. 5.15), называемые S-слои, которые повторяются с 10 нм шагом. Исследователи из наноцентра в Вене, Австрия, решили использовать эти естественные «сверхрешетки» для построения искусственных белковых структур. В первую очередь S-слой был удален с поверхности бактерии и разбит на «субъединицы».

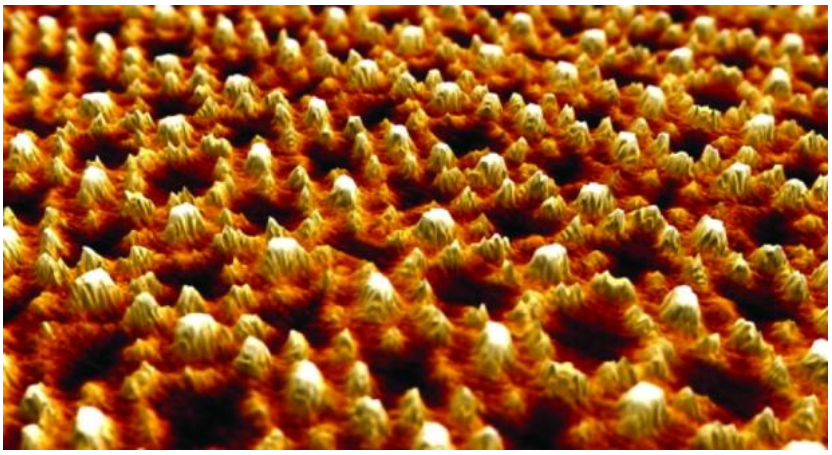


Рис. 5.15 Реконструкция рельефа кристализированного белка Bacillus sphaericus CCM2177 с помощью сканирующего электронного микроскопа. Расстояния между центрами решетки - 13.1 нм.

Далее, поместив субъединицы в раствор, исследователи добились их реорганизации на кремниевых и металлических подложках, а также на других синтетических полимерах. Как только S-слой помещен на подложку, к нему можно добавить специальные сенсорные молекулы, которые вместе со слоем образуют точный биоаналитический сенсор. Так, например, исследователями был создан сенсор глюкозы на основе S-слоя и молекулы фермента

оксидазы глюкозы. Исследователи измеряли величину электрического тока, проходящего через сенсор, в то время как фермент реагировал с глюкозой. Исследователи также использовали S-слой в качестве фоторезиста в современной фотолитографии. Выдерживание слоя в ультрафиолетовом излучении полностью уничтожает его. Однако толщина слоя – всего 5-10 нм. Современные фоторезистивные материалы имеют гораздо большую толщину.

Гибридные материалы. Другие исследователи поставили перед собой цель, которой достичь еще сложнее. Они решили конструировать из белков и неорганических соединений такие структуры, которых в природе еще не существует. Однако до сих пор исследователи не могут точно определить, как именно белки будут собираться из аминокислот (это назвали проблемой фолдинга белка), и поэтому нельзя аналитически просчитать необходимую структуру белка. Исследователи выбрали альтернативный подход: сборку случайного белка из большого количества разных аминокислот. Это можно сделать с помощью генной инженерии бактериофагов. Исследователи из Массачусетского технологического института (МТИ) взяли молекулу ДНК со случайной последовательностью нуклеотидов, кодирующих различные белки, и включили ее в состав ДНК бактериофага в таком участке, что белки ДНК-донора синтезировались на поверхности вируса. Колония таких бактериофагов была помещена в среду, к которой исследователи хотели добиться адгезии белков. Потом поверхность была промыта. После этого на ней остались только те вирусы, на поверхности которых белки были адгезивны субстрату. Отобранные вирусы поместили в новую среду и добились роста их колонии. Так опытным путем можно создать белки, которые будут соединяться с различными материалами, образуя новые структуры. Исследователи надеются создать «библиотеку» вирусов, производящих белки, адгезивные к золоту, платине, серебру, оксиду цинка, арсениду галлия. На основе таких белков, соединенных с неорганическими веществами, можно сконструировать ряд квантовых точек, которые получают сегодня с помощью вакуумных технологий. Сборка квантовых точек с помощью гибридных белков может происходить при комнатной температуре и быть гораздо дешевле. Также такие белки могут пригодиться при создании наномашин. Исследователи из МТИ обнаружили, что бактериофаги «собираются» в длинные нити. Их внешние белки, соединенные с сульфидом цинка (или сульфидом кадмия), образуют длинные (600 нм) электропроводящие нанонити диаметром 20 нм. Нагревая полученную структуру до 350 °С, исследователи обнаружили, что бактериофаги удаляются, оставляя одну металлическую нить. Использованные в этом опыте вирусы состоят всего из шести белков, два из которых соединяются с неорганикой. Исследователи хотят продолжить эксперименты с более сложными (в белковом составе) вирусами для того, чтобы получить трехмерные проводящие структуры.

5.3.3. Нанокерамика

Нанокерамика (nanoceramics), керамический наноструктурный материал – компактный материал на основе оксидов, карбидов, нитридов, боридов и других неорганических соединений, состоящий из кристаллитов (зерен) со средним размером до 100 нм. Обычно нанокерамики получают из наноразмерных порошков формованием и спеканием при использовании импульсного и гидростатического прессования, шликерного и гелевого литья, гидроэкструзии. Одной из проблем при получении нанокерамик является интенсивный рост зерна при спекании в обычных условиях. Для его предотвращения используются два основных метода:

1) введение в исходный порошок (шихту) нерастворимых добавок, локализующихся на границах зерен и препятствующих их срастанию;

2) использование специальных методов и режимов уплотнения и спекания керамики, позволяющих значительно уменьшить продолжительность и (или) температуру высокотемпературных стадий ее получения.

Свойства нанокерамик зависят не только от их химического состава, но и от размеров зерен, на которые влияет, в частности, температура (рис. 5.16).

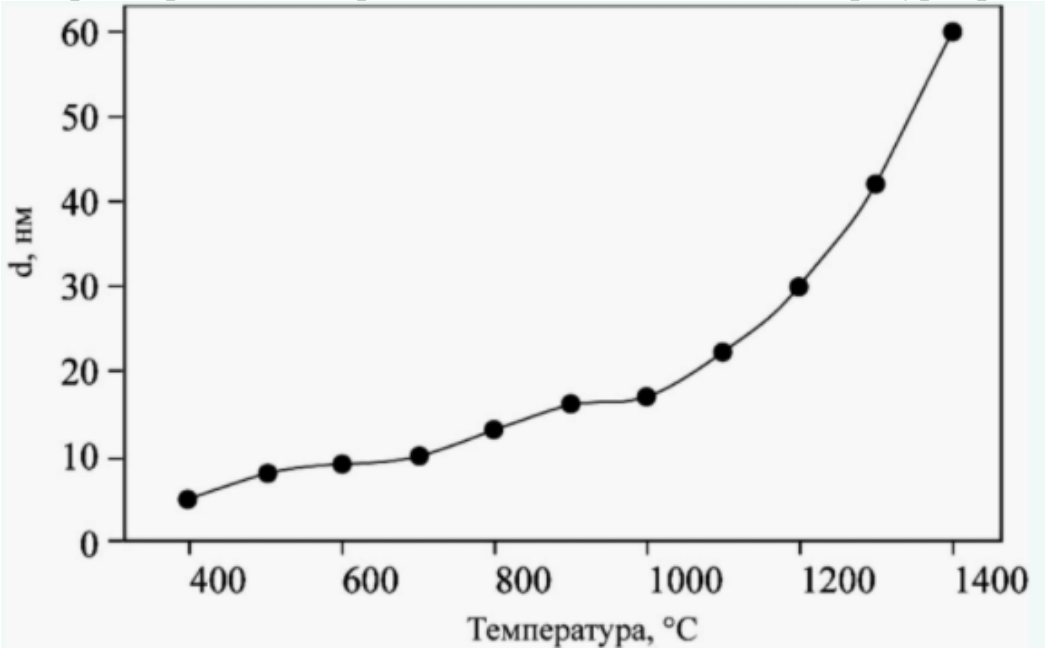


Рис. 5.16. Изменение среднего размера кристаллитов в нанокерамике на основе системы ZrO2 – CeO2 – Al2O3 в интервале температур 400–1400 °С

Нанокерамика является одним из перспективнейших материалов в мире. Она обладает уникальными свойствами и эксплуатационными характеристиками: повышенные ударная вязкость, прочность и твердость. Нанокерамики вы держивают скорость растяжения до 10^{-3} $с^{-1}$ без образования разломов в микроструктуре16. По сравнению с металлами нанокерамика легче и в то же время более износостойкая, жаропрочная, не подвержена коррозии, она инертна по отношению к биологическим объектам, поэтому изделия из нанокерамики применяются в биотехнологиях (носители лекарств, биофильтры, «сосуды» для выращивания клеток, биоимплантат). Нанокерамика имеет ме-

ханические характеристики, практически такие же, как и природная кость. При определенных условиях она может срастаться с костью. В нанокерамике по сравнению с микрокерамикой улучшены электрофизические, магнитные и другие свойства. Применение перспективных керамических материалов позволит создать новое поколение изделий ракетно-космической техники, машин, механизмов и приборов с более высокими качественными характеристиками (производительностью, точностью, ресурсом, энерго- и материалоемкостью).

Их использование обеспечивает экологическую чистоту технологических процессов, сокращается расход стратегических дефицитных металлов (вольфрама, молибдена, никеля, кобальта, меди), энергии, появляется возможность эксплуатировать доступные недефицитные сырьевые источники. Исследователи из University of Michigan и Sandia National Laboratories (США) получили нанопорошки Y_2O_3, доппированные иттербием, тулием и эрбием, методом пиролиза аэрозолей и изготовили из них образцы (рис. 5.17) прозрачной керамики. По мнению ученых, такой материал может быть использован для создания 3D-дисплея.

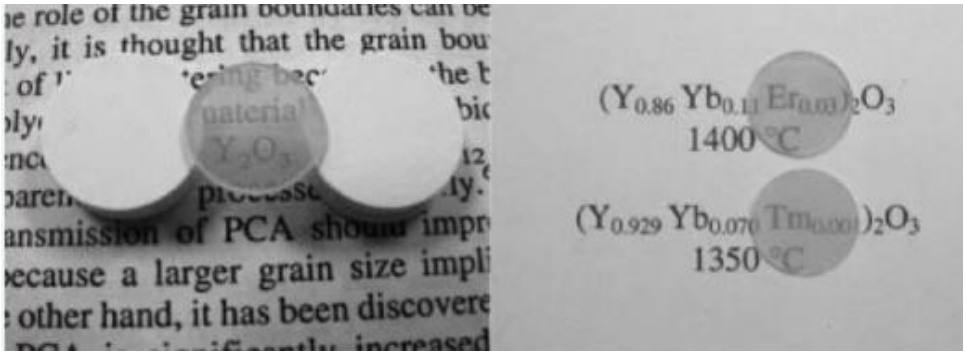


Рис. 5.17. Образцы прозрачной керамики

Количество нанообъектов постоянно растет – нанотехнологии открывают все новые возможности в получении и применении подобных объектов.

5.3.4. Квантовые точки и программируемая материя

Квантовая точка – это электронное устройство, способное «захватывать» электроны и удерживать их в малом пространстве (рис. 5.18).

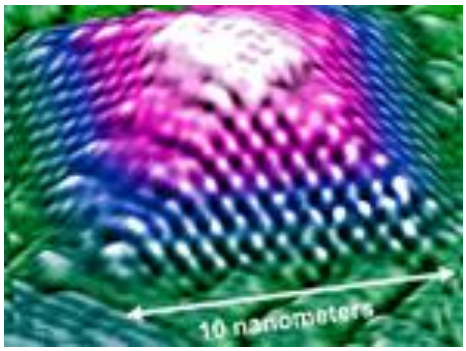


Рис. 5.18. Германиевая квантовая точка на кремниевой основе
(фотография получена при помощи электронного сканирующего микроскопа)

Отдельная квантовая точка представляет собой объект, сформированный из наноразмерных островков одного полупроводникового материала (с меньшей шириной запрещенной зоны) в матрице другого (с большей шириной запрещенной зоны). Из-за различия ширины запрещенных зон носители заряда оказываются локализованы в пределах островка, следствием чего и является квазиатомный (представляющий собой набор отдельных уровней) энергетический спектр. Электроны при этом ведут себя как отдельные стоячие волны, так же, как они ведут себя в атомах. Электронное облако, удерживаемое вышеуказанным образом, называют «искусственным атомом». «Искусственный атом», в отличие от обыкновенных, не имеет ядра, однако его свойства в целом схожи с обычным атомом. Если из большого количества «искусственных атомов» произвести объемную структуру по типу кристаллической решетки полупроводника, то новый материал будет иметь другие свойства. Например, такой «полупроводник» может вести себя и как металл, и как диэлектрик. При этом такие характеристики как цвет, прозрачность, теплопроводность, и магнитные свойства вещества также могут изменяться в реальном времени.

«Квантовая точка» такой же термин, как и «ключ», который описывает большой класс разнообразных устройств, характеризующихся одним и тем же назначением. Полупроводниковые нанокристаллы хороший метод для захвата электронов, так как химики могут выращивать их, добиваясь высокой точности. В полученном химиками растворе будут моли (1 моль – $6{,}23 \times 10^{23}$ молекул) этих одинаковых кристаллов. Их выгодно использовать в оптических устройствах благодаря их свойству поглощать белый свет, а излучая определенный яркий свет. Они нашли использование как в биологии, заменяя флуоресцентные метки, так и в оптических приборах - лазерах и т.д. С их помощью, например, возможно создание сверхмалых лазеров, способных оперировать органеллы живых клеток.

Но это только один тип квантовой точки. Также можно «поймать» на поверхности металлической частицы большое количество электронов, но свойства этой системы будут резко отличаться от свойств вышеописанной квантовой точки. Фуллерены и нанотрубки также могут послужить основой для создания подобных квантовых точек. Но исследователи склоняются к представлению о квантовых точках как о системе электромагнитных полей, удерживающих электроны внутри полупроводника, как о так называемой «квантовой стене». Этот метод, так как позволяет контролировать количество электронов, попавших в ловушку, с помощью изменения напряжения, подводимого к металлическим электродам. Фактически это означает изменение атомного числа «искусственного атома». Вот здесь и можно применить термин «программируемая материя», так как такой процесс легко можно контролировать с помощью современной микроэлектроники, создавая материалы, которых в природе не существует.

5.4. Физико-химические основы формирования нанопористых структур

5.4.1. Общие сведения

В основе механизмов образования нанопористых структур лежит принцип локальных неоднородностей материала, вызванный как механическими, так и химическими воздействиями. При механическом воздействии эти процессы приводят к разрушению материала, поэтому в данном разделе они рассматриваться не будут. Химическое воздействие рассмотрим на примере получения нанопористых материалов на основе углерода.

При обработке некоторых углеродсодержащих соединений (B_4C, SiC, TiC, Mo_2C и т.п.) могут быть получены углеродные материалы, обладающие рядом уникальных свойств. В частности, было установлено, что в карбидах, подвергнутых воздействию хлора, образуются нанопоры с размерами от 0,8 до 2 нм. Процесс воздействия хлора на карбиды приводит к тому, что происходит существенная перестройка углеродной подрешётки карбидов, а углеродные атомы смещаются при этом на (1 – 2)Å.

Исследования также показали, что размер пор в материале, полученном из SiC, составляет 0,8 нм. При этом оказалось, что все поры имеют примерно одинаковые размеры с полушириной распределения 0,02нм.

В настоящее время теория образования пор в твёрдых телах достаточно хорошо разработана. Согласно представлениям, развитым в этих моделях, существуют следующие основные причины, приводящие к формированию пор.

1) Поры образуются из пересыщенного раствора вакансий, образующихся либо при тепловой генерации, либо при воздействии на тело ионизирующих излучений достаточной энергии (так называемая вакансионная пористость).

2) Поры образуются при механических воздействиях на твёрдые тела (деформационные поры)

3) Поры могут образовываться в процессе роста кристаллов и плёнок при сорбции газов, микроусадке, неоднородности осаждения.

Во всех перечисленных случаях образование пор связано с физическим преобразованием структуры и не сопровождается химическим преобразованием материала. В данном случае причина образования пор иная. Она связана с протеканием в процессе обработки карбидов химической реакции типа

$$MeC_\mu + 0{,}5\nu Cl_2 \rightarrow MeCl_\nu + \mu C \qquad (5.1),$$

где Me – карбидообразующий элемент, μ, ν – стехиометрические коэффициенты. Хлор в процессе такой реакции «выедает» атомы карбидообразующего элемента, оставляя атомы углерода и пустоты.

При этом, как правило, в материале формируется однородная по размерам пространственно-периодическая пористая структура с изменённым относительно первоначального положением углеродных атомов.

Рассмотрим процесс образования нанопор в карбиде кремния. Химическая реакция протекает в данном случая по схеме (5.1), в которой Me = Si, $\mu = 1$ и $\nu = 4$. Эта реакция протекает в несколько стадий. Сначала молекулы хлора диссоциируют на атомы, которые затем диффундируют вглубь карбида кремния, соединяясь с кремнием. При этом образуются свободные радикалы, которые могут служить катализаторами данной реакции до тех пор, пока не образуется стабильный газ $SiCl_4$, который удаляется из образца.

Образование таких промежуточных радикалов приводит к возникновению нелинейной обратной связи, то есть продукт реакции $SiCl_4$ (радикалы) будет инициировать своё появление и соответственно образование углерода. При малых потоках хлора распределение вещества в системе является практически однородным, так как диффузия будет успевать выравнивать существующие неоднородности. Однако при достаточно большой плотности потока хлора система в принципе не способна принять и переработать такое количество вещества однородным образом. Она вынуждена перестроиться для более быстрого протекания нелинейной химической реакции.

Одним из возможных способов такой перестройки является образование периодического распределения вещества по пространству. Для рассматриваемой системы это значит, что образец будет состоять из периодически расположенных пор (так как газ $SiCl_4$ удаляется) и атомов углерода. Данный процесс является процессом самоорганизации.

5.4.2.Получение и применение нанопористых материалов

В последние годы проявляется высокий интерес к разработке и исследованию углеродных наноматериалов. Ведутся активные работы в области получения фуллерен, углеродных нанотрубок, наноалмаза и других типов нанофрагментарного углерода. Однако все эти материалы находятся в высокодисперсном состоянии, что ограничивает возможности их практического применения и, в ряде случаев затрудняет изучение свойств. Одним из решений этой задачи может быть создание композиционных материалов, содержащих в своей структуре нанопоры или наноразмерные частицы. Разработка таких материалов, изучение поведения нанофаз в структуре нанокомпозита и их влияние на физико-химические, эелктрофизические и электрохимические свойства является актуальным вопросом материаловедения. Методом synthesis by design были получены новые нанопористые углеродные материалы. В отличие от ранее используемых методов получения углеродных материалов, для получения этих материалов использовались химические реакции замещения хлором углерода в его соединениях с металлами и неметаллами (карбидах). Синтезированные материалы обладают каркасным строением, что обеспечивает их удовлетворительную прочность. Особенности структурной организации углеродного каркаса изучены методом малоуглового рентгеновского рассеяния. Полученные материалы характеризуются высокоразвитой пористой структурой, включающей два типа пор: макропоры (с разме-

рами в несколько микрон) и нанопоры с узким распределением их по размерам. Размеры нанопор могут быть изменены выбором различных карбидов в качестве исходных веществ. Материалы обладают удельной поверхностью до 1300 $м^2$/г, что делает их ценными для использования в качестве эффективных адсорбентов для газов и жидкостей. Высокая удельная поверхность обеспечивает также высокую плотность энергии в двойных электрических слоях, образованных при наложении потенциала на эти материалы, пропитанные растворами электролитов.

Использование нанотехнологии позволяет получать материалы, близкие по структуре к природным [1,2,3], а также материалы, обладающие принципиально новыми свойствами. Одним из таких материалов является класс нанопористых материалов. Цеолиты - чрезвычайно важный класс неорганических материалов, которые могут отделить газы или жидкости на основе их молекулярного размера и формы. Эти ультрафильтры используются в многочисленных сферах промышленности, от производства разлагаемых микроорганизмами моющих средств, к удалению влаги из трубопроводов природного газа и до процессов перегонки нефти в бензин.

Химик Кеннет С. Суслик и его коллеги из Университета Штата Иллинойс создали новый класс материалов, которые подобно цеолитам обладают таким же спектром ценных свойств. Эти новые молекулярные фильтры на 50 процентов лучше заманивают в ловушку молекулы правильного размера и формы, включая воду. Ученые сообщают о своем открытии в статье, которая была опубликована в журнале Nature.

"Этот органический аналог цеолита связывает воду быстрее и лучше, чем самые качественные впитывающие агенты и имеет более высокую степень сохранения воды после "впитки", сказали Суслик, Уильям Х. и Джанет Ликан, профессор химии из Университета Штата Иллинойс. "Материал также показывает селективность, разрешая пропускать только узкий диапазон молекул".

Естественно встречающиеся минералы, состоящие из алюминия и кремния, цеолиты были обнаружены еще в эпоху Средневековья. В то время, свойства материала были проверены путем нагревания его над горелкой. Когда этот материал был нагрет, его опускали в кипящую воду. Поэтому цеолит получил название от греческих слов, означающих "кипящий камень".

Возможность делать другие виды молекулярных фильтров было главной целью химиков, изучающих свойства материалов.

Чтобы создавать нанопористые тела, которые не базируются на кварце и глиноземе, исследователи, использовали намного более крупные молеку-

---

[1] James E. Kloeppel University of Illinois at Urbana-Champaign Дата публикации: 1 октября 2002 Источник: SciTecLibrary.ru

[2] Нанопористые углеродные материалы из химически модифицированных антрацитов
Б.Н. Кузнецов, Н.В. Чесноков, Т.П. МилошенкоЛаборатория каталитической химии

[3]) http://www.nanonewsnet.com/

лярные стандартные блоки, названные металлопорфиринами, имеющими форму молекулы, которая похожа на пончик и связывает атомы металлов, когда они пытаются пройти через ее дырку. Металлопорфирины близко связаны с гемоглобином (красный пигмент в крови) и хлорофиллом (зеленый пигмент растений).

Нагревая смесь специальной порфириновой кислоты и хлорида кобальта до +200°С, С.Суслик и его коллеги создали состав по имени PIZA-1 (Порфириновый Аналог Цеолита Университета Штата Иллинойс - 1).

"PIZA-1 продемонстрировал замечательные свойства, как синтетический молекулярный фильтр, который способен удалить воду из обычных органических растворителей", сказал С.Суслик. "Кроме того, потому что металлопорфирин ловит металл в середине своей молекулы, которая может быть каталитически активна, существует потенциал, чтобы из использованных фильтров делать особые катализаторы для специальные целей. Мало того, что он может выборочно поглотить определенные молекулы, он может также заставить заманенные в ловушку молекулы подвергнуться определенным химическим реакциям, типа каталитического окисления топлива".

"К сожалению, каталитические реакции, которые преобразовали бы углеводороды в бензине в химические соединения, из которых можно затем делать полимеры типа нейлона, еще пока не разработали. Но способность использовать твердое топливо, как химическое сырье для промышленности, вместо того, чтобы просто сжечь его, является технологией, которая станет очень важной в этом столетии после исчерпания природных ресурсов углеводородов", - сказал С.Суслик.

Микроскопические частицы, соединенные в одной конструкции с наноразмерными порами, скоро найдут широкое применение в качестве фильтров для очистки промышленных выбросов, сырой нефти и питьевой воды от токсичных металлов, сообщают эксперты UPI Nano World.

Нанопористые частицы, сделанные из стекла или натуральной диатомовой земли (кизельгура), будут иметь размеры от 5 до 50 миллионных долей метра. Различные покрытия позволят им селективно связывать различные типы металлов. Например, сульфидно-органические покрытия притягивают ртуть, а медно-органические - мышьяк и радиоактивные металлы. Благодаря своим порам, частицы обладают огромной площадью поверхности на грамм веса.

Химики из Тихоокеанской северо-западной национальной лаборатории в Ричланде, Вашингтон (PNNL), уже разработали подобный материал, который они назвали SAMMS, это аббревиатура от "самособирающиеся монослойные и мезопористые подложки". "У нас в руках технология, которая реально позволяет очистить водоемы от загрязнения токсичными металлами, - сказал Ричард Скаггс (Richard Skaggs) инженер из PNNL. - С помощью него, нам удалось понизить уровень загрязнения водоемов радием в Вашингтоне, округ Колумбия, там, где не справились обычные технологии".

Частицы SAMMS могут не только впитывать токсичные металлы, но и связывать их, делая недоступными для микроорганизмов, таким образом, препятствуя их повторному попаданию в экосистему из мест захоронений. К тому же, благодаря малому весу частиц, удастся сократить размеры токсичных свалок.

Сегодня PNNL сотрудничает с такими компаниями как Steward Advanced Materials и PECO чтобы расширить спектр применения материала SAMMS в очистке выбросов и для других целей. Например, планируется применять его в сверхчувствительных детекторах токсинов. "Мы полагаем, что у SAMMS есть потенциал, чтобы осуществить революционное изменение в способах очистки токсичных отходов", - сказал Боб Джоунс (Bob Jones) менеджер Energy & Environmental Enterprises из Атланты.

Как известно, разработки в области топливных элементов для автомобилей ведутся давно. Машина, работающая от водорода, сможет проехать около 300 миль без дозаправки, при этом размеры и вес водородного "бака" не будет отличаться от традиционного бензинового. Однако массовый выпуск топливных элементов большой емкости, работающих в качестве водородных "баков", пока затруднен из-за того, что традиционные наполнители, связывающие водород, не обеспечивают нужной скорости его отдачи.

Исследователи из американской Тихоокеанской Северо-западной Национальной Лаборатории (Pacific Northwest National Laboratory) разработали компаунд на основе наноматериалов, способный впитывать водород и отдавать его в сто раз быстрее, чем это было возможно ранее.

Раньше физики предлагали использовать для хранения водорода боран аммиака, способный впитывать его и отдавать при нагреве менее, чем до 80 градусов Цельсия. Однако скорость выхода водорода у этого материала очень мала.

Рис. 5.19. Традиционные топливные элементы

Авторы новой работы открыли, что наноструктурированный боран аммиака выпускает водород в сто раз быстрее. Однако, чтобы получить возможность практического применения этого открытия, нужно было найти способ создания цельного наноструктурироанного материала в больших количествах.

Исследователи взяли в качестве базы кварцевый материал с мельчайшими порами, диаметром примерно 6,5 нанометров. В эти поры закачали раствор борана аммиака, который хорошо их пропитал благодаря капиллярным силам.

Затем растворитель удалили, а боран аммиака осел на стенках кварцевых пор, образовав нанопористый материал.

Преимущества нового материала не только в том, что он быстро отдает и вбирает водород. При его массовом производстве также не будет никаких токсичных выделений. Как говорят эксперты, новые топливные элементы на основе нанопористого борана аммиака побьют рекорд по официальному прогнозу развития водородной энергетики, так как емкость предполагаемых элементов 2010 года на основе традиционной технологии, гораздо ниже.

Также нанопористые материалы находят применение в катализе. Например, гидроксид алюминия используется для производства керамических материалов, широко применяется для приготовления катализаторов, а также является распространенным техническим адсорбентом и наполнителем полимеров. Среди множества методов получения этого продукта своей простотой и эффективностью отмечается гидротермический синтез. Целью настоящей работы являлось формирование пористых структур гидроксида алюминия при взаимодействии с водой электровзрывного нанопорошка алюминия.

Нанопорошок алюминия получали с помощью электрического взрыва проводников в среде аргона с добавкой водорода (10% об.) при давлении $1{,}52 \cdot 10^5$ Па, зарядном напряжении емкостного накопителя 24 кВ (диаметр проводника 0,3 мм, длина – 75 мм). Для сохранения устойчивости алюминия проводили пассивирование нанопорошка путем медленного окисления воздухом.

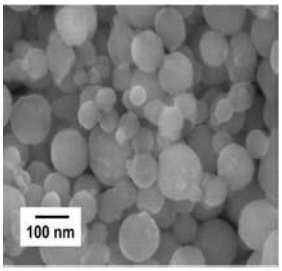
На основе электровзрывных нанопорошков и подогретой дистиллированной воды готовили водные суспензии при массовом соотношении H_2O:Al=25. Непрерывно перемешиваемая суспензия в термостойком стакане подогревалась до 64 – 66°С (магнитная мешалка с подогревом), после чего перемешивание суспензии продолжалось без нагревания (магнитная мешалка без подогрева). Значение температуры суспензии определяли, используя хромель-алюмелевую термопару (диаметр проводов 0,3 мм) и самописец КСП-4. После окисления алюминия избыток воды удалялся, а продукты высушивались на воздухе при +25°С.

Микроструктура исходных нанопорошков и продуктов гидротермического взаимодействия исследовалась с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM-6500F. Удельная площадь поверхности измерялась методом БЭТ (прибор ASAP2020). Для определения фазового состава использовался дифрактометр Rigaku D-MAX/B (CuKα-излучение). Твердофазные превращения в образцах изучались при помощи дифференциального термического анализа с использованием дериватографа Q-1500D в интервале 20°С–1000°С.

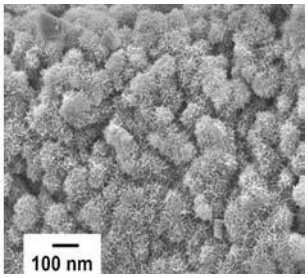
Химические свойства поверхности порошков алюминия играют важную роль в проявлении реакционной способности алюминия и в формировании структур конечных продуктов его взаимодействия с водой.

Во время экспериментов было установлено, что при непрерывном перемешивании нагретой до 64 – 66°С суспензии нанопорошка алюминия и отсутствии нагрева тепловой процесс характеризовался индукционным периодом (3-5 мин, уменьшение температуры на 5-7°С) и затем относительно резким увеличением температуры с достижением 92°С со скоростью 0,86 °С/сек. Визуально было зафиксировано изменение черной (Al) окраски суспензии до серой (цвет продукта) после достижения максимальной температуры суспензии.

Высушенный продукт представлял собой белый рыхлый порошок, рентгенограмма которого идентифицировалась как бемит состава AlOOH с включениями гидраргиллита (гиббсит) состава $Al(OH)_3$. Изучение фазовых превращений с помощью дифференциально-термического анализа показали, что при нагревании в интервале 60 – 120°С масса продукта уменьшается на 21%, а при нагревании свыше 290 – 400°С – еще на 16%



а



б

Рис. 5.20. Микрофотографии частиц: 3а – исходного нанопорошка алюминия; 3б – продукта взаимодействия нанопорошка алюминия с водой

Анализ микроструктуры поверхности нанопорошков алюминия показал, что частицы имели сферическую форму (рис.5.20а), при этом диаметр большинства частиц составлял менее 100 нм (Sуд=8,5-20,5 $м^2/г$). Микроструктура полученного гидроксида алюминия представлена сформировавшейся ячеистой структурой с преимущественным размером открытых пор 20 нм и стенками 5-10 нм (рис.3б). При этом площадь удельной поверхности образцов гидроксида алюминия составила 202.4 - 304.4 $м^2/г$.

Таким образом, с использованием водных суспензий электровзрывных нанопорошков алюминия при небольшом нагревании можно получить нанопористые структуры гидроксида алюминия. Такой метод представляет научный интерес как процесс трансформации одного твердого вещества (Al) в другое труднорастворимое вещество ($Al(OH)_3$). С точки зрения практики полученный продукт имеет практически одинаковые по размерам поры, разделенные очень тонкими стенками, что представляет интерес для систем фильтрования биологических жидкостей.

Ученые из Версальского Университета (Франция) совместно с иссле-

довательской группой Европейского синхротрона (European Synchrotron Radiation Facility) создали нанопористый материал, с очень большими внутренними порами (диаметром — 3,4 нм) и поверхностью 5,9 кв. метров на 100 миллиграммов.

Новый кристаллический материал, получивший название MIL-101 (где MIL расшифровывается как Materiaux de l'Institut Lavoisier), относится к классу металлооргаников с регулярной структурой (MOFs). Он может найти применение во многих процессах, включая химическую сепарацию, гетерогенный катализ и хранение газов. Детальное исследование его структуры проводилось путем рентгенографии с помощью Европейского синхротрона ESRF.

Преимущество нанопористых материалов с регулярной структурой в том, что они позволяют проходить через поры только определенным молекулам, что дает возможность проводить точную селекцию химических реакций. Другое их применение — это использование в качестве шаблонов для формирования монодисперсных наноматериалов. В этом плане увеличение диаметра пор расширяет диапазон доступных реагентов.

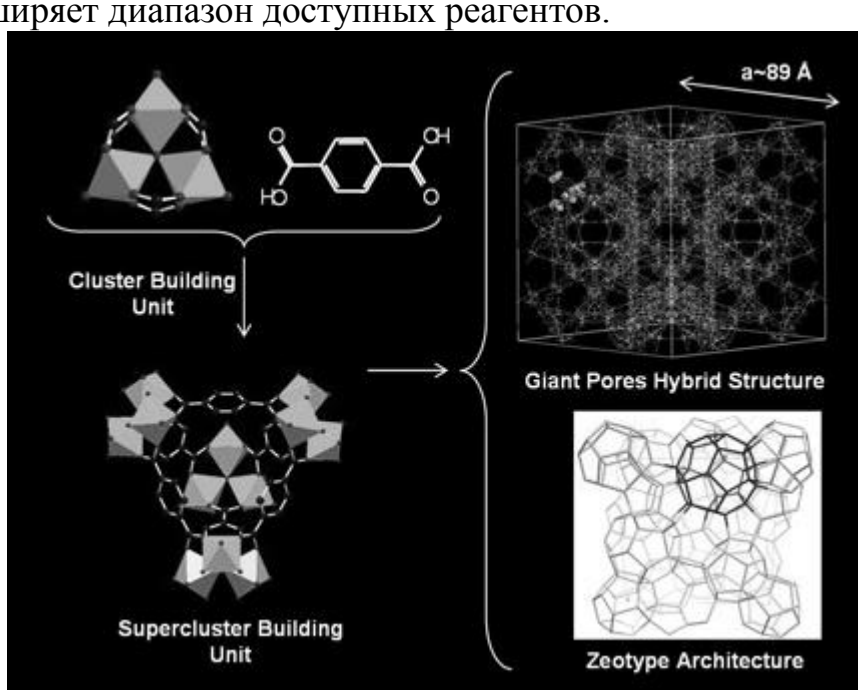


Рис. 5.21. Мультиатомная структура MIL-101.

В ходе создания MIL-101 ученые внесли три инновации, имеющие значение для процессов производства этого и подобных материалов. Во-первых, они научились создавать идентичные мульти-атомные «кирпичики» (рис 5.21). Во-вторых, объединять их в «строительные блоки». Например, для MIL-101 это суперкластер, состоящий из четырех «кирпичиков» и связывающих их органических компонентов, для придания кластеру тетраэдрической формы. И, в-третьих, они нашли способ предсказывать свойства нового материала, исходя из известных свойств одного «строительного блока» этого материала.

5.4.3.Нанопористые углеродные материалы из химически модифицированных антрацитов

С целью разработки новых методов синтеза нанопористых углеродных материалов из доступного и относительно недорогого сырья - антрацитов были исследованы процессы их химической модификации и последующей активации водяным паром или CO_2. [4] Было также установлено влияние условий химической модификации минеральными кислотами ($HClO_4$, HNO_3, H_2SO_4) антрацитов некоторых месторождений России и Украины на текстурные характеристики и сорбционные свойства пористых углеродных материалов (ПУМ), полученных термической обработкой модифицированных образцов.

Для исследования углеродных материалов были использованы методы рентгеновской дифракции, электронномикроскопический, ДТА, РФЭС, ИКС с Фурье преобразованием, БЭТ.

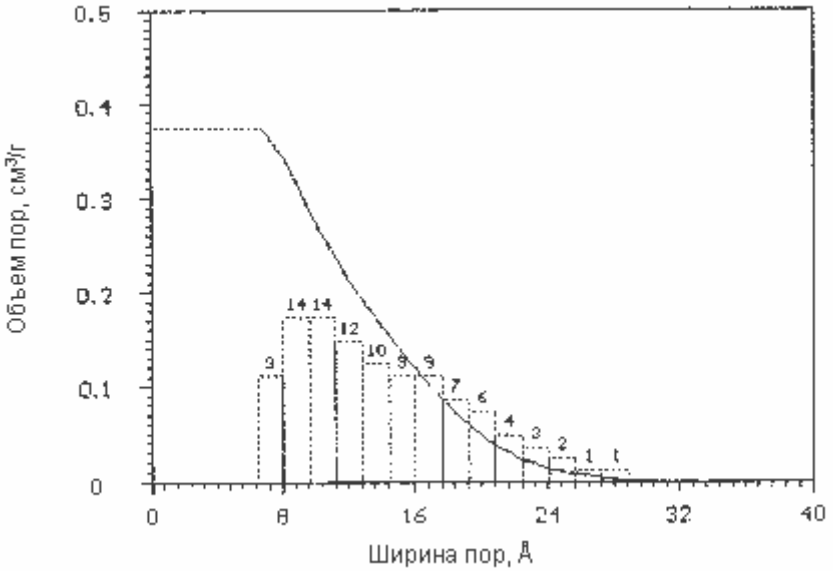


Рис.5. 22. Распределение микропор по размерам в пористом углеродном материале, полученном термообработкой химически модифицированного антрацита (из данных по адсорбции N_2 при 77К).

Предварительная химическая модификация антрацитов существенно изменяет их состав и структуру. При обработке антрацитов хлорной кислотой или перхлоратом магния происходит частичное окисление углеродной поверхности, внедрение перхлорат-анионов в межпоровое пространство и связывание хлора с углеродной матрицей. При активации модифицированных антрацитов CO_2 или H_2O хлор высвобождает межпоровое пространство, способствуя формированию развитой нанопористой структуры активированного антрацита. Варьированием условий синтеза получены активированные антрациты с поверхностью до 1000 $м^2$/г, низкой зольностью и контролируемым распреде-

[4] Нанопористые углеродные материалы из химически модифицированных антрацитов
Б.Н. Кузнецов, Н.В. Чесноков, Т.П. Милошенко Лаборатория каталитической химии

лением пор по размерам. Были найдены условия обработки антрацитов минеральными кислотами, обеспечивающие их полное растворение и последующее образование новой углеродной фазы при высаждении из раствора. Кратковременная (несколько минут) термообработка полученного углеродного материала при 900°С приводила к образованию ПУМ с развитой поверхностью.

Как видно из вышеизложенного, нанопористые материалы находят широкое применение в промышленности. Также разработаны катализаторы химических реакций, селективные нанофильтры, позволяющие разделять химические смеси на молекулярном уровне. Благодаря увеличивающемуся потенциалу технологий, производство наноматериалов приведёт к снижению их стоимости и широкому распространению как в производстве (катализаторы, промышленные фильтры), так и в быту (самоочищающиеся покрытия, фильтры для питьевой воды, аккумуляторы).

5.5. Методы получения и свойства углеродных нанотрубок

Возможно, более интересными наноструктурами с широким потенциалом применения являются углеродные нанотрубки. Углеродную нанотрубку можно представить себе как лист графита, свернутый в цилиндр. На рис .5.23 показано несколько возможных структур, образованных сворачиванием графитового листа вокруг разных осей. Однослойная нанотрубка может иметь диаметр 2 нм и длину 100 микрон, что делает ее квазиодномерной структурой, способной служить нанопроволокой.

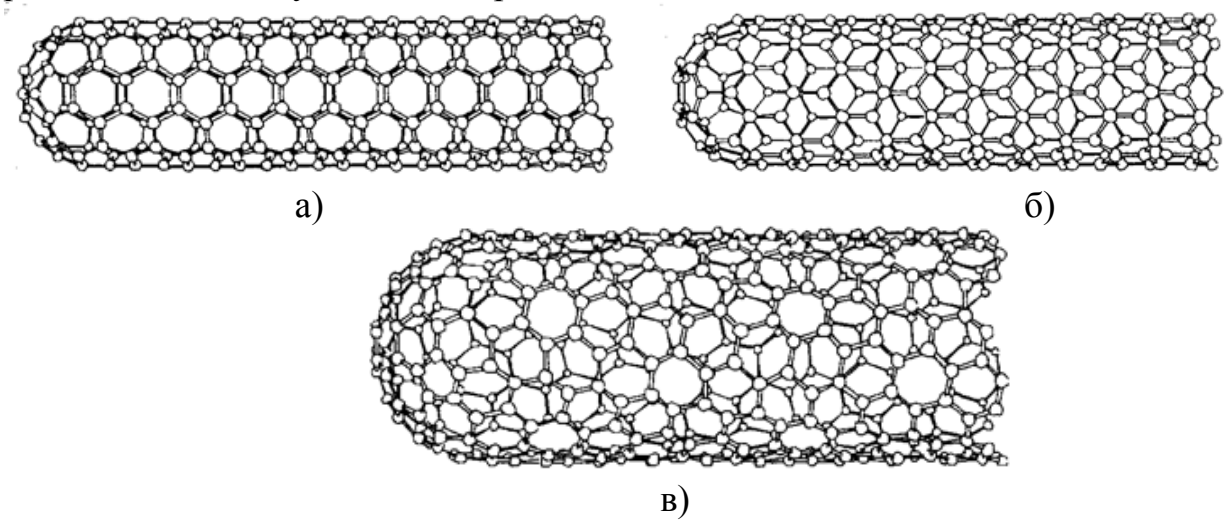


Рис. 5.23 Примеры некоторых из возможных структур углеродных нанотрубок, зависящих от способа сворачивания графитового листа: а) - креселтная структура; б) – зигзагообразная структура; в) хиральная структура

5.5.1.Методы получения

Углеродные нанотрубки можно получить лазерным испарением, углеродной дугой и химическим осаждением паров. На рис.5.12 показана уста-

новка для производства нанотрубок лазерным испарением. Кварцевая труба, содержащая газообразный аргон и мишень из графита, нагревается до 1200°С. Внутри трубки, но за пределами печи находится охлаждаемый водой медный коллектор. Графитовая мишень содержит небольшие количества кобальта и никеля, выступающие в качестве каталитических зародышей образования нанотрубок. При попадании высокоинтенсивного пучка импульсного лазера на мишень графит испаряется. Поток аргона выносит атомы углерода из высокотемпературной зоны к охлаждаемому медному коллектору, на котором и происходит образование нанотрубок. Таким методом можно получить трубки диаметром 10-20 нм и длиной 100 микрон.

Нанотрубки можно синтезировать, используя и углеродную дугу. К электродам из углерода диаметром 5-20мм, разнесенным на расстояние около 1 мм, в потоке гелия при давлении 500 Торр прикладывается напряжение 20 - 25 В. Атомы углерода вылетают из положительного электрода и образуют нанотрубки на отрицательном, при этом длина положительного электрода уменьшается, а на отрицательном электроде осаждается углеродный материал. Для получения однослойных нанотрубок в центральную область положительного электрода добавляют небольшие количества кобальта, никеля или железа в качестве катализаторов. Если не использовать катализаторы, получаются вложенные или многослойные нанотрубки, то есть нанотрубка внутри нанотрубки, как показано на рис. 5.24. Дуговым методом можно получить однослойные нанотрубки диаметром 1 - 5 нм и длиной порядка 1 мкм.

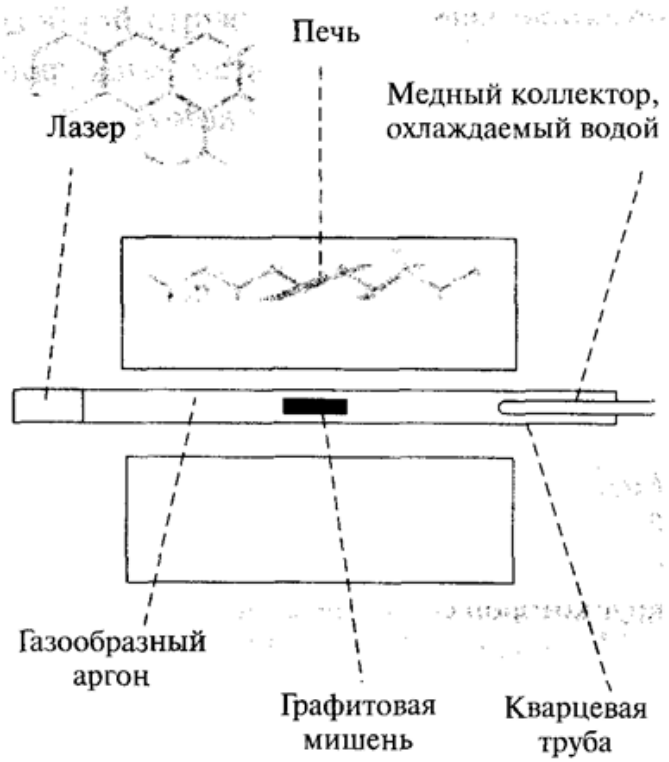


Рис.5.24. Экспериментальная установка для синтеза углеродных нанотрубок лазерным испарением

Метод химического осаждения из паровой фазы заключается в разложении газообразного углеводорода, например, метана (CH_4), при температуре 1100°С. При разложении газа образуются свободные атомы углерода, конденсирующиеся затем на более холодной подложке, которая может содержать разнообразные катализаторы, такие как железо. Этот процесс позволяет получать продукт непрерывно и, возможно, является наиболее предпочтительным для увеличения масштабов при промышленном производстве.

Механизм роста нанотрубок до сих пор неясен. Так как для роста однослойных трубок необходим металлический катализатор, механизм должен объяснять роль атомов кобальта или никеля. Одно из предложений, называемое «механизмом скутера», состоит в том, что атомы металлического катализатора присоединяются к оборванным связям на открытом конце трубки и обегая ее по краю, способствуют захвату атомов углерода из паровой фазы и их встраиванию в стенку трубки.

Обычно при синтезе получается смесь нанотрубок разных типов с различным характером и величиной электропроводности. Группа из IBM разработала метод отделения полупроводящих нанотрубок от металлических. Для разделения смешанные пучки нанотрубок осаждают на кремниевую подложку, а затем на эти пучки напыляют металлические электроды. Используя подложку как электрод, на него подают небольшое напряжение смещения, запирающее полупроводниковые трубки и эффективно превращающее их в изоляторы. Затем между металлическими электродами прикладывается высокое напряжение, создающее большой ток в металлических нанотрубках, что приводит к их испарению, после чего на подложке остаются только полупроводниковые нанотрубки.

5.5.2.Структура

Углеродные нанотрубки могут иметь различную атомную структуру, причем трубки разной структуры имеют разные свойства. Хотя углеродные нанотрубки в действительности и не образуются путем сворачивания графитовых плоскостей, разные структуры трубок можно разъяснить, рассматривая мысленные способы сворачивания графитового листа в цилиндр. Так, например, нанотрубку можно получить сворачивая графитовый лист вокруг оси Т, показанной на рис.5.25. Вектор C_h перпендикулярен Т и направлен вдоль окружности трубки. Три примера структуры нанотрубок, получающихся при сворачивании графитового листа вокруг вектора Т, по разному ориентированного относительно базисных направлений графитовой плоскости, показаны на рис.5.25. Когда вектор Т перпендикулярен С - С связям в углеродных шестиугольниках, образуется структура, показанная на рис.5.23а и называемая кресельной. Трубки, показанные на рис. 5.23б и 5.23в, называют соответственно трубками зигзаговой и хиральной структуры. Они образуются сворачиванием вокруг других ориентации вектора Т относительно графитового листа. Рассматривая трубку хиральной структуры, можно увидеть спираль-

ный ряд атомов углерода. Обычно нанотрубки закрыты с обоих концов, что требует введения пятиугольных топологических структур на каждом конце цилиндра. По существу, трубка является цилиндром, каждый конец которого закрыт половинкой большой фуллереноподобной структуры. В случае одностенной нанотрубки на ее концах можно обнаружить металлические частицы, что свидетельствует в пользу каталитической роли атомов металла в формировании структуры трубки

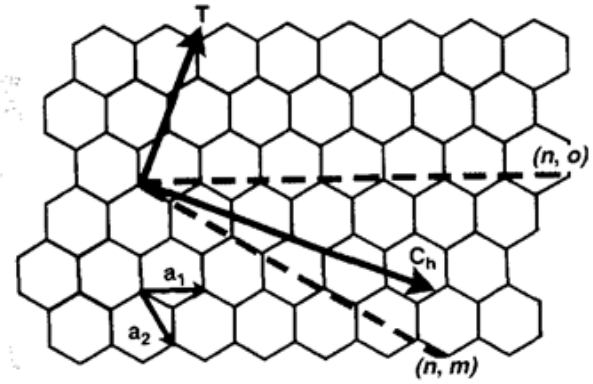


Рис. 5.25. На графическом листе показаны базисные вектора a_1 и a_2 двумерной элементарной ячейки, направление оси T, вокруг которой сворачивается лист при образовании нанотрубки кресельной структуры, показанной на рис. 5.23.а, и перпендикулярное вектору T направление C_h вдоль окружности трубки. При других ориентациях вектора T образуются зигзаговые и хиральные трубки, показанные на рис.5.23б и 5.23в соответственно

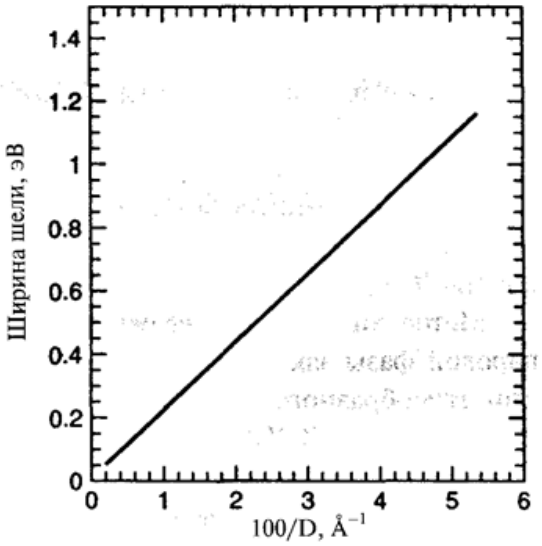


Рис.5.26. Зависимость ширины запрещенной зоны полупроводящей хиральной нанотрубки от обратного диаметра трубки ($10A^0$= 1 нм)

5.5.3. Электрические свойства

Наиболее интересное свойство углеродных нанотрубок заключается в том, что они могут быть металлическими или полупроводящими в зависимости от их диаметра и хиральности. Термин хиральность относится к направлению сворачивания трубки относительно графитового листа, как описано выше. В результате синтеза обычно получается смесь трубок, две трети которых имеют полупроводящие свойства, и одна треть — металлические. Металлические трубки обычно имеют кресельную структуру, показанную на рис. 5.23 а.

На рис. 5.26 приведена зависимость ширины щели полу проводящих нанотрубок от их обратного диаметра, показывающая, что при увеличении диаметра трубки щель уменьшается. Для исследования электронной структуры углеродных нанотрубок использовалась сканирующая туннельная микроскопия (СТМ) в режиме локальной электронной спектроскопии. В этих измерениях положение зонда фиксировалось над нанотрубкой, и регистрирова-

лась зависимость туннельного тока / от напряжения *V*, приложенного между зондом и нанотрубкой. Найденная таким образом проводимость $G = I/V$ напрямую связана с локальной плотностью электронных состояний . Она является мерой того, насколько близко уровни энергии лежат друг к другу.

На рис. 5.27 показаны данные СТМ-спектроскопии в виде зависимости нормализованной дифференциальной проводимости $(dI/dV)/(I/V)$ от приложенного между трубкой и зондом напряжения *V*. Для верхнего спектра $(dI/dV)/(I/V) = 1$ в широкой области *V*, что означает выполнение закона Ома. Из нижнего графика ясно следует наличие энергетической щели в материале. Она расположенной в области энергий, которая соответствует малым приращениям тока. Ширина этой области по напряжению является мерой величины щели. Для полупроводника, показанного на нижнем графике рис. 5.27, она составляет 0,7 эВ.

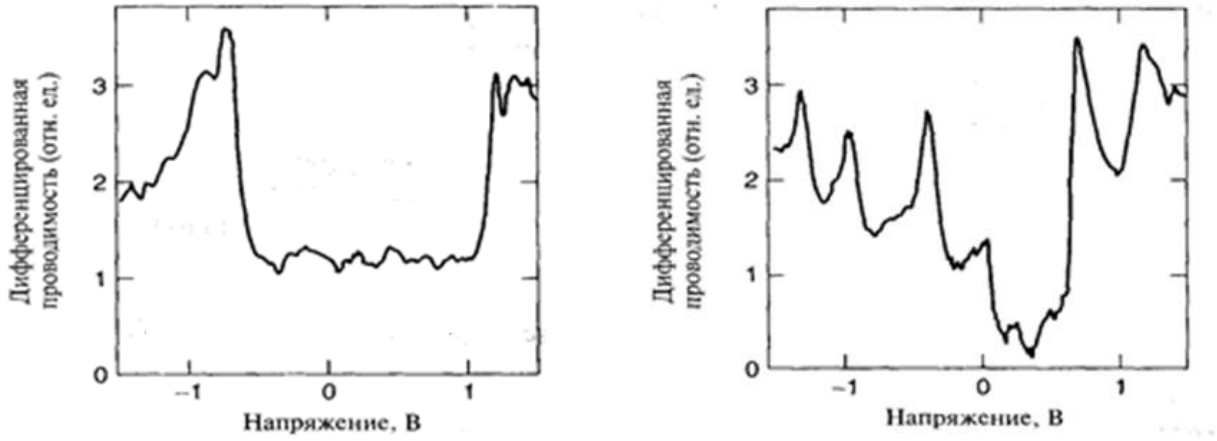


Рис. 5.27. Зависимость нормальной дифференциальной проводимости $(dI/dV)/(I/V)$ от приложенного напряжения, полученная в ходе сканирования по тунельному току на сканирующем тунельном микроскопе металлической (а) и полупроводниковой (б) нанотрубки

При больших напряжениях V наблюдаются острые пики в плотности состояний, называющиеся сингулярностями ван-Хоффа и характеризующие проводящие материалы низкой размерности. Пики появляются на дне и потолке множества подзон. Как уже обсуждалось выше, электроны в квантовой теории можно рассматривать как волны. Если длина волны электрона не укладывается целое число раз на длине окружности трубки, она интерферирует сама с собой с погашением, так что разрешены только такие длины волн электронов, которые укладываются целое число раз на периметре трубки. Это сильно ограничивает количество состояний, пригодных для проводимости вокруг цилиндра. Доминирующим направлением проводимости остается направление вдоль трубки, что функционально делает углеродную нанотрубку одномерной квантовой проволокой. Электронные состояния трубки не образуют одной широкой непрерывной энергетической зоны, а разбиваются на одномерные подзоны, наблюдаемые на рис. 5.27. Как будет показано далее,

такие состояния можно моделировать квантовой ямой в виде колодца с глубиной, равной длине нанотрубки.

Магнитосопротивлением называется явление, в котором электросопротивление вещества меняется при наложении постоянного магнитного поля. Углеродные нанотрубки при низких температурах демонстрируют магниторезистивный эффект. На рис.5.28 показан график зависимости изменения относительного сопротивления нанотрубки от приложенного магнитного поля при 2,3 К и 0,35 К. Это — отрицательный магниторезистивный эффект, так как сопротивление уменьшается при увеличении магнитного поля, а обратная величина -проводимость $G = 1/R$ — увеличивается. Такой эффект является следствием того, что приложенное к трубке магнитное поле приводит к появлению новых энергетических уровней электронов, связанных с их спиральным движением в поле. Оказывается, что для нанотрубок эти уровни, называемые уровнями Ландау, находятся очень близко к наивысшему из заполненных уровней (уровню Ферми). Другими словами, появляется большее количество возможных состояний для увеличения энергии электронов, что повышает проводимость материала.

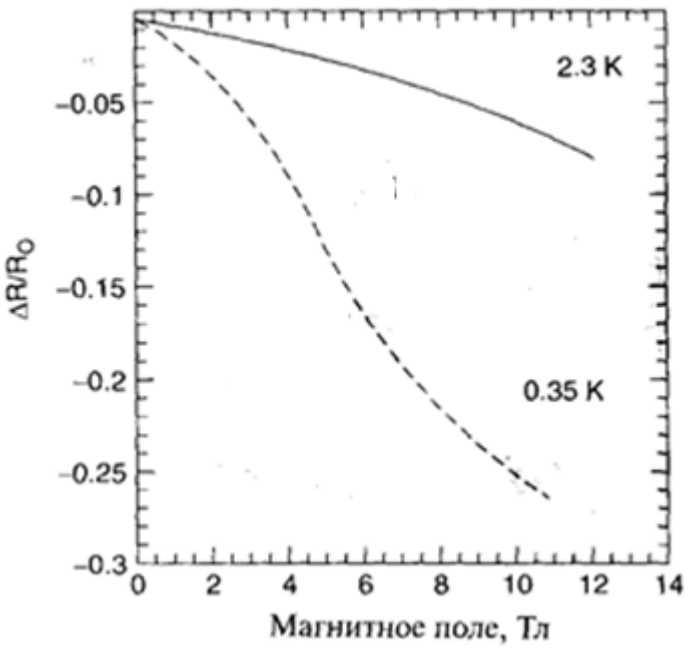


Рис. 5.28. Влияние постоянного магнитного поля на сопротивление нанотрубки при 0,35 и 2,3 К

5.5.4. Механические свойства

Углеродные нанотрубки очень прочны. Если к концу тонкой проволоки, прикрепленной к потолку комнаты, присоединить вес *W*, то проволока растянется. Механические напряжения *S* в проволоке определяются как отношение нагрузки, или веса, к поперечному сечению *A* проволоки:

$$\sigma = \frac{W}{A}$$

Относительная деформация ε определяется как отношение удлинения ΔL проволоки к ее длине *L:*

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

где L — длина проволоки перед нагружением. Закон Гука утверждает, что увеличение длины проволоки пропорционально силе, приложенной к концу проволоки.

В более общем виде говорят, что напряжение σ пропорционально относительной деформации ε:

$$\sigma = E\varepsilon$$

Коэффициент пропорциональности $E = LW/A\ \Delta L$ называется модулем Юнга и является свойством конкретного материала, характеризующим его упругость. Чем больше значение модуля Юнга, тем материал менее податлив. Модуль Юнга стали примерно в 30000 раз больше, чем резины. Модуль Юнга углеродных нанотрубок колеблется от 1,28 до 1,8 ТПа. Один терапаскаль (ТПа) примерно в 10^7 раз больше атмосферного давления. Модуль Юнга стали составляет 0,21 ТПа, что означает — модуль Юнга углеродной нанотрубки почти в десять раз больше, чем у стали. Это подразумевает, что углеродная нанотрубка очень жесткая и трудно сгибаемая. Однако это не совсем так из-за того, что трубка очень тонка. Отклонение пустого цилиндрического стержня длиной L, внутренним радиусом r_i- и внешним радиусом r_0 под действием силы F, приложенной к его концу нормально к оси, дается выражением:

$$D = \frac{FL^3}{3EI}$$

где I — момент инерции сечения стержня, равный в данном случае $\pi(r_0^4 - r_i^4)/4$. Так как толщина стенки однослойной нанотрубки составляет примерно 0.34 нм, значение $r_0^4 - r_i^4$ очень мало, что отчасти компенсирует большое значение E.

Углеродная нанотрубка очень упруга при изгибе. Она гнется как соломинка, но не ломается и может распрямиться без повреждений. Большинство материалов ломаются при изгибе из-за присутствия дефектов, таких как дислокации и границы зерен. Так как стенки углеродных нанотрубок имеют мало структурных дефектов, этого не происходит. Другая причина того, что они не ломаются, состоит в том, что углеродные кольца стенок в виде почти правильных шестиугольников при изгибе меняют свою структуру, но не рвутся. Это является уникальным следствием того факта, что углерод-углеродные связи sp^2 гибридизированы и могут перегибридизироваться при изгибе. Степень изменения и коэффициенты s-p смешивания зависят от того, насколько изогнуты связи.

Разумеется, прочность и жесткость — не одно и то же. Модуль Юнга является мерой жесткости или упругости материала. Предел прочности характеризует необходимое для разрыва напряжение. Предел прочности однослойной углеродной нанотрубки составляет 45 ГПа, в то время как стальные сплавы разрушаются при 2 ГПа. Таким образом, углеродные нанотрубки

примерно в 20 раз прочнее стали. Многослойные нанотрубки тоже имеют лучшие, чем у стали, механические характеристики, но они не так высоки, как у однослойных нанотрубок. Например, многослойная нанотрубка диаметром 200 нм имеет предел прочности 0,007 ТПа (7 ГПа) и модуль Юнга 0,6 ТПа.

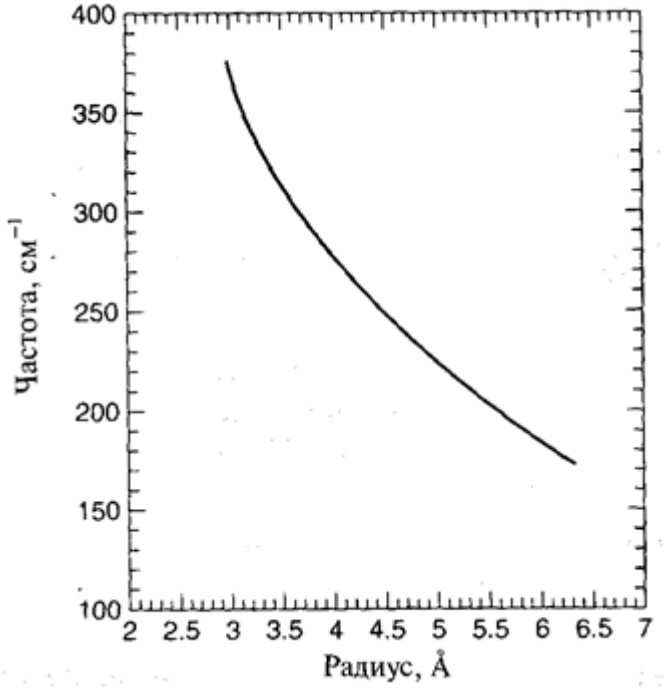


Рис.5.29. Зависимость частоты рамановской колебательной моды A_{lg} от радиуса нанотрубки

5.6..Проблема безопасности нанотехнологии

Развитие новых технологий всегда несет опасность новых угроз для человека.

Так появление компьютеров привело к новым видам психических заболеваний, связанных с неумеренным общением с компьютерами, а пагубное воздействие излучений от сотовых телефонов является до сих пор темой дискуссии между медиками и выпускающими эти самые телефоны фирмами.

Нанотехнологии, также как ядерное и химическое оружие, высокотехнологичные системы и аппараты, атомные станции несут в себе возможность глобальных техногенных катастроф, которые могут привести человечество к гибели или возникновению новой заразы (типа СПИДа), от которой нелегко будет избавиться.

Итак, существует угроза от:

• нанороботов, которые собираются запускать в сосуды человека для диагностики, нанохирургии и адресной доставки лекарств (неконтролируемое действие и спонтанное выполнение незапланированных операций, возможность захвата управления нанохакерами);

• новых видов лекарств, разработанных с помощью нанотехнологий и молекулярно-генной инженерии (непредсказуемость влияния на здоровье последующих поколений и невозможность их нейтрализации из-за аномально высокого уровня воздействия);

• наноматериалов (отдаленные последствия влияния нанокомпонентной составляющей; аллергические реакции на активные наночастицы, проникающие в организм через кожные покровы и дыхательные пути);

• военных нанороботов и наноружия (использование террористами, ошибочное нападение на население, сбои в системах управления);

• репликаторов (неконтролируемые репликаторы, «серая слизь», «суперчервь» и другие возможные «отклонения» в работе нанофабрик);

• массового количества применяемых наноустройств и трудности контроля их функционирования, возможности выполнения неоднозначных функций при взаимодействии различных наноустройств;

• некомпетентности или влияния «человеческого фактора» при использовании наноустройств.

В политических, деловых, финансовых и научных сферах в настоящее время уже предпринимаются конкретные шаги по заблаговременному поиску способов борьбы с потенциальными опасностями нанотехнологий. Едва ли не первыми встрепенулись, естественно, страховые компании, сама суть бизнеса которых - работа с рисками. Одна из ведущих фирм вторичного страхования, швейцарская Swiss Re, опубликовала аналитическое исследование «Нанотехнология: мелкие материи, множество неизвестных». Один из главных выводов отчета сводится к тому, что ни специалисты, ни общество в целом пока не имеют никаких твердых знаний для оценки последствий внедрения нанотехнологий.

Ныне всерьез относятся к рискам нанотехнологий и на высшем политическом уровне. Весной этого года Европейская Комиссия опубликовала отчет по результатам организованного ею международного семинара «Очерчивая нанориски», на котором обсуждались не гипотетические угрозы, а более чем реальные для здоровья и окружающей среды опасности от наноматериалов, с которыми столкнется общество уже через три-пять лет. Главные выводы семинара: важно делать различия между свободными и зафиксированными наночастицами, поскольку фиксированные на своих местах частицы представляют намного меньше угроз из-за своей неподвижности; с частицами наноразмеров следует быть столь же осторожными в обращении, как и с любыми химикатами; уже назрела необходимость создания специального института, занимающегося общим мониторингом нанотехнологий.

5.7. Постановка задач развития нанотехнологий в России

Сегодня наша страна отстает от ведущих стран на 10-15 лет по базовым технологиям микроэлектроники, имеется в виду обеспечение промышленного выпуска изделий. Судя по прогнозируемым темпам роста, это отставание с

каждым годом будет увеличиваться. Это утверждение относится к развитию «сверху-вниз», т.е. по пути совершенствования современных технологий, по которому идут развитые страны.

Однако ситуация с наноэлектроникой несколько иная, так как мировое ее развитие находится в начальной стадии.

К настоящему времени в России имеется реальная возможность занять одно из ведущих мест в этой области. Такое заключение сделано на основе следующих предпосылок:

- имеется технологическая и производственная база для создания сканирующих зондовых устройств позиционирования и локализации воздействия на нанометровом уровне (фирма «НТ - МДТ», г. Зеленоград);

- разработан широкий набор материалов с наноструктурными свойствами и ведутся исследования по формированию приборных структур (оптоэлектроника, магнитоэлектроника);

- создан значительный задел по технологическому базису разработки и выпуска наноэлектронных интегральных схем (АЦП, умножители частоты, логические вентили) на эффекте резонансного туннелирования в квантовых ямах, нанотранзисторов на квантовых точках (Институт СВЧ-приборов РАН);

- довольно широк спектр исследований по нанотехнологиям в институтах РАН, вузах и специализированных НИИ (правда, эти исследования разрознены и нуждаются в координации и комплексной оптимизации целей и состава выполняемых работ);

- близок к завершению запуск технологического синхротронного источника (НИИФП им. Лукина, Зеленоград), как эффективного источника коротковолнового излучения, необходимого для создания топологических рисунков нанометрового масштаба.

Последние достижения российских ученых по демонстрации возможности формирования с помощью синхротронного излучения субмикронных рисунков позволяют говорить о том, что Россия может стать обладателем рыночной технологии производства наноштампов к 2010-2015 году.

Другое направление - сочетание зондовых методов и технологии самоорганизации, которое поддерживается широким спектром исследований в академической науке и вузах.

Комбинирование методов импринтинга и самоформирования уже сегодня позволяет формировать упорядоченные наноструктуры с периодом трансляции порядка 20 нм (ФТИ им. А.Ф. Иоффе, С.-Петербург). Однако до сегодняшнего дня не оптимизированы конструкции штампов и методы импринтинга на больших площадях. Прорыв в этой области прогнозируется после разработки промышленной технологии создания наноштампов, т.е., как указывалось выше, к 2010 - 2015 году.

Еще одно направление - это технологии, связанные с получением и использованием углеродных нанотрубок, а также нанопористых материалов с управляемыми размерами и конфигурацией пор.

В области приборных разработок - это освоение широкого диапазона, где наши позиции в области лазеров длинноволнового ИК-диапазона достаточно прочные. Это сенсоры химические и чувствительные к колебаниям в терагерцовой области, это системы отображения информации и приборы интегральной эмиссионной наноэлектроники. Два последних класса приборов базируются на использовании углеродных нанотрубок. При этом, как отмечалось выше, эмиссионная наноэлектроника представляет большой интерес для спецприменений.

Технология химической самосборки, идеология которой разрабатывается в России, еще одно перспективное направление, где отечественный уровень соответствует мировому.

Как следует из проведенного анализа, Россия обладает необходимыми научными ресурсами для того, чтобы занять одно из ведущих мест в нанотехнологии, развитие которой будет проходить от создания нанолитографических методик через разработку самоформирующихся упорядоченных сред к локальному управляемому синтезу наноструктур на атомарном уровне.

Как показывают оценки, наиболее перспективным и менее затратным направлением использования наноструктур являются фотонные нанокристаллы.

Трехмерные нанокомпозиты со свойствами фотонных кристаллов (более строго - материалы с фотонной запрещенной зоной - МФЗЗ) имеют достаточно широкий спектр свойств благодаря различным физическим механизмам работы нанокомпозиты (квантовые точки, трехмерные сверхпроводниковые структуры, диоды Шоттки, Джозесоновские контакты и т. д.). В ближайшем будущем ожидается создание новых классов электронных приборов и элементов: оптоэлектронные приборы, полупроводниковые приборы, счетчики элементарных частиц, магнитоэлектронные приборы, генераторы и усилители гигагерцового диапазона (>> 20 ГГц), активные элементы лазеров и т. д.

Проведенные теоретические рассмотрения физических характеристик фотонных наноструктур можно положить в основу разработки технологической базы производства фотонных кристаллов и необходимых материалов для оптоэлектроники и различных разделов наноэлектроники (включая молекулярную 3-мерную электронику и нанофотонику) с организацией научных исследований и развитием следующих направлений:

- идентификация изображения в реальном времени для высокоскоростных систем контроля и обработки в специальных системах, включая микроботы;
- фотодетекторы и матричные фотоприемники расширенного спектрального диапазона с низким уровнем шумов;
- эффективная обработка и отображение 3-мерной информации;
- защита информационных сетей и коммуникаций;

2-мерная и 3-мерная система оптической памяти интегрированной с нейросетями, адаптированной с элементами интеллекта.

В общем виде основные ожидаемые практические результаты от разработки нанотехнологий и структур представлены в табл. 5.1

Таблица 5.1

Области применения наноструктур

Структуры	Области применения	
	Реализованные, 2014 г.	Перспективные, 2025-2030 гг.
Наноструктурированные слои и материалы	Тепловая защита, покрытия с низким коэффициентом отражения; Оптические (видимый и УФ диапазон) фильтры; Высококачественная полиграфия (чернила на основе наноструктур); Специальные абразивные покрытия	Многофункциональные нанопокрытия, в т.ч. обеспечивающие скрытность объектов для любого вида облучения (от акустического до УФ); Запоминающие среды; Высокопрочные легкие конструкционные материалы
Материалы с высокой удельной площадью поверхности	Молекулярные фильтры и иммобилизаторы; Медицинские препараты; Селективные катализаторы и нейтрализаторы вредных веществ; Адсорбционные материалы	Молекулярно-селективные сенсоры; Фильтры макромолекул и бактерий; Накопители энергии (в т.ч. биологические)
Нанокомпозиционные материалы	Магнитные материалы с низкими потерями (GMR); Сверхтвердые покрытия; Нанокомпозиционные клеи и цементы	Суперпластичные керамические Материалы; Магнитные охладители; Наполненные нанокристаллами полимеры
Наноприборы	Считывающие головки на GMR; Лазеры на сверхрешетках; Одноэлектронные транзисторы, резонансно-туннельные приборы; СВЧ-транзисторы на гетеропереходах	Терабитная память и микропроцессоры; Биомедицинские сенсоры; Лазеры с пониженными порогами и шумами; Катоды из нанотрубок для дисплеев высокой яркости и приборов эмиссионной наноэлектроники

Комплексные биологические структуры	Биокатализаторы; Биочипы для контроля загрязнений и идентификации веществ	Биоэлектроника; Биосовместимые (вживляемые) протезы. Адресная доставка медицинских препаратов для генной терапии; Сенсоры для регистрации отдельных молекул; Конструирование молекул

Особое внимание следует уделить созданию единого научно-технологического комплекса по разработке и выпуску СВЧ приборов с частотным диапазоном свыше 100 ГГц на базе нанотехнологий при объединении усилий РАН и промышленности (ИСВЧП РАН, Москва, «Исток», Фрязино).

Так как работы по широкому спектру нанотехнологий в настоящее время в большей степени носят фундаментально-поисковый характер, то целесообразно подготовку и реализацию государственной программы по нанотехнологиям провести через Министерство науки и образования.