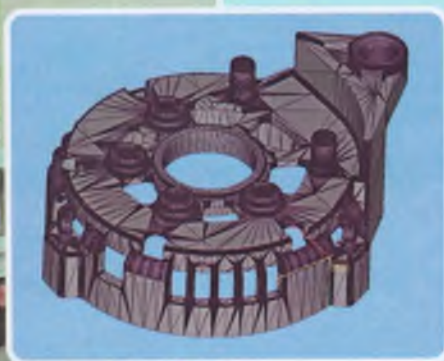


А.И. Грабченко, Ю.Н. Внуков, В.Л. Доброскок,  
Л.И. Пупань, В.А. Фадеев

# ИНТЕГРИРОВАННЫЕ ГЕНЕРАТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ



Учебное пособие

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ,  
МОЛОДЕЖИ И СПОРТА УКРАИНЫ  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
«ХАРЬКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»

ЗАПОРОЖСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

А. И. Грабченко, Ю. Н. Внуков, В. Л. Доброскок,  
Л. И. Пупань, В. А. Фадеев

## **ИНТЕГРИРОВАННЫЕ ГЕНЕРАТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

*Под редакцией д-ра техн. наук, проф. А. И. Грабченко*

Рекомендовано Министерством образования и науки Украины  
как учебное пособие для студентов высших учебных заведений  
по специальности «Технология машиностроения»

Харьков  
НТУ «ХПИ»  
2011

УДК 621(075)

ББК 345я7

И73

Рецензенты:

*Ф. Я. Якубов*, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой, ректор Крымского государственного инженерно-педагогического университета

*В. А. Залого*, д-р техн. наук, зав. кафедрой Сумского университета

Авторы:

*А. И. Грабченко, Ю. Н. Внуков, В. Л. Доброскок, Л. И. Пупань, В. А. Фадеев*

Гриф присвоен Министерством образования и науки Украины,  
письмо № 1/11-8813 от 22.09.2010 г.

У навчальному посібнику викладаються інтегровані генеративні технології макро-, мікро- і нанорівнів. Розглянуто сучасні тенденції розвитку машинобудівного виробництва, технології пошарового вирощування виробів або їх частин як реалізацію парадигми виготовлення «знизу-вгору», що має величезний потенціал вдосконалення виробництва. Відбиті світовий досвід і досягнення в області інтегрованих технологій.

Призначено для студентів вищих навчальних закладів.

**Интегрированные генеративные технологии** : учеб. пособие И73 [для студ. выс. учеб. заведений] / А. И. Грабченко, Ю. Н. Внуков, В. Л. Доброскок [и др.] ; под ред. А. И. Грабченко. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2011. – 416 с.

ISBN

В учебном пособии излагаются интегрированные генеративные технологии макро-, микро- и наноуровней. Рассмотрены современные тенденции развития машиностроительного производства, технологии послойного выращивания изделий или их частей как реализацию парадигмы изготовления «снизу-вверх», имеющей огромный потенциал совершенствования производства. Отражены мировой опыт и достижения в области интегрированных технологий.

Предназначено для студентов высших учебных заведений.

Ил. 156. Табл. 26. Библиогр. 79 назв.

**ББК 345я7**

ISBN

© А. И. Грабченко, Ю. Н. Внуков,  
В. Л. Доброскок, Л. И. Пупань,  
В. А. Фадеев, 2011

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	13
<b>Раздел 1 Интегрированные генеративные технологии и их место в современном производстве.....</b>	<b>16</b>
1.1 Основные тенденции развития современного производства .....	16
1.2 Интегрированные технологии современного производства и их составляющие .....	24
1.3 Интегрированные генеративные технологии и их уровни .....	30
1.4 Вопросы для самостоятельного контроля .....	36
<b>Раздел 2 Физические основы послойного выращивания изделий .....</b>	<b>37</b>
2.1 Процессы послойной материализации 3D электронного образа изделий .....	37
2.2 Генерирование из жидкой фазы .....	38
2.3 Генерирование из твердой фазы .....	40
2.4 Генерирование из газовой фазы .....	45
2.5 Генерирование из плазмы .....	46
2.6 Другие методы генерирования .....	47
2.7 Элементы, образующие слои при генерировании изделия.....	48
2.8 Вопросы для самостоятельного контроля .....	50
<b>Раздел 3 Генеративные интегрированные технологии макроуровня.....</b>	<b>51</b>
3.1 Место интегрированных генеративных технологий макроуровня в создании изделий.....	51

3.2 Структура генеративных технологий макроуровня .....	53
3.3 3D CAD моделирование и создание электронного образа (модели) послойного изделия .....	58
3.4 Системы 3D CAD моделирования в генеративных технологиях .....	61
3.4.1 Машиностроительные САПР .....	61
3.4.2 Система Power Solution (Delcam) .....	62
3.4.3 Система Unigraphics (Unigraphics Solution).....	62
3.4.4 Система CATIA (Dassault Systemes) .....	63
3.4.5 Система Pro/Engineer (Parametric Technology Corporation) .....	63
3.4.6 Системы САПР среднего уровня.....	63
3.4.7 Описание 3D образов изделий STL-файлами .....	64
3.5 Общие черты генеративных способов материализации 3D CAD моделей изделий.....	65
3.6 Сущность основных генеративных способов материализации 3D CAD модели изделий.....	66
3.6.1 SLA (Stereo Lithographies Apparatus) – лазерная стереолитография .....	66
3.6.2 SLS (Selective Laser Sintering) – избирательное лазерное спекание .....	72
3.6.3 3DW (Three Dimensional Welding) – трехмерная наплавка (сварка).....	74
3.6.4 BPM (Ballistic Particle Manufacturing) – изготовление с использованием баллистики частиц.....	74
3.6.5 DMD (Direct Metal Deposition) – прямое нанесение металла.....	74

3.6.6 FDM (Fused Deposition Modeling) – моделирование оплавлением .....	76
3.6.7 GPD (Gas Phase Deposition) – осаждение из газовой фазы .....	78
3.6.8 HIS (Holographic Interference Solidification) – отверждение голографической интерференцией.....	78
3.6.9 LENS (Laser Engineering Net Shaping) – формирование с помощью лазерной инженерной сети .....	78
3.6.10 LLM (Layer Laminate Manufacturing) – способ моделирования наслаиванием.....	79
3.6.11 MJM (Multi Jet Modeling) – многоструйное воспроизведение.....	82
3.6.12 MJS (Multiphase Jet Solidification) – отверждение многофазной струи.....	83
3.6.13 RMPD (Rapid Micro Product Development) – быстрое изготовление микроизделий .....	83
3.6.14 SGC (Solid Ground Curing) – отверждение плотного основания .....	84
3.6.15 TDP (Three Dimensional Printing, 3D Printing) – трехмерная печать .....	85
3.6.16 Гибридные технологии послойного выращивания.....	86
3.7 Классификация генеративных технологий макроуровня .....	88
3.7.1 Принципы систематики .....	88
3.7.2 Классификация интегрированных генеративных технологий макроуровня .....	89
3.7.3 Комплекс энергетических признаков.....	90

3.7.4	Комплекс материаловедческих признаков .....	93
3.7.5	Комплекс технологических признаков .....	94
3.7.6	Комплекс инструментальных признаков ГТ .....	95
3.7.7	Комплекс признаков формообразования ИГТ .....	97
3.7.8	Примеры приложения принципов классификации к генеративным технологиям макроуровня.....	100
3.7.9	Информационная система поддержки принятия решений по использованию интегрированных генеративных технологий макроуровня .....	101
3.8	Примеры систем генеративных технологий .....	103
3.8.1	Система лазерной стереолитографии на базе установки SLA 5000.....	103
3.8.2	Система избирательного лазерного спекания на базе установки Vanguard Si2 SLS .....	107
3.8.3	Измерительная система на базе сканирующей установки Imetric Iscan II.....	109
3.9	Используемые материалы .....	114
3.10	Особенности базирования и выбор ориентации изделия в процессе его послойного выращивания.....	117
3.11	Принцип обратимой структурной декомпозиции и трансформации изделий при их послойном выращивании .....	121
3.12	Качество и точность твердотельных изделий, изготовленных по генеративным технологиям .....	126
3.12.1	Аналитические погрешности генеративных технологий макроуровня .....	126
3.12.2	Погрешность формообразования.....	129
3.12.3	Элементы погрешности формообразования.....	131

3.12.4	Параметризация элементов погрешности.....	132
3.12.5	Оптимизация толщин наращиваемых слоев.....	140
3.12.6	Сравнительная оценка качества поверхности изделий, изготовленных по генеративным технологиям .....	143
3.13	Доработка изделий после послойного выращивания (постпроцессы).....	149
3.14	Верификация твердотельных изделий, их прототипов и моделей.....	150
3.15	Технологическое время изготовления изделий послойным выращиванием (на примере SLA) .....	152
3.15.1	Модель технологического времени создания изделия.....	153
3.15.2	Время послойного построения изделия .....	155
3.15.3	Время построения технологических опор .....	159
3.15.4	Конечная модель времени послойного создания изделия .....	160
3.15.5	Анализ модели технологического времени .....	162
3.15.6	Время изготовления изделия, разделенного на части.....	166
3.16	Обобщенная модель времени полного цикла изготовления изделий генеративными технологиями макроуровня.....	171
3.17	Интеграция генеративных технологий ускоренного изготовления и прототипирования инструмента, технологической оснастки и промышленных изделий .....	175
3.18	Инструментальное оснащение и производство оснастки и изделий – Rapid Tooling и Rapid Manufacturing.....	178
3.19	Методы прямого изготовления .....	181



3.19.1 Оснастка, изготовленная по способу стереолитографии – инъекционная литейная форма (AIM TM).....	182
3.19.2 Оснастка, изготовленная по способу слоистых объектов (LOM) .....	182
3.19.3 Оснастка, изготовленная по способу селективного лазерного спекания (SLS) .....	183
3.19.4 Оснастка, изготовленная по способу трехмерной печати (3DP).....	186
3.20 Методы непрямого изготовления.....	186
3.20.1 Литье в песчаные формы .....	187
3.20.2 Точное литье по выплавляемым и выжигаемым моделям .....	188
3.20.3 Литье в эластичные силиконовые формы.....	189
3.20.4 Центробежное литье.....	190
3.20.5 Гальванопластика .....	191
3.20.6 Процесс 3D KeltoolTM .....	192
3.21 Экономичность интегрированных генеративных технологий.....	193
3.22 Потенциал и перспективы развития.....	197
3.23 Вопросы для самостоятельного контроля .....	199
<b>Раздел 4 Интегрированные генеративные технологии</b>	
<b>переходного см-мм уровня.....</b>	<b>202</b>
4.1 Основные понятия.....	202
4.2 Классификация способов наплавки .....	203
4.3 Электродуговая наплавка .....	205
4.3.1 Ручная дуговая наплавка .....	206

4.3.2 Дуговая наплавка в защитном газе плавящимся электродом .....	208
4.3.3 Дуговая наплавка под флюсом .....	209
4.3.4 Вибродуговая наплавка .....	210
4.3.5 Вакуумно-дуговая наплавка .....	212
4.3.6 Технология и техника электродуговой наплавки .....	213
4.4 Электрошлаковая наплавка (ЭШН).....	217
4.4.1 ЭШН электродными проволоками.....	219
4.4.2 ЭШН электродными лентами (ЭШНЛ) .....	221
4.4.3 ЭШН электродами большого сечения .....	222
4.4.4 ЭШН зернистым присадочным материалом .....	225
4.4.5 ЭШН жидким присадочным металлом.....	226
4.5 Плазменная наплавка.....	228
4.6 Индукционная наплавка .....	231
4.6.1 Погружение подогретой детали в форму-тигель с расплавленным металлом.....	232
4.6.2 Центробежная наплавка деталей цилиндрической формы .....	233
4.6.3 Расплавление порошковой шихты, нанесенной на наплавляемую поверхность детали .....	234
4.7 Газовая наплавка .....	235
4.8 Электроконтактная наплавка (плакирование).....	236
4.9 Плакирование сваркой взрывом .....	237
4.10 Компьютерные системы проектирования наплавочных технологий .....	238
4.11 Преимущества и недостатки технологии наплавки .....	240
4.12 Вопросы для самостоятельного контроля .....	243

<b>Раздел 5 Интегрированные генеративные технологии</b>	
<b>переходного мм-мкм уровня .....</b>	<b>244</b>
5.1 Основные понятия.....	244
5.2 Классификация методов послойного газотермического выращивания покрытий .....	245
5.3 Технологии послойного газотермического наращивания покрытий.....	248
5.3.1 Газопламенное наращивание .....	248
5.3.2 Детонационное покрытие.....	251
5.3.3 Электродуговая металлизация.....	252
5.3.4 Метод выращивания покрытий из плазмы.....	254
5.3.5 Высокочастотное плазменное наращивание (ВЧ – плазменное наращивание).....	255
5.3.6 Индукционный метод наращивания покрытий.....	257
5.4 Преимущества и недостатки газотермических технологий наращивания покрытий.....	259
5.5 Применение газотермических покрытий.....	261
5.6 Вопросы для самостоятельного контроля .....	264
<b>Раздел 6 Интегрированные генеративные технологии</b>	
<b>микроуровня.....</b>	<b>265</b>
6.1 Основные понятия.....	265
6.2 Механизмы образования покрытий методом испарения или распыления и конденсацией в вакууме .....	270
6.3 Вакуумные методы выращивания покрытий .....	274
6.4 Ионное (катодное) распыление.....	280
6.5 Ионно-термическое выращивание .....	283
6.6 Выращивание покрытий из плазмы электродугового разряда с горячим катодом .....	285

6.7 Выращивание покрытий из плазмы электродугового разряда с холодным катодом.....	286
6.8 Метод активированного реакционного испарения.....	288
6.9 Электронно-лучевое плазменное выращивание покрытий .....	291
6.10 Синтез многослойных ионно-плазменных покрытий в одновакуумном цикле .....	293
6.11 Метод ионного осаждения .....	294
6.12 Методы оценки качества пленочных покрытий .....	295
6.13 Работоспособность режущих инструментов с покрытиями .....	299
6.14 Заключение .....	312
6.15 Вопросы для самостоятельного контроля .....	312
<b>Раздел 7 Интегрированные генеративные технологии</b>	
<b>наноуровня.....</b>	<b>314</b>
7.1 Особенности реализации интегрированных генеративных технологий на нанометровом уровне .....	314
7.2 Основные термины и определения.....	316
7.3 Генеративные методы получения наноматериалов.....	321
7.3.1 Элементарные объекты интегрированных генеративных нанотехнологий .....	321
7.3.2 Атомно-молекулярная сборка (механосинтез) с помощью сканирующей зондовой микроскопии.....	322
7.3.3 Самосборка .....	327
7.3.4 Атомные кластеры как элементарный объект нанотехнологий .....	331
7.3.5 Наноориентированные технологии конструирования поверхности.....	334
7.3.5.1 Нанослойные покрытия .....	335
7.3.5.2 Нанокристаллические покрытия.....	337
7.3.5.3 Многослойные наноструктурные покрытия.....	339

7.3.6 Углеродные наноматериалы и их получение .....	340
7.3.6.1 Фуллерены.....	341
7.3.6.2 Углеродные нанотрубки .....	347
7.4 Основные свойства наноматериалов.....	349
7.4.1 Особенности структуры наноматериалов.....	350
7.4.2 Механические свойства .....	354
7.4.3 Физические свойства .....	359
7.4.4 Химические свойства.....	361
7.4.5 Классификация наноматериалов .....	362
7.5 Основные области применения наноматериалов и нанотехнологий.....	366
7.5.1 Создание нового поколения конструкционных материалов .....	366
7.5.2 Создание нового класса инструментальных наноматериалов .....	368
7.5.3 Функциональные покрытия .....	369
7.5.4 «Интеллектуальные» материалы .....	370
7.5.5 Молекулярная и наноэлектроника .....	372
7.5.6 Нанофотоника.....	377
7.5.7 МЭМС и НЭМС-технологии .....	380
7.5.8 Нанобиотехнология и наномедицина.....	383
7.6 Хронология создания и развития нанотехнологий.....	385
7.7 Потенциал и перспективы развития.....	392
7.8 Вопросы для самостоятельного контроля .....	397
Заключение .....	400
Приложение .....	402
Литература .....	408

## ВВЕДЕНИЕ

Человечество вступило в XXI с оптимистической уверенностью в том, что развитие технологий позволяет решить многие проблемы, с которыми приходится ему сталкиваться, ответить на многие вызовы, касающиеся всех сторон его существования. Этот век в большой мере авансом назван веком технологий.

Окружающий человека мир полон загадок и одновременно гениальных подсказок. Научиться их отгадывать и понимать – значит, добиваться прогресса во всем.

От первого заостренного кола и каменного топора человечество, созидая, реализовывало принцип «от большого к малому», «сверху вниз», т.е. принцип, базирующийся на разделении объемов на полезные и «не нужные части». *А растительный мир природа создавала по принципу «от малого к большому», «снизу-вверх», формируя только то, что «нужно» путем послойного наращивания, генерирования.*

Осознание всего этого и привело к созданию основ интегрированных генеративных технологий, разработке принципов их реализации в самых различных отраслях – от промышленных до гуманитарных: наука, промышленность, образование, медицина.

В общем *разработка и реализация интегрированной технологии, в том числе и генеративной, становится возможной тогда, когда в каждой из интегрируемых областей науки, техники, технологии, материаловедения и т.д. достигнут необходимый новый уровень развития.* Так было, например, с созданием синтетических алмазов: теория синтеза предложена академиком О.И. Лейпунским еще в 30-е годы, но лишь к середине 60-х прошлого века достижения материаловедения, кристаллографии, теплофизики, физики и техники высоких давлений и др. создали необходимые условия сначала для лабораторного, а затем и промышленного синтеза алмазов и др. сверхтвердых материалов.

В учебном пособии материал излагается в соответствие с концепцией трех уровней интегрированных генеративных технологий.

Во временной цепочке традиционного создания продукта – период между возникновением идеи и выходом его на рынок – значительная доля приходится на изготовление моделей, прототипов и образцов изделия. В рамках интегрированных технологий задача значительного сокращения этой доли решается наиболее успешно. Все это требует изменения идеологии проектирования и изготовления изделий. *В сочетании с возможностями многокоординатной обработки генеративные*

*технологии снимают все ограничения по сложности конструкции и создают широчайшие предпосылки для кардинального совершенствования производства, резкого сокращения времени изготовления и затрат.*

Все эти составляющие единого процесса имеют общую идеологию и принципы, в основе которых лежит прямой переход от 3D CAD образа непосредственно к изделию без применения оснастки, инструмента, технологических сред и т.д. Трехмерное твердое тело (изделие) получают генеративным путем. Например, на первом этапе образ изделия задается аналитически, чертежом, файлами компьютерных томограмм или фотографиями. На этой основе создается математическая трехмерная модель конструкции объекта; виртуальный инжиниринг позволяет оптимизировать конструкцию по тем или иным критериям; далее трехмерная математическая модель послойным наращиванием материализуется (полимер, керамика, бумага, металл и др.).

В 2001 году при НТУ «Харьковский политехнический институт» создан единственный в Украине учебно-научно-производственный центр высоких интегрированных технологий, базирующихся на идеологии и технике послойного выращивания. Истекшие годы продемонстрировали глубокий интерес промышленных предприятий Украины к возможностям генеративных технологий макро-, микро- и наноуровней.

В учебном пособии впервые излагается концепция трех уровней генеративных технологий, сконцентрированное обобщение информации, собранной из многих независимых источников и собственного опыта, что может быть достаточным для понимания преимуществ новых подходов не только для быстрого создания прототипов или собственно изделий в сопоставлении с традиционным прототипированием и изготовлением, но и для понимания идеологии интегрированных генеративных технологий, их огромных потенциальных возможностей и безграничных областей эффективного их применения.

Раздел первый посвящен характеристике тенденций современного промышленного производства, развития интегрированных технологий, содержит основные понятия и определения, относящиеся к интегрированным генеративным технологиям макро-, микро- и наноуровня.

Во втором разделе рассматриваются физические основы процессов послойного выращивания изделий из материалов в твердом, жидком, газообразном и плазменном состоянии.

Раздел третий посвящен интегрированным генеративным технологиям макроуровня. Рассматривается их структура, роль 3D CAD

моделирования в создании электронного образа изделий, физические основы послойного выращивания изделий, суть способов прямой материализации трехмерной математической модели, предлагается их классификация. Излагаются принципы базирования электронного образа изделия, его точность и качество, верификация, порядок определения технологического времени, постпроцессы и интеграция генеративных технологий ускоренного формообразования инструмента, технологической оснастки и производства конечных изделий.

В четвертом разделе рассматриваются методы послойного наращивания на переходном от макро- до микроуровня – «см-мм».

Пятый раздел посвящен генеративным технологиям мм-мк уровня.

В шестом разделе рассматриваются интегрированные генеративные технологии микроуровня – формообразование поверхностного слоя изделий, принцип конструирования поверхности и поверхностного слоя последовательным наращиванием. Излагается широкий спектр методов послойного наращивания объемов изделия в границах микрометрического диапазона – химические, химико-термические, вакуумно-плазменные, имплантация, ионно-термические, катодные, комбинированные наплавки и др., а также их потенциал, области применения и перспективы развития.

В разделе 7 рассматриваются области нанотехнологий, которые связаны с реализацией генеративного принципа при создании элементарных нанообъектов, вопросы атомно-молекулярной сборки, самосборки, синтеза атомных кластеров, покрытий, многослойных наноструктурированных и углеродных материалов, физико-механические и другие свойства наноматериалов, направления и области их применения, потенциал и перспективы развития.

Динамика развития генеративных технологий такова, что новые знания, новый опыт и новые достижения в ближайшие годы внесут существенные изменения в наши представления в этой области, что, несомненно, отразится и на дидактической стороне, в содержании учебников в последующих изданиях.

Авторы с благодарностью примут все замечания и советы по структуре и содержанию этого издания.



## РАЗДЕЛ 1

### ИНТЕГРИРОВАННЫЕ ГЕНЕРАТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ИХ МЕСТО В СОВРЕМЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

#### 1.1 Основные тенденции развития современного производства

Вступление в XXI век характеризуется как время грандиозных достижений человечества во всех областях его жизнедеятельности и прежде всего в области промышленного производства. Вместе с тем характеризовать его необходимо с учетом того непреложного факта, что уровень достижений в различных странах и отраслях существенно не одинаков, и эта дифференциация имеет как объективные, так и специфические причины. Но главные тенденции развития машиностроительного производства можно рассматривать на примере промышленно развитых стран.

В условиях глобализации экономики каждая страна формирует и проводит государственную промышленно-экономическую политику, направленную на развитие определенных отраслей. В ходе такого рода процессов четко проявляются тенденции, характеризующие интегрированную отраслевую направленность экономики различных стран:

– государства, в хозяйственной структуре которых преобладают перерабатывающие отрасли производства, опирающиеся на высокие технологии, то есть страны, поставляющие на рынок конечные товары и услуги высокоорганизованных отраслей. Эти страны определяются как наиболее развитые;

– государства, где преобладают добывающие отрасли, то есть страны, в существенной мере живущие за счет ресурсов, данных природой, и которые по причине слабого развития обрабатывающих отраслей зачастую даже эти ресурсы поставляют на мировой рынок не как конечный продукт, а как исходное сырье для последующей переработки. Такие страны представляются как слаборазвитые.

Задача государственной экономической политики заключается в выработке промышленной концепции и хозяйственного механизма, опираясь на приоритетные отечественные отрасли, которые обеспечат стране должный уровень развития обрабатывающих отраслей в рамках международного разделения труда.

Сегодня рынок диктует свои требования, которые необходимо учитывать на всех этапах создания товарной продукции – от идеи, конструирования, производства до депроизводства.

*Крупномасштабные достижения высокотехнологичных гибких производств, реальная возможность осуществлять технологическое управление формированием наперед заданных свойств изделий, резко возросшая роль информационных технологий на всех этапах жизненного цикла изделия, быстрое создание и освоение производства новых продуктов при увеличении номенклатуры и уменьшении их количества в партии, чрезвычайно перспективное стремление к миниатюризации изделий, все более широкое использование искусственного интеллекта, ориентация производства и депроизводства на все более полную гармонизацию с окружающей средой – все это относится к спектру основных черт, которыми можно характеризовать индустриальное производство промышленно развитых стран сегодня.*

Экономика с замкнутым циклом, которая осуществляет полный контроль материалов по виду и количеству и экологически бережное отношение к ним на всем протяжении срока службы изделия, одновременно сберегает насколько возможно собственные ресурсы, применяет индустриальное производство и его технику, делает его «уживчивым» с окружающей средой, стала главной задачей инженеров, физиков, химиков и технологов на производстве, встречает все большее понимание в обществе и находит отражение в принимаемых законах.

На основе новейших научных достижений в области физики твердого тела, физики высоких давлений, оптики, биохимии, микроэлектроники и др. создано множество новых технологий, которые привели к революционным изменениям в товарном насыщении в таких отраслях, как энергетика, транспортная техника, коммуникации, компьютерная техника, геновая инженерия и т. д.

Научно-технический прогресс и конкуренция, диктующие необходимость снижения издержек производства одновременно как в процессе производства конкретного продукта (то есть в рамках цели производства), так и в системе исполнительного механизма (то есть непосредственно в производственной структуре) приводят к тому, что многие крупнейшие ранее узкоспециализированные фирмы становятся многопрофильными. В этих условиях отраслевая направленность проявляется уже не в форме специализированной фирмы, а в конкурентной борьбе многопрофильных предприятий, анализ функционирования

которых в настоящее время приобретает все большее значение как в аспекте производства того или иного товара, так и в характере действий производственных структур – изготовителей того или иного продукта, представляемого на отраслевых рынках.

*Глобализация, создание международных стратегических альянсов привело к тому, что конкуренция между предприятиями приняла интернациональный характер.* Поэтому разработка и освоение новых технологий имеет значение уже не только для отдельных предприятий, но и для отрасли в целом. Это означает, что стимулирование разработок новых технологий диктуется как внутрифирменными интересами, так и интересами всей отрасли. Уникальным явлением можно считать ориентацию стран Европейского Союза на создание единой технологической платформы, позволяющей сделать достоянием всего сообщества национальные достижения каждой страны-участницы.

*Ориентирование на новые технологии и быстрый прогресс производственной техники привело к возникновению прогрессивной и гибкой концентрации производства, которая нашла свое выражение в концепции компьютеризированного интегрированного производства (СІМ).* Сокращение длительности производственного цикла, уменьшение фондов, запасов в соединении с изготовлением продукции по принципу «точно во время» дало производству определенные резервы. Одновременно производственные процессы и станки стали соединяться в сложные высокопроизводительные системы, в которых технологические и организационные цепочки все зависят друг от друга.

Инвестиции в гибкие производственные системы усиливают необходимость их максимального использования по времени и техническим возможностям. Ошибки и нарушения процесса быстрее приводят к простоям этой дорогой системы, чем при традиционном или ручном изготовлении. Согласно исследованиям многие ошибки и нарушения процесса изготовления вызваны не производственным оборудованием и не в цепочке непосредственного процесса обработки, а преимущественно в области планирования и снабжения

Для того, чтобы иметь конкурентоспособное производство, надо научиться обеспечивать работу сложных компьютерных производств с максимальной производительностью и качеством. Высокоразвитое прогрессивное производство с высококвалифицированным персоналом имеет дополнительные преимущества в том случае, если речь идет об освоении сложных комплексных процессов.

Таким образом, CIM может рассматриваться как глобальная ведущая концепция промышленного производства второй половины XX столетия.

Наибольшего прогресса в освоении CIM достигли крупные предприятия авиа- и автомобилестроения, электронной индустрии. Практика показала, что и этому авангарду промышленного производства не удалось в полной мере реализовать концепцию CIM, но стало общепризнанным, что *только CIM в состоянии активизировать обширный потенциал рационализации во всех областях производства* (рис. 1.1).



Рисунок 1.1 – Функции компьютеризированного интегрированного производства

Высокая стоимость рабочей силы и непродолжительный рабочий день, а также постоянный контроль исполнения производственных заданий ускоряют процесс применения автоматизированного производства. Однако полная автоматизация и компьютеризация производства является еще только теорией.

Важнейшим этапом развития производства стала реализация японской концепции «Lean Production» – «тощего производства».

Для «Lean Production» можно сформулировать ряд основных принципов.

- На каждого сотрудника возлагается максимальное количество задач и ответственность за их выполнение.
- Недостатки и проблемы в производстве устраняются тотчас же.
- Обширная информационная система, которой может воспользоваться каждый сотрудник, обеспечивает высокую гибкость и быструю реакцию на нарушения или изменения производственного процесса.
- Рабочие группы обладают высоким уровнем независимости.
- Производственный климат подчинен единой стратегии предприятия и определяет взаимную ответственность за качество работы.

Анализ этих принципов показывает, что интеграция производства и устранение непроизводственных потерь стоят на первом месте. *Здесь системная технология уже сместила классическое разделение труда. Системы автоматического регулирования и высокая надежность способствуют значительному повышению производительности. Эти положения являются предпосылками для высокой эффективности автоматизированного производства.*

Совокупность принципов «Lean Production» позволяет производить постоянное улучшение процесса производства в виде непрерывного (монотонного) или ускоренного (скачкообразного) снижения расходов путем сокращения расточительных (непроизводительных) затрат.

Все, что непосредственно не способствует изготовлению продукции, считается расточительными (непроизводительными) расходами и устраняется, за исключением самой необходимой деятельности косвенных сотрудников. В качестве критериев оценки используются длительность производственного цикла, сроки и затраты на изготовление, объем фондов и качество продукции.

Концепция развития производства на рубеже тысячелетий базируется на сочетании достоинств концепции «тощего производства» и концепции СИМ первого поколения, поскольку обе преследуют одни и те же цели, следуют одним и тем же принципам. Интеграция принципов этих концепций может привести к другим концепциям, способным обеспечить повышение эффективности производства на путях его приращения и децентрализации, *учета ведущей роли человеческого фактора, который не может быть заменен никаким уровнем развития ЭВМ.*

Эта концепция, конечно же, связана с надежностью технологических процессов, технологическими процессами на пределах возможного, управлением комплексного протекания процесса способными к обучению эволюционными системами производства, использованием новых архитектур вычислительных средств. Системы пользования должны следовать децентрализованной структуре организации производства. Введение нейронных сетей и эволюционных алгоритмов позволяют наилучшим способом управлять процессами.

*Современное промышленное производство характеризуется тем, что большинство технологических процессов реализуется в области, граничащей с предельными возможностями.*

Высокая производительность и качество, интенсивное использование оборудования – это те характеристики, которые принципиально исключают друг друга. Чем шире мы раздвигаем границы производительности и качества в технологическом процессе, тем ненадежнее он становится. С другой стороны, процессы в области высоких скоростей удается эксплуатировать и одновременно добиваться высокой экономии времени обработки и затрат. Классическое противоречие может быть решено путем управления технологическим процессом, технологической системой.

*Промышленное производство, динамично изменяющееся, требует столь же динамичного изменения организационных структур.*

*Мировая практика постиндустриального развития подтверждает, что и преодоление трудных социальных проблем лежит, прежде всего, в сфере интенсивного развития национального производства, его обрабатывающих отраслей и именно на такой основе создания должного количества рабочих мест, которые обеспечивают высокий прожиточный минимум абсолютному большинству населения страны. В индустриально развитых странах это не только экономическая, но и социальная задача, объединяющая действия как государства, так и бизнеса, и только благодаря их совместным усилиям преодолевается жесткое социальное противостояние на базе социальной ориентации экономики.*

На современных заводах доля затрат на заработную плату и выплат по социальному страхованию составляет сегодня около 50-70% от общих производственных расходов без затрат на материалы. Вследствие такого развития при изготовлении продукции стало заметно меньше людей. Созидательная доля работ все больше смещается в сторону планирования

и управления, т. е. все дальше отходит от непосредственного процесса изготовления.

*Происходит перемещение производственного персонала из области непосредственного изготовления в область планирования и управления или в сферу обслуживания средств производства.*

В нашей стране создание рабочих мест в послереформенный период представляется большой национальной проблемой, которую можно решить только в рамках разработки и реализации комплексной социально-экономической программы. Ее выполнение находится, с одной стороны, в сфере интенсификации производственных процессов на основе предпринимательства и, таким образом, в создании в должной мере оплачиваемых рабочих мест, способных обеспечить семье требуемый уровень жизни, а с другой – в расширении на той же базе объемов производства, росте государственного бюджета и формировании необходимых средств.

Важнейшей базовой задачей решения социальных проблем является развитие обрабатывающих отраслей производства, а, значит, создание в этом спектре должного количества рабочих мест. Оценивая роль, структуру машиностроительного комплекса, состояние, объемы затрат на его восстановление и обеспечение необходимых темпов развития, можно утверждать, что эти задачи не могут быть решены в рамках его отдельных предприятий и даже других более крупных производственных структур. А это значит, что проблема рабочих мест в машиностроении представляет собой важнейшую национальную задачу.

В процессе «шокового реформирования» преимущественно пострадали обрабатывающие отрасли производства, в этой сфере была ликвидирована существенная часть рабочих мест, и именно на этих отраслях должно быть сосредоточено внимание как государства, отечественного частного сектора, так и структур гражданского общества.

Деградация отраслей машиностроения в последние пятнадцать-двадцать лет привела к тому, что потеряно большое количество специалистов как вследствие их перехода в другие сферы деятельности, так и «утечки мозгов». Именно поэтому проблема создания рабочих мест в машиностроении при постановке задач обеспечения его развития тесно связана с такими вопросами в кадровой политике, как формирование специалистов высшей квалификации – докторов и кандидатов наук; подготовка инженерно-технического состава; обеспечение подготовки мастеров и рабочих различных уровней квалификации.

Сложившиеся в машиностроении за переходный период проблемы и факторы, препятствующие его развитию, носят не частный, локальный характер, а представляют собой общую взаимосвязанную и взаимообусловленную систему.

В промышленности в целом и в машиностроительной отрасли в частности действует ряд негативных факторов, которые вновь и вновь воспроизводят названные и др. проблемы, создавая в машиностроении масштабный системный кризис.

К числу основных системных негативных факторов необходимо отнести:

- деградацию основных фондов машиностроения, достигшую критической отметки;
- низкое качество продукции, высокие производственные издержки (металлоемкость, энергозатраты, транспортировка), низкую рентабельность производства и, как следствие, недостаток оборотных и инвестиционных средств для развития;
- неэффективную кадровую политику, не способствующую привлечению квалифицированных специалистов в сферу промышленного производства, научно-технической и технологической деятельности;
- несовершенство законодательной базы по государственной промышленной политике, техническому регулированию, ценообразованию на продукцию машиностроения и др., порождающее:
  - опережающий рост цен на продукцию и услуги естественных монополий;
  - отсутствие приведенных к международным требованиям стандартов выпускаемой продукции;
  - ограниченную емкость внутреннего рынка вследствие недостаточно высоких темпов роста экономики страны;
  - низкую конкурентоспособность украинской машиностроительной продукции на внутреннем и внешнем рынке и низкую инвестиционную привлекательность машиностроения (как следствие изложенных выше факторов).

Вместе с тем следует признать, что главной причиной создавшегося положения является отсутствие обоснованной, базирующейся на достижениях науки и техники, единой государственной стратегии преобразования и опережающего развития отечественной промышленности.



## **1.2 Интегрированные технологии современного производства и их составляющие**

Основатель Харьковского практического технологического института Виктор Львович Кирпичев более столетия тому назад прозорливо писал, что *«только технология может доставить людям средство жить, а потому чем дальше, тем больше и теснее она будет связана со всем происходящим в обществе людей»*.

В XXI веке – веке технологий собственно *понятие технология трактуется как совокупность управленческих, научно-исследовательских, опытно-конструкторских и инжиниринговых процессов, являющаяся фундаментом продуктивной деятельности людей*.

Это более широкое понятие, чем «совокупность методов средств по переработке сырья, материалов, полуфабрикатов, изделий и т. д. в материальном производстве». Оно также предполагает важную роль человеческого фактора и отраслевых технологий: промышленных и оборонных, транспортных и коммуникационных, ресурсосберегающих и природоохранных, информационных и гуманитарных и т. д.

*Технологии являются возможно главными объективными предпосылками экономического развития и на этой основе удовлетворения потребностей с помощью новых продуктов, новых материалов, новых процессов или их возможных комбинаций*.

Промышленные технологии как основные принципы получения новых материалов, изделий с заданными функциональными свойствами, построения производственных процессов и их эффективного надежного функционирования оказывают решающее влияние на жизнь человеческого общества, во многом определяют области и способы деятельности людей, открывают новые возможности гармонизации жизни и творчества человека с окружающей природой в глобальных масштабах.

*Собственно глобализация стала порождением развивающихся технологий. Именно технологии (особенно информационные, транспортные, коммуникационные, аэрокосмические) разрушили иллюзию представлений о бесконечных земельных просторах и дали много доказательств тому, что мир тесен*.

Уровень всего индустриального производства в различных странах и их научно-технический потенциал в большей степени зависит от того, в каких масштабах и в каких отраслях экономики там применяются высокие интегрированные технологии, насколько стали «прозрачными» и

«взаимопроницаемыми» для идей и их реализации «перегородки» между всеми участниками процесса создания продукции – от идеи до выхода ее на рынок, какова степень интеграции их знаний, умений, опыта, материальных ресурсов, основных фондов и т. д.

Например, на передовых малых и средних предприятиях назначается менеджер изделия, который ведет все вопросы от приема заказа до поставки изделия заказчику.

С другой стороны, стремительно развивающаяся глобализация приводит к объединению усилий все более широкого круга предприятий, при этом каждое из них концентрируется на своей основной компетенции, в результате чего параллельно в разработке участвуют главное предприятие-разработчик, поставщики систем и компонентов, производители станков и оборудования, научно-исследовательские институты, т. е. зарождается своеобразная гармоничная культура отношений между альянсами, в том числе мировыми.

*Каждое изделие машиностроения, поставляемое в условиях жесткой конкуренции на внутренний и в особенности на внешний рынок, должно обладать новым уровнем свойств и отвечать все возрастающим требованиям, предъявляемым потенциальным потребителем к функциональным, экологическим и эстетическим свойствам.*

Эти тенденции повышения требований к качеству изделий нашли свое отражение в международных стандартах ISO-9000. Получение такого уровня изделий все больше связывают с нетрадиционными конструкторскими и технологическими решениями, реализация которых затруднительна и даже не возможна на основе использования технологии, оборудования, оснастки общего назначения и т. д., т. е. на основе всего того, что составляет суть *традиционных технологий (конвенциональных)*.

В связи с этим все большее внимание специалистов привлекают *нетрадиционные технологии, созданию которых предшествует накопление обширных данных фундаментальных и прикладных наук*. В отличие от традиционных, чаще аналоговых, такие технологии называют «наукоемкими», «прецизионными», «ультрапрецизионными», «нанотехнологиями» и др. Эти названия новых технологий связаны с тем или иным признаком технологического процесса или свойствами изделия, который принят авторами в качестве определяющего, при этом во внимание чаще всего берется предельная точность, обеспечиваемая данным рабочим процессом.

Таким образом, термины, применяемые к новым технологиям, не являются исчерпывающими, т. к. не отражают всей многосложности и емкости новых технологий, всего спектра и нового уровня функциональных и других свойств макро- и микроизделий.

Независимо от используемой терминологии, все эти технологии объективно представляют собой составляющие единого, самостоятельного направления в рамках общей технологии машино- и приборостроения, суть которого более полно отражается в понятии высокие технологии.

*Высокими следует считать такие технологии, которые, обладая совокупностью основных признаков – наукоемкость, системность, физическое и математическое моделирование с целью структурно-параметрической оптимизации, высокоэффективный рабочий процесс размерной обработки, компьютерная технологическая среда и автоматизация всех этапов разработки и реализации, устойчивость и надежность, экологическая чистота, - при соответствующем техническом и кадровом обеспечении (прецизионное оборудование, оснастка и инструмент, определенный характер рабочей технологической среды, система диагностики, компьютерная сеть управления и специализированная подготовка персонала), гарантируют получение изделий, обладающих новым уровнем функциональных, эстетических и экологических свойств.*

Понятие «высокие технологии» применительно к машиностроению выкристаллизовалось позже, чем в других отраслях, например, в микроэлектронике. Но оно уже само по себе включает обязательное наличие сочетания, совокупности целого ряда признаков, отражающих достижения различных отраслей знаний, таких, как наукоемкость, устойчивость, надежность, компьютерная технологическая среда, виртуальный инжиниринг, наличие самообучающихся систем искусственного интеллекта в процессах конструирования, планирования и сборки, нетрадиционное использование физических, химических и др. эффектов и явлений, прецизионное оборудование, оснастка, инструмент, системы диагностики, новые материалы и др. (рис. 1.2, 1.3).

*Следовательно, высокие технологии по своей сути являются интегрированными.*

Именно новый уровень функциональных, эстетических и экологических свойств изделий при соблюдении экономической целесообразности интересует потребителя. Именно этим гарантируется конкурентоспособность новой продукции.



Рисунок 1.2 – К понятию «высокие технологии»

*Повышение наукоемкости отраслевых технологий, возможность реализации системного подхода, тотальной компьютеризации технологий и производств (ориентация в пределе на CALS-технологии), совершенствование производственных структур и управления являются предпосылками создания интегрированных технологий. Составляющими интегрированных технологий являются конвенциональные разъединительные, соединительные, перераспределительные и генеративные технологии.*

*Интеграция – объединение материальных и нематериальных объектов, способов обработки, механо-физико-химических эффектов, инструментов, оборудования, транспортных средств и устройств, программного обеспечения, систем планирования и связи с целью*

*получения принципиально новых результатов.* Например, в конце 80-х годов прошлого века интеграция всех процессов обработки информации предприятий стала определяющей тенденцией технического и организационно-ориентированного развития производства, базой концепции компьютеризированного интегрированного производства, японской концепции тощего производства и др.

Из всего этого выделим те составляющие, которые связаны с новыми рабочими процессами высоких интегрированных технологий.

В целом ведущая объединяющая идея, разработка и реализация интегрированной технологии становятся возможными тогда, когда в каждой из интегрируемых областей науки, техники, технологии, материаловедения и т. д. достигнут необходимый новый уровень развития как главной предпосылки.

*К интегрированным относятся такие технологии, которые базируются на органическом сочетании последних достижений в различных областях науки, техники, технологий, информатики, материаловедения и др., использование которого обеспечивает быстрое получение нового продукта с принципиально иным уровнем функциональных, эстетических и экологических свойств, гарантирующим ему высокую конкурентоспособность на рынке.*

Международная интеграция в области товаров промышленного назначения и в сфере услуг все в большей степени определяется своевременным, ориентированным на потребителя и не требующим больших затрат товарным воплощением новых технологий или их комбинаций, их интеграции в конкурентоспособные на мировом рынке компоненты, изделия, процессы и системы.

Все возрастающие и все более дифференцирующиеся требования в области индустриального производства, охраны окружающей среды, охраны здоровья и безопасности деятельности человека требуют роста объема необходимых инноваций, слияния, интеграции различных технологий. В процессе создания высокотехнологичных изделий включается не одно новейшее технологическое решение. В результате технологии, ранее четко разграниченные и, казалось, далеко отстоящие друг от друга, сближаются, сливаются и формируют интегрированный технологический процесс.

*С учетом принятого деления технологий по потенциалу конкурентоспособности на новые, прогрессивные, ключевые, базовые и вытесняемые, можно полагать, что интегрированные технологии могут*

играть существенную роль как прогрессивные и ключевые. Именно интегрированные технологии способны предложить такой уровень функциональных, экологических и эстетических свойств изделий, который другими существующими (базовыми) технологиями обеспечить невозможно.

Время рассматривается как стратегическое оружие в конкурентной борьбе, как эквивалент финансов, качества, производительности. Секрет успеха перемещается от стоимости, основанной на времени, к стратегиям, основанным на новых технологиях, т.к. именно новые технологии, новые рабочие процессы, прежде всего интегрированные, позволяют не жертвовать ни стоимостью, ни качеством при завоевании рынка и быстром реагировании на его все новые требования.

При этом область высоких интегрированных технологий может лежать в более широком интервале производительности, чем для технологий конвенциональных, а диапазон свойств существенно уже, но их характеристики качества естественно выгодно отличаются (рис. 1.3).

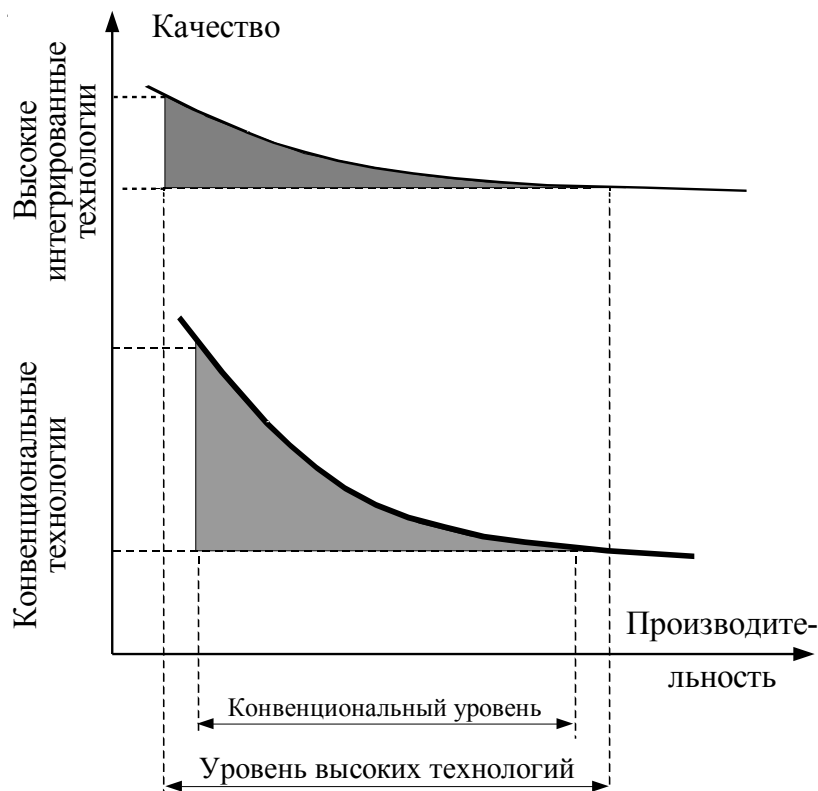


Рисунок 1.3 – Области конвенциональных и высоких интегрированных технологий

Но следует учитывать то обстоятельство, что высокие интегрированные технологии строго ориентированы на определенный объект производства, а, значит, имеют более узкий спектр по сравнению с конвенциональными технологиями.

Создать по настоящему инновационный продукт, отвечающий требованиям рынка, можно только на основе новых технологических разработок. В настоящее время конкуренция между предприятиями все в большей степени определяется конкуренцией используемых технологий, т.е. технологической конкуренцией. Следовательно, новые технологии – главная движущая сила конкурентной борьбы.

Именно на этом фоне следует рассматривать достижения интегрированных технологий, базирующихся на принципах не «сверху-вниз», а «снизу-вверх», т.е. не на разделении объемов припуска и собственно изделий, а на послойном наращивании.

### **1.3 Интегрированные генеративные технологии и их уровни**

Генеративные технологии, составляющие важнейший раздел интегрированных технологий, в последние десятилетия получили мощное развитие и охватили чрезвычайно емкие отрасли промышленного производства, авиации, автомобилестроения, архитектуры, медицины и т. д. вплоть до археологии.

Классическая технология изготовления в основе своей базируется на принципе «сверху-вниз» и трансформационных процессах – разделительных, соединительных, перераспределительных. Можно перечислить примеры рабочих процессов конвенциональных технологий соответственно – резание, сварка,ковка, штамповка (рис. 1.4)

*Понятие «генеративные технологии» происходит от латинского «generari», что означает «вырастить», и отражает принципиальное отличие от традиционных технологий изготовления сначала заготовок, а затем последующей обработки их с целью отделения объема материала, составляющего припуск, резанием, штамповкой, электроэрозией, лазером и др. способами, обуславливающими заведомо низкий коэффициент использования материала.*

В мир микроизделий могут вести два пути: можно из массивной заготовки, например, из кремния шлифованием получать необходимое точное миниатюрное изделие. По этому принципу функционирует системная техника, которая в основном занимается структурами размеров от мм до мкм. Другой возможный путь: берутся отдельные атомы,

молекулы или частички из них, которые как кирпичики создают желаемую структуру. Этот принцип применяется и в нанотехнологии, которая занимается структурами в нанометровом диапазоне (млн. доля мм).



Рисунок 1.4 – Интегрированные технологии в машиностроении

В соответствии с предложенной концепцией, к генеративным относятся технологии, базирующие изготовление изделий не на отделении объемов, составляющих припуск, а на послойном наращивании объектов до достижения требуемых их характеристик на нано-, микро- и макроуровнях и конструировании физической поверхности.

Генеративные технологии (ГТ) по своей сути являются своеобразным отражением в технике и технологии тех процессов, которые происходят в природных условиях в растительном мире. В процессе роста растение формирует только необходимые для его роста части – корни, стебель, листья, цветы, плоды. Кольца роста на срезе ствола дерева свидетельствуют – все части растения наращиваются послойно.

С точки зрения формообразования природа дает пример исключительно бережливых, чрезвычайно экономичных процессов. Здесь уместно привести аналогию структуры приповерхностных слоев растений и промышленных изделий, получаемых по генеративному принципу, т. е. с послойным выращиванием (рис. 1.5).



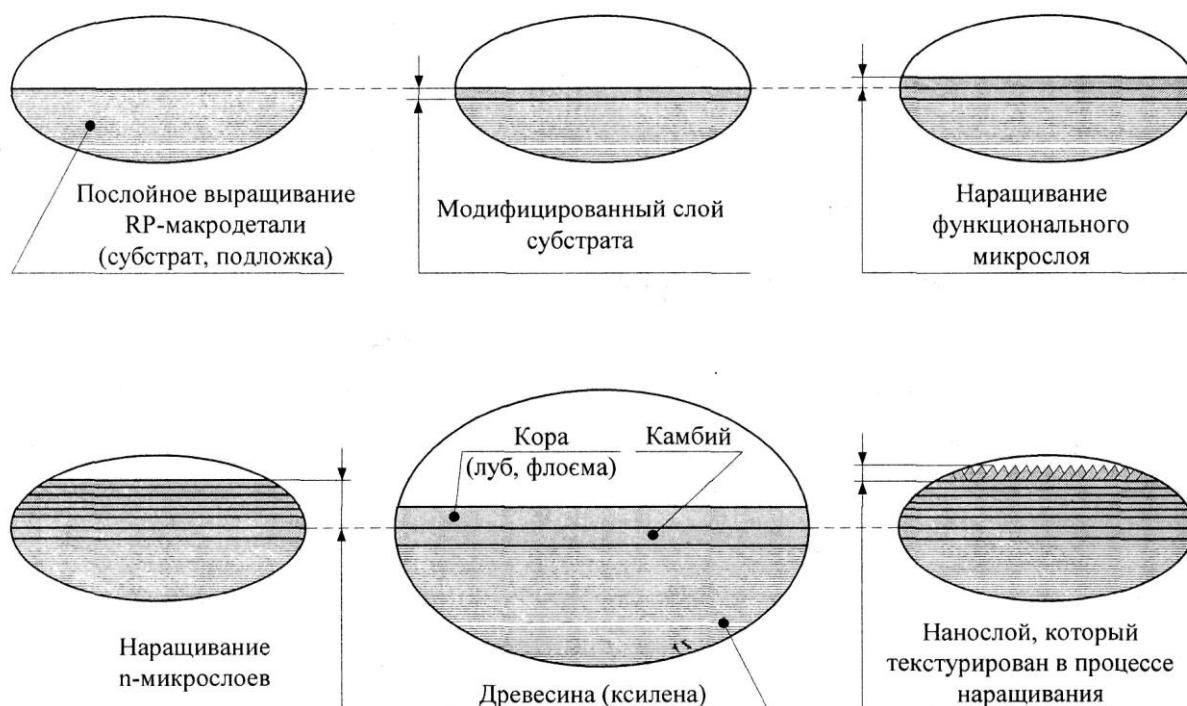


Рисунок 1.5 – Аналогия приповерхностных слоев растений и промышленных изделий

Хотя идея генеративного изготовления изделий имеет давние корни, однако, именно в наше время созрели все предпосылки для реализации его огромного потенциала как новой научно-производственной идеологии – «не от большего к меньшему, а от меньшего к большему». Следует подчеркнуть, что генеративные технологии представляют собой образец эффективного интегрирования последних достижений материаловедения, информационных, лазерных, ионно-плазменных и др. наукоемких технологий, а также теории управления, оптимизации технологических процессов и конструкций, современных технологий литья, прецизионной и ультрапрецизионной обработки и т.д. наращивания (например, для формирования многослойной структуры и физико-механических и функциональных свойств физической поверхности). Также реализуема та или иная степень использования возможностей информационных технологий для ГТ различных уровней. В особенности это касается генеративных технологий прямого формообразования, например, послойное наращивание одно- или многократным окунанием в расплав материала, наплавка, сборка из объемных (трехмерных) частей единой детали, спекание или сварка послойно сформированных заготовок и др. (рис. 1.6).

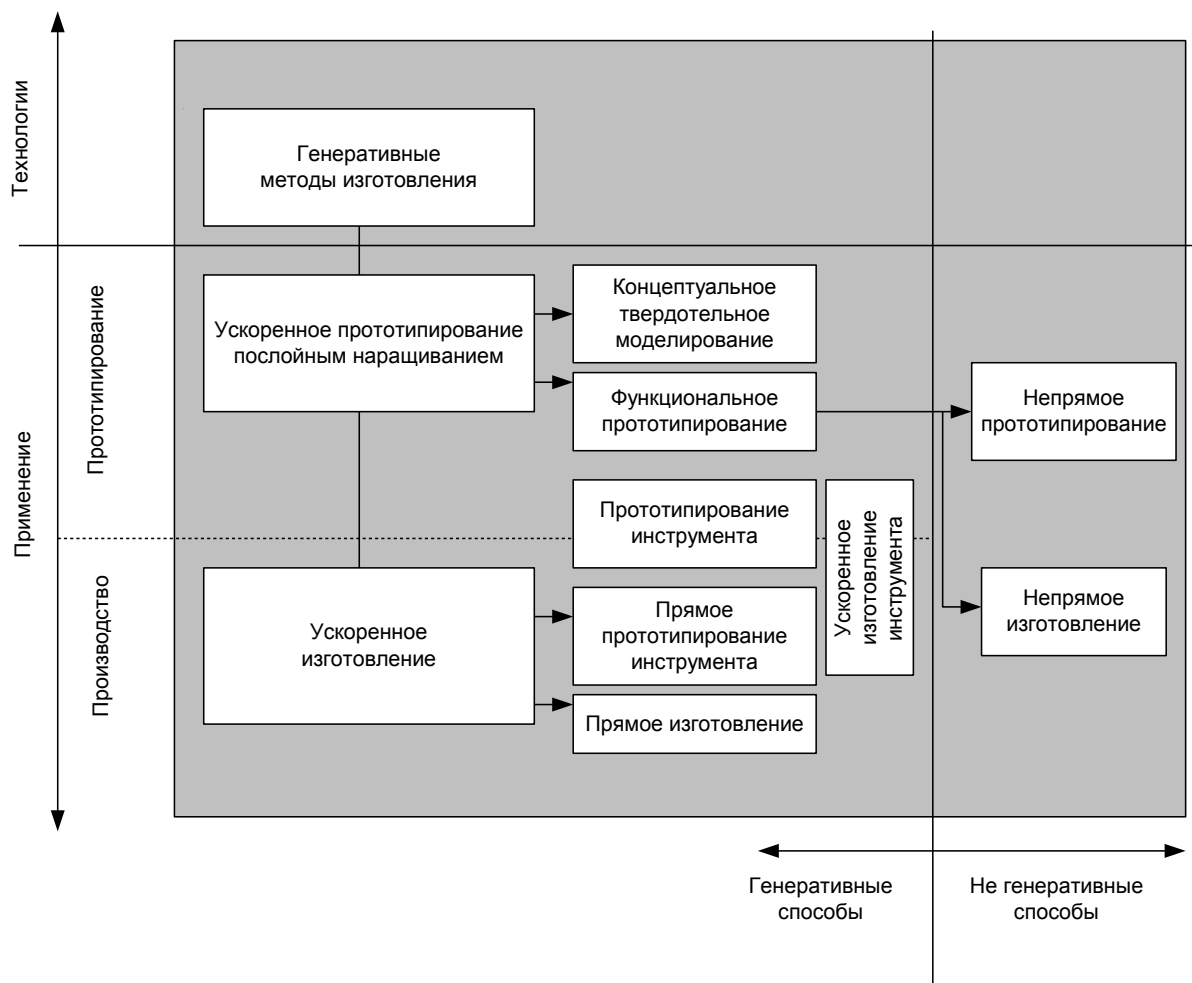


Рисунок 1.6 – Структура технологии генеративного изготовления в зависимости от использования прототипирования и производстве

Предложенная концепция трех уровней позволяет системно рассматривать и реализовывать весь потенциал разнообразнейших технологий, соответствующих генеративному принципу «снизу-вверх».

На макроуровне производится послойное выращивание твердых тел, переход от виртуального пространства и виртуальных моделей к твердым объектам независимо от степени сложности их конструкции, форм и размеров. Это технологии Rapid Prototyping, наплавка, электродуговая, электрошлаковая, плазменная, газотермические покрытия и т. д.

На микроуровне производится наращивание микрослоев из различных материалов в любой последовательности толщиной от нанометров до десятков микрон. Это технологии вакуумно-плазменные, химические, химико-термические и т. д.

*На наноуровне осуществляется атомно-молекулярная самоорганизация и послойное наращивание объема, когда толщина слоев составляет от доли нанометра до нескольких нанометров, а граничный слой за счет текстурирования и др. приемов формирует физическую поверхность, ее топографию и функциональные свойства с учетом анизотропии. Такие процессы относятся к области нанотехнологий.*

*Термин «нанотехнология» используется для определения систем оборудования и технологий интегрированного производства, которые обеспечивают обработку с точностью порядка 1 нм. В более широком плане «нанотехнология занимается системами, новые функции и свойства которых зависят только от наноэффектов их компонентов», как звучит академическое определение понятия, которое дает союз немецких инженеров.*

Генеративные технологии, в частности ускоренное формообразование и прототипирование по идеологии Rapid Prototyping, на макроуровне обеспечивают прямой переход от виртуального пространства и виртуальных моделей (электронных эталонов изделий) к реальным твердотельным трехмерным объектам без ограничений по сложности формы, не прибегая к использованию технологической оснастки и инструмента.

*Концепция трех уровней интегрированных технологий позволяет рассматривать явления, происходящие в макро-, микро- и нанометрическом диапазонах, на единой методологической основе.*

В соответствии с предложенной концепцией трех уровней генеративных технологий возможна комбинация традиционных (конвенциональных) технологий (например, для изготовления макроизделия) и технологий генеративных, по крайней мере, одного из уровней – макро-, микро- или наноуровней. Широко известны варианты нанесения наплавов, тонкопленочных покрытий на режущие инструменты, изготовленные по традиционным технологиям инструментального производства.

Идеальным вариантом эффективной реализации потенциала генеративных технологий был бы такой, когда макротело любой конфигурации, его поверхностный слой и физическая поверхность создаются послойным наращиванием.

Необходимо констатировать, что технологические возможности ряда реализуемых на практике генеративных способов послойного наращивания перекрывают указанные условные границы трех уровней – нано-, микро- и

макrorазмерных областей и поэтому не могут быть однозначно отнесены к какому-либо из них.

В связи с этим представляется целесообразным рассмотреть эти технологии как переходные, т. е. уровни в размерных диапазонах см→мм и мм→мк (рис. 1.7). К переходному уровню относятся различного рода наплавки (электродуговая, электрошлаковая, плазменная и др.), нанесение газотермических покрытий (газоплазменных, детонационных, индукционных и т. д.).

Необходимо учитывать, что генеративные технологии позволяют не только послойно наращивать часть всего объема изделия, например, восполняя объемы изношенного материала, наращивать функциональные слои, но и обеспечивают полное выращивание изделий независимо от их конструктивной сложности без оснастки и инструмента по принципу «от малого- к большому».



Рисунок 1.7 – Уровни объектов интегрированных генеративных технологий

#### **1.4 Вопросы для самостоятельного контроля**

1. Приведите определение современного понятия «технология».
2. В чем состоит сущность концепции компьютеризированного интегрированного производства?
3. Каково влияние глобализации на тенденции развития мирового производства?
4. Приведите определение «высокие технологии» и раскройте основные признаки ВТ.
5. Приведите определение понятия «интегрированные технологии».
6. В чем состоит сущность концепции трех уровней генеративных технологий?
7. Приведите примеры природных аналогов объектов, реализовавшихся по принципу «снизу-вверх».
8. Оцените обоснованность переходных уровней генеративных технологий.

## РАЗДЕЛ 2

### ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОСЛОЙНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ

#### 2.1 Процессы послойной материализации 3D электронного образа изделий

Технологии и оборудование для генеративного изготовления изделий бурно развиваются. На рынке появляются все новые и новые решения, а существующие претерпевают непрерывную модернизацию. Завтра нынешних систем может не оказаться или они станут не актуальными.

Поэтому знать и развивать физические основы процессов прямой послойной материализации 3D-электронных образов – значит уверенно ориентироваться в будущем обилии промышленных установок, предугадывать тенденции их развития.

*Все генеративные методы изготовления изделий базируются на создании отдельных слоев заданной толщины и их последовательного соединения, прежде всего с основой (подложкой), а затем друг с другом. Виртуальная информация о слоях превращается в генеративном устройстве в физические слои, последовательно выстраивая физическую деталь, которая может реконструироваться, быть прототипом или окончательным изделием.* Контуры слоев очерчиваются в плоскости X-Y, а третий размер по Z-координате и формообразование реализуется за счет соединения слоев, т. е. Z-координата не является непрерывной. Поэтому при более строгом подходе генеративные методы послойного выращивания изделий следует рассматривать как  $2\frac{1}{2}$ D-методы. Это означает, что в Z-направлении объем изделия формируется ступенчато. 3D-модель изделия является его своеобразным электронным эталоном. Поэтому в направлении Z поверхность формируется тем точнее, чем меньше толщина слоев, однако «лестничные ступеньки» никогда окончательно не исчезнут.

В настоящее время имеющиеся установки типа Rapid Prototyping обеспечивают толщину слоев в пределах 0,1-0,025 мм, хотя микротехника

позволяет работать с нанослоями до 5 нм, а методы наплавки охватывают даже сантиметровые области.

Принцип генеративного изготовления независимо от той или иной физической сущности применяемого метода материализации электронной 3D CAD модели реализует единую базу данных в STL-наборе для всех имеющихся в настоящее время RP-установок, тогда как не генеративные методы, например, ЧПУ - фрезерование, требуют (как правило) специфических для данной конкретной установки или станка наборов данных. Таким образом, генеративные методы являются одним из важных элементов современной технологии создания продуктов и интегрированных составной частью в компьютеризированное производство.

*Генеративное устройство изготовления называется фабрикатором (Fabricator или FABBER). Когда речь идет о прототипах, применяют понятие прототайпер (Prototyper).*

*Выделяют две стадии, присущих всем способам материализации 3D электронного образа изделия: генерирование отдельного слоя и соединение его с предшествующим слоем (Z-направление).*

Энергия затрачивается на формирование в заданных контурах слоя и на процесс соединения слоев, в котором, как правило, участвуют приповерхностные объемы материала предшествующего слоя. При листовых технологиях слои вырезаются из фольги заданной толщины и наклеиваются друг на друга или свариваются друг с другом.

Собственно материализация 3D-модели, т. е. создание твердого слоя и послойного наращивания, может осуществляться различными способами, прежде всего:

- генерированием из жидкой фазы;
- генерированием из твердой фазы;
- генерированием из газовой фазы;
- генерированием из плазмы.

## **2.2 Генерирование из жидкой фазы**

*В основу этих способов положен процесс отверждения жидких или вязких фотомономеров за счет полимеризации под влиянием ультрафиолетового облучения. Эти процессы обозначаются как*

*фотополимеризация, а также как полимеризация, стереолитография или стереография.* Применяются жидкие вязкотекучие, несетчатые и низкосетчатые мономеры, которые пропитываются соответствующими ингибиторами. При ультрафиолетовом облучении спонтанно начинается полимеризация, вследствие чего жидкий мономер становится твердым полимером. Это характерно для всех УФ - источников света.

*При методе лазерного сканирования* по поверхности смолы тонкий лазерный луч воспроизводит контур соответствующего сечения (2D CAD модели) и создает локально критическую концентрацию энергии, необходимую для полимеризации и отверждения. Применяют также двухфотонный метод, при котором критическая энергия фокусируется в области пересечения двух отдельных лазерных лучей докритической мощности.

*При методе масок* УФ облучению подвергаются поверхности жидкости, соответствующие конфигурации  $i$ -того сечения, определяемые масками.

*При методе «печатающая головка – лампа»* материал для построения сечения наносится с помощью головки и одновременно с помощью УФ - лампы полимеризуется.

*Под полимеризацией понимают процесс получения полимеров, при котором макромолекула образуется путем последовательного присоединения молекул низкомолекулярного вещества (мономера) к активному центру, находящемуся на конце растущей цепи.* В зависимости от вида частиц, способных вызвать процесс полимеризации, различают *радикальную, катионоактивную и анионную полимеризацию.*

Для стереолитографии необходимо пространственное ограничение полимеризации, чтобы затвердеть могли только те области, в которых формируется слой.

След затверждения от лазерного луча обладает геометрией параболического полуцилиндра, обращенного криволинейной поверхностью вглубь ванны (от поверхности жидкого мономера). В зависимости от мощности и диаметра луча лазера такой параболический полуцилиндр может иметь различную ширину и глубину, что с учетом оптической глубины проникновения позволяет применение процедуры оптимизации, а также оценку времени отверждения облученного объема жидкого мономера (рис. 2.1).



При затвердевании мономер→полимер происходит уплотнение материала, что проявляется в усадке смолы и возникновении остаточных напряжений в затвердевшем материале, которые способны привести к деформации изделия или даже появлению трещин. Величина линейной усадки для эпоксидной смолы составляет примерно 0,06%, а для акрилата – 0,6%.

Метод выращивания из жидкой фазы позволяет изготовление изделий, габариты которых превышают размер пространства построения (ванна), путем соединения отдельных частей в сложные изделия. Допускается изготовление изделий с внутренними полостями и их опорожнение через дренажные отверстия.

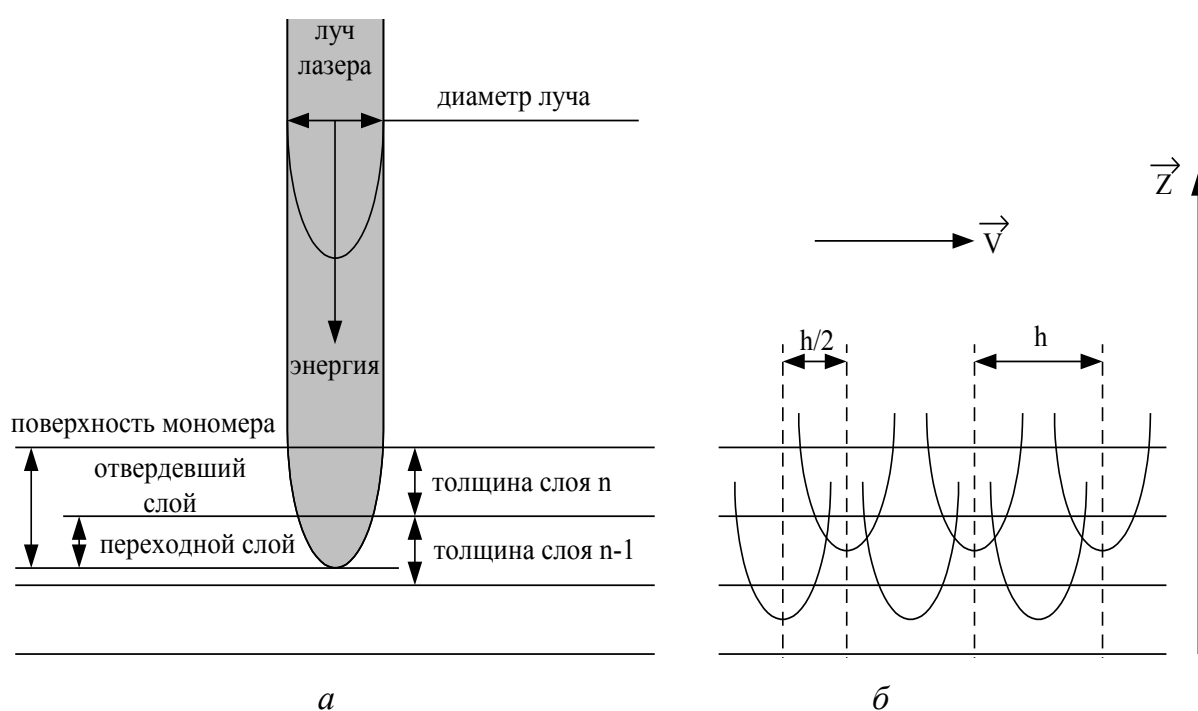


Рисунок 2.1 – Влияние лазерного луча на отверждение жидкого мономера:  
 а – след единичного луча; б – суммарное воздействие

### 2.3 Генерирование из твердой фазы

Послойное выращивание изделий можно осуществить генерированием из твердой фазы материалов:

- спеканием, наплавкой порошков, смесей порошков и гранулированных материалов;
- вырезанием и последующим скреплением из лент, полос и листов отдельных элементов, конфигурации и толщины, в том числе

соответствующих слоям 3D CAD модели; спектр материалов – металлы, пластики, бумага, картон;

– методами экструзии (наплавкой выдавливаемых слоев по заданной программе);

– склеиванием гранулированных продуктов и порошков с помощью связующих (методы 3D-печати).

При классическом (не генеративном) спекании соседние частицы (порошок) соединяются путем массообмена при высокой температуре и высоком давлении с затратой большого времени. Спекание реализуется через механизм диффузии. Она начинается в месте контакта частиц с дальнейшим транспортированием материала вдоль границ зерна и далее в объем.

Лазерное избирательное спекание как основа одного из генеративных методов изготовления не требует ни высокого давления, ни длительного времени. Кратковременная термическая активация частиц, находящихся свободно друг возле друга в флюсовой подушке, переходит в селективное спекание. Процесс послойно повторяется. После остывания получаемое изделие характеризуется некоторой пористостью. При полном расплаве частиц пористость отсутствует. Такие процессы характерны для металлических порошков, когда требуется плотная структура материала конечного изделия. Описанный механизм реализуется и в тех случаях, когда вместо лазерного используются электронные и инфракрасные излучения.

*Материалы для спекания и плавления (наплавки)* применимы теоретически без ограничений: полимерные порошки, многокомпонентные метало-полимерные порошки, металл-металл, однокомпонентные металлические и керамические порошки, проволока и др.

Порошки полимерных синтетических материалов имеют низкую температуру плавления (до 200 °С). Ограничению ванны расплавленного материала способствует низкая теплопроводность.

При спекании различно поведение кристаллических и аморфных синтетических материалов, а также металлов. Большое количество оплавленных и спеченных материалов обладают кристаллической структурой; стекло, смола, например, после расплава и отвердения имеют аморфную структуру. Если после спекания изменяется агрегатное состояние материала, то это ведет к изменению исходных физико-механических свойств.

При спекании металло-полимерных порошков полимерные оболочки расплавляются и образуют массу, в которой распределены металлические частицы (порошок). Достижимая прочность достаточна для дальнейшего процесса в печи с восстановительной атмосферой, где полимерная

составляющая удаляется, а в свободные пространства устанавливается легкоплавкий металл, например, медь. Сходная технология для формовочных смесей и керамики.

Более надежен и быстр процесс спекания порошков металл – металл, когда смешиваются порошок тугоплавкого и легкоплавкого металлов. Низкоплавящийся металл берет на себя функцию связующего вещества (рис. 2.2).

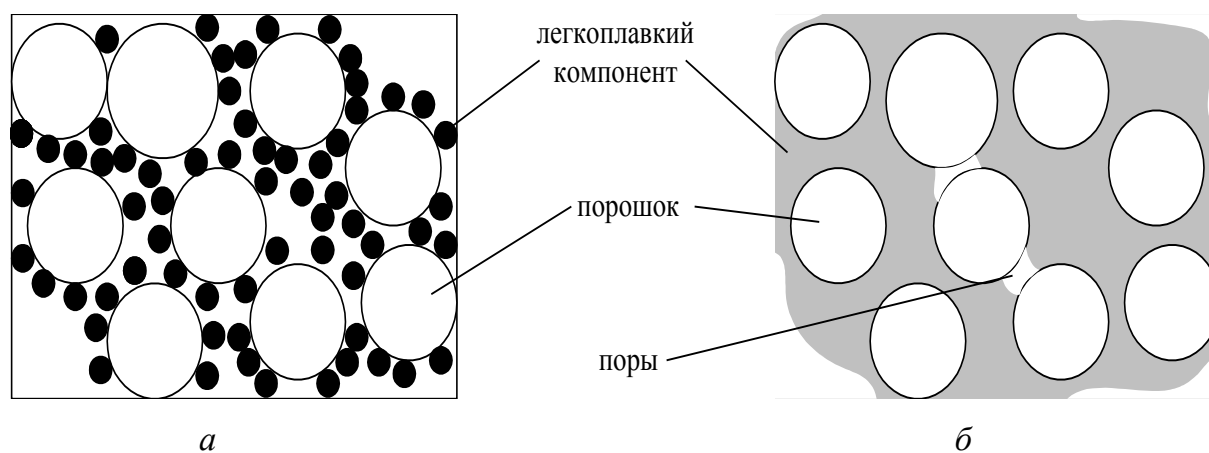


Рисунок 2.2 – Принцип спекания многокомпонентного металлического порошка

а – исходное состояние, б – после спекания

*Лазерному спеканию* подвергаются и однокомпонентные порошки металлов или керамики. Они характеризуются более высоким поверхностным натяжением в расплавленном состоянии и более низкой вязкостью, чем синтетические материалы. Температура спекания, естественно, выше при прямом спекании, чем через легкоплавкие компоненты. Не требуется никаких технологичных подпорных конструкций, потому как их роль играет не затвердевший порошок.

*Лучевое спекание и плавление* по сравнению со стереолитографией существенно расширяет круг материалов для использования в генеративных технологиях. Изделия, полученные по этим методам, могут быть как прототипами, так и конечными продуктами, касается это изготовления инструмента и оснастки или основного промышленного производства. Достижимая точность изделия определяется размерами частиц порошка и диаметром лазерного луча или качеством изображения оболочковой формы в инфракрасных способах. Изготовление внутренних пустот возможно, но освобождение их от порошка представляет некоторые трудности.

На расплавлении твердой фазы базируются *методы выдавливания и баллистические*.

В первом случае материалы в форме проволоки или таблеток расплавляются в специальных камерах и через сопло, перемещающееся по заданной программе, в вязком виде наносятся на некую подложку (или частично готовую деталь). Аналогично поступают с пастами или пенами. Затвердевание нанесенного объема происходит термически – через испарение растворителей или химические реакции. В случае термической экструзии (выдавливание через сопло) нанесенные объемы вязкого материала охлаждаются и затвердевают через отвод тепла в деталь и окружающее пространство. Теоретически не существует ограничений для каких-либо материалов. Подвод материала и его нанесение осуществляется с помощью сопла, формообразование и материализация зависят от управления его перемещением в координатах X-Y и пошагово по Z.

Методы нуждаются в технологических опорах, которые удаляются после завершения процесса выращивания.

Создано ряд синтетических материалов, которые по свойствам приближаются к конструкционным материалам, в том числе полифенилсульфон – синтетический материал для генеративного изготовления. Предпочтительной формой подаваемого в нагреватель материала являются таблетки.

*Баллистические методы получения изделий генеративным способом отличаются тем, что расплавленный материал через сопло подается прерывисто в форме отдельных капелек.* Методы бесконтактные. Для обеспечения однородности материала в объеме изделия необходимо, чтобы температура шариков-капель материала была на уровне, позволяющем им «приплавляться» и таким образом прочно соединяться с предшествующим слоем. При маленьких шариках места соединения частицы остаются не видимыми и достигается большая степень детализации конструктивных элементов и поверхности. Метод позволяет использовать материалы различного цвета или с различными физико-механическими свойствами, а также выравнивать поверхности нанесением шариков других диаметров или других материалов. Теоретически не существует никаких ограничений по материалам, включая металлические. Метод высокопроизводительный. Количество одновременно применяемых материалов ограничивается возможностью размещения экструзионных головок.

*Послойное выращивание изделий склеиванием порошка или гранулированных материалов называют еще методами 3D печати (по*

типу 2D струйного принтера). На распределенный слой порошка или гранул по программе «печатается» связующее вещество в пределах контура сечения и скрепляет эти частички. Оставшийся свободным от связующего порошок играет роль распределенной опоры и после завершения выращивания изделия устраняется.

Спектр применяемых материалов практически не ограничен, т. к. главную роль играет связующее. Обработке могут подвергаться от термопластов до продуктов питания и фармацевтических биологически активных веществ. Возможна загрузка печатающей головки различными связующими и даже живыми клетками через жидкости-носители. Таким образом, 3D-печать методы позволяют получать локальные объемы материалов с различными физико-механическими свойствами вместо материалов изотропных.

Изготовленные изделия нуждаются в дообработке (дополнительная пропитка, спекание в печи), чтобы быть готовой к эксплуатации. Однако печатные головки с большим числом сопел (>100) достаточно дороги.

*Наиболее простым генеративным методом получения трехмерного изделия является изготовление слоистых объектов.* Каждое сечение 3D САД модели вырезается из листовых материалов – фольг, бумаги, пластиков, картона и др. и затем в строгой очередности присоединяется к предшествующему. Слои должны быть очень тонкими и их можно позиционировать точно один к другому. Вырезание «слоя» осуществляется лучом лазера, горячей проволокой, ножом или фрезой. Для соединения слоев применяют склеивание, лазерную, диффузионную и ультразвуковую сварку, полимеризацию и др. Применяют соединение штифтом по центровым отверстиям, увязанным с контуром, а также возможно применить аддитивный принцип в комбинированных процессах, например, при лазерном резании и одновременном скреплении листов.

*Методы соединения слоистых материалов особо эффективны для генерации массивных изделий, независимо от материала.* При этом реализуются скорости раскроя (резания) существенно более высокие, чем при обработке массивных материалов (рис. 2.3).

В большинстве случаев получаемое изделие обладает анизотропией свойств (вдоль слоя и поперек него), а изготовление внутренних полостей затруднено или невозможно вообще. Соотношение объема детали к отходам может достигать 1:10 и даже больше.

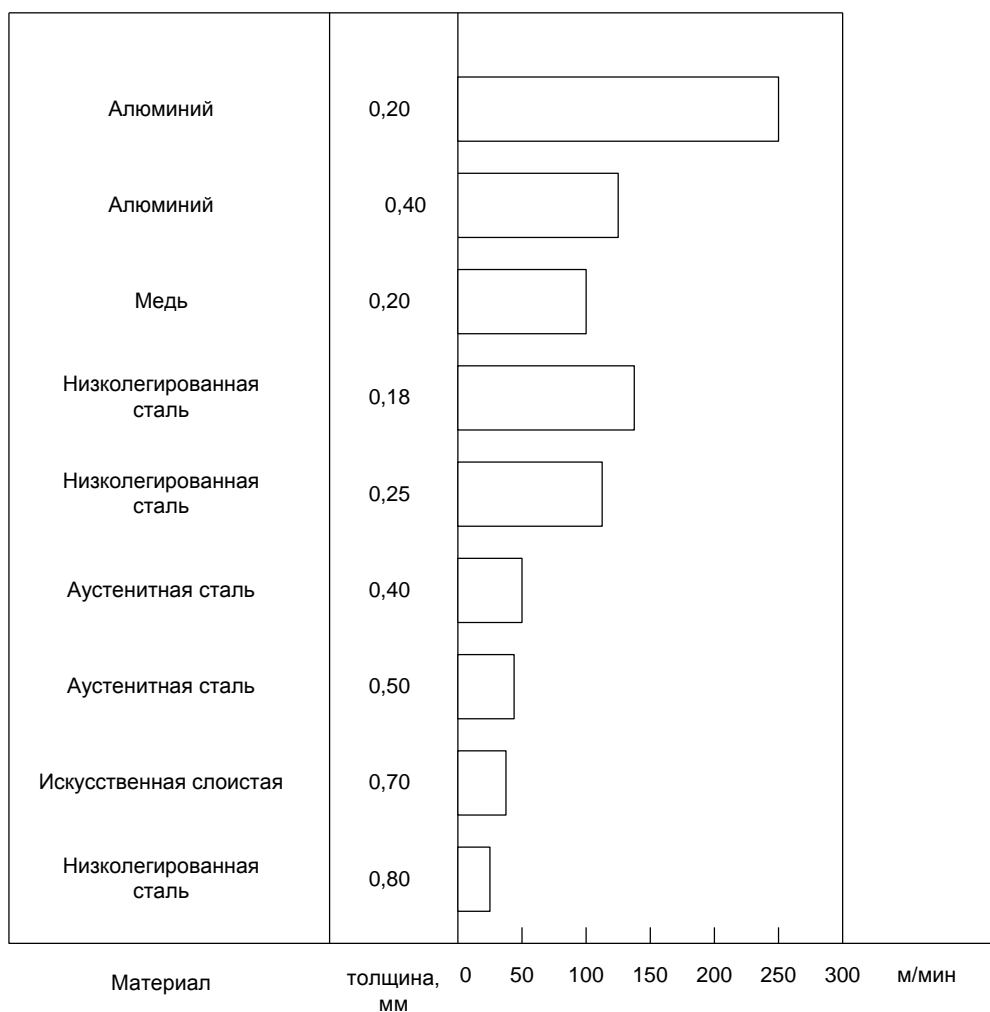


Рисунок 2.3 – Достижимая скорость раскроя лазерным лучом

## 2.4 Генерирование из газовой фазы

Различают физическое осаждение из аэрозолей и химическое осаждение из газовой фазы.

*Для физического осаждения используют аэрозоли, представляющие собой мелкие капельки распыленных жидкостей-носителей с находящимися в них твердыми веществами величиною до 200 нанометров. Эта жидкость (другое название – чернила) транспортируется газом-носителем и через систему сопел наносится на субстрат по определенной геометрии.*

*Аэрозольные методы осаждения материалов именуется как методы печати.*

От 3D-печати они отличаются тем, что «чернила» не обладают функцией связующего и печать осуществляется на субстратах, а не на флюсовой подложке. Возможна реализация самых тонких структур,

соединения материалов друг с другом. Спектр применяемых материалов чрезвычайно широк, вплоть до клеток живого организма. В то же время методы более ориентированы на сложные 2D-структуры и менее подходят для сложных 3D-структур.

*При химическом осаждении газы, способные к химической реакции, активируются внешним источником энергии, порождая локальные реакции, в результате чего образуются и осаждаются на субстрат твердые вещества в соответствии с требуемой геометрией. Энергию поставляют два лазерных луча, каждый до критической мощности. В месте скрещивания лучей облученным объемам сообщается энергия, превышающая критические значения, достаточные для начала химической реакции, в результате которой образуются твердые вещества, например, твердый оксид алюминия или др. Со скоростью до 80 мкм/с на платформе могут строиться самые тонкие конструкции, филигранные структуры, например, в технике микросистем и в биомедицинской технике. При этом предельно улучшается качество поверхностей, например, генеративно изготовленных деталей.*

## **2.5 Генерирование из плазмы**

Изложенное выше указывает на то, что генерирование наращиваемых слоев, как правило, связано с изменением агрегатного состояния наносимого вещества. Сюда относятся и методы генерации слоев из плазмы.

При высоких температурах происходит ионизация газов, когда атомы вещества теряют электрон. Газ, атомы и молекулы которого ионизированы (концентрация положительных ионов примерно равна концентрации электронов и катионов), переходит в иное агрегатное состояние – плазму, например, при разряде электрической дуги. Струя плазмы направляется на подложку и конденсируется в виде покрытия различной толщины. Особо эффективно генерирование плазмы для тугоплавких материалов. В некоторых методах для термического диспергирования материала и разогрева его до температуры плавления и испарения применяют высокочастотное электромагнитное поле. Более подробно эта технология будет рассмотрена ниже.

Значительное распространение получили методы генерирования слоев по вакуумным ионно-плазменным технологиям, реализуемым в широком

диапазоне температур (100–1000°C). Широкие технологические возможности – десорбция, химические реакции, миграция поверхностных атомов и др. позволяют синтезировать в вакууме слои различного химического состава и различных толщин слоев. Возможно генерирование многослойных, в том числе композиционных материалов в одновакуумном цикле.

## 2.6 Другие методы генерирования

Область генеративных технологий бурно развивается. Появляется все новые и новые идеи использования физических, химических, электрических, магнитных и др. эффектов для послойной материализации 3D CAD-моделей.

Сюда можно отнести метод двух лазерных лучей, пересекающихся в точке, где необходимо инициировать полимеризацию; метод двух фотонов (горячая полимеризация); фотополимерно голографическое изображение; соединение элементов из фольги посредством полимеризации; использование инфракрасного излучения и др.

Интересна идея использования сонолюминесценции. *Под сонолюминесценцией понимают эффект пустых пространств в жидкости (например, пузырьки воздуха в воде) в состоянии концентрировано направлять звуковую энергию, что приводит к появлению ультракоротких световых вспышек в УФ-области. Благодаря звуковым полям и наложению их волн объемный объект генерируется путем полимеризации в заданной области.*

*Многообещающее предложение – использовать эффект электрической вязкости.*

Под электрической вязкостью понимают изменения в широких пределах свойств определенных материалов, прежде всего их вязкость, под влиянием сильных электромагнитных полей. Влияя на магнитное поле, можно целенаправленно изменять вязкость (вплоть до отверждения) вдоль заданной пространственной кривой. Это непрерывное обрамление (своеобразная рубашка) может заполняться фоточувствительными или другими материалами, которые быстро отвердевают. После этого такое обрамление удаляется (расплавлением), строится новое обрамление и генерирование производится до окончания построения изделия.



## 2.7 Элементы, образующие слои при генерировании изделия

Установки, реализующие генеративный принцип изготовления изделия послойным выращиванием, имеют *подвижные элементы и генерирующие элементы. Генеративные методы не требуют инструмента.* Часть встречающейся комбинации подвижных и генерирующих (а также оконтуривающих) элементов приведена в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Элементы, образующие слои

Физический принцип	Генеративная группа методов	Подвижный элемент	Генерирующий (оконтуривающий) элемент
Фотополимеризация	стереолитография	сканер	лазер
Плавление и спекание порошков и гранул	спекание	сканер	лазер
Вырезание из фольги и соединение	изготовление слоистых объектов	плоттер	лазер, резец, фреза
Генерирование из твердой фазы	экструзия и баллистика	плоттер	сопло, экструдер
Склеивание порошков гранулированных материалов связующим	3D-печать	плоттер	печатающая головка
Генерирование из газовой фазы	аэрозольная печать	плоттер	сопло

Изложенное в настоящем разделе 2 позволяет сделать вывод о том, что генерирование изделия послойным наращиванием практически для всех реализуемых физических принципов связано с изменением агрегатного состояния материала – полимеризация, осаждение, оплавление, отверждение и др.

По признаку исходного агрегатного состояния материала генеративные способы производства можно сгруппировать следующим образом (рис. 2.4).

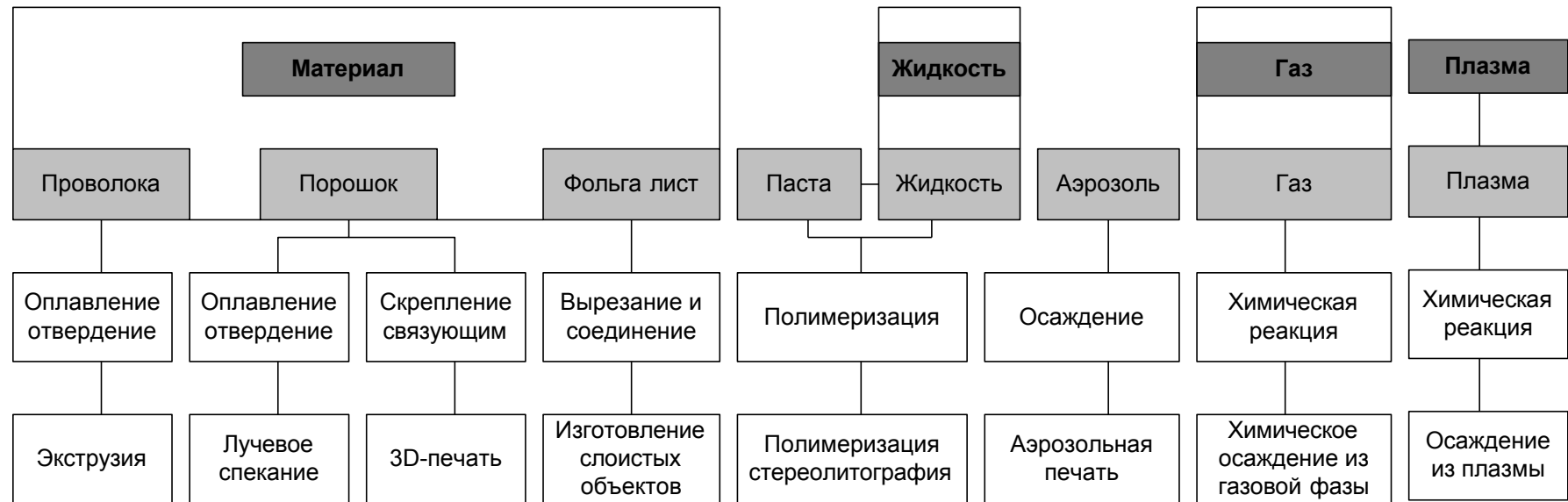


Рисунок 2.4 – Классификация генеративных способов производства

по агрегатному состоянию исходного материала (по DIN 8580)

## 2.8 Вопросы для самостоятельного контроля

1. Какова база данных для процессов материализации 3D CAD модели?
2. В чем состоит различие формирования изделия по различным осевым направлениям?
3. Какие среды используют для генеративного изготовления изделия?
4. Какова сущность генерирования изделия из жидкой фазы?
5. Какова сущность генерирования из твердой фазы?
6. Какова сущность генерирования из газовой фазы?
7. Какова сущность генерирования изделий с помощью двух фотонов?
8. Какова сущность генерирования на базе использования эффекта сонолюминесценции и электрической вязкости?
9. Каково наличие подвижных и генерирующих элементов RP-установок?
10. Приведите классификацию генеративных способов по агрегатному состоянию исходного материала.

## РАЗДЕЛ 3

### ИНТЕГРИРОВАННЫЕ ГЕНЕРАТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ МАКРОУРОВНЯ

#### 3.1 Место интегрированных генеративных технологий макроуровня в создании изделий

Рабочие процессы изготовления традиционно базируются на послойном удалении материала заготовки для получения детали заданных размеров, формы и качества. Реализуется принцип изготовления «от большего к меньшему». Понятие Rapid Prototyping означает непосредственное изготовление изделия или прототипа с помощью генеративных технологий. При этом под прототипом понимают первичное физическое представление продукта, изготавливаемого впоследствии, испытательная модель или проект образца. Каждый вид физического образца, модели или макета в качестве прототипа должен быть пригоден для усовершенствования продукта и сокращения пути от идеи до конечного изделия. Прототипы должны иметь высокий уровень абстракции и быть простыми, обладать уровнем свойств, достаточных для тестирования уже на стадии проекта. Создание прототипов изделий, их моделей также требует много времени.

Анализ цикла создания продукта (ЦСП) показывает, что во всех его фазах – от возникновения идеи продукта вплоть до его внедрения на рынок – необходим прототип. Для промышленных товаров широкого потребления ЦСП может быть разделен на 6 фаз. Прототипы, использованные в отдельных фазах создания, имеют различные признаки относительно количества экземпляров, свойств используемого материала, а также геометрических, эстетических и функциональных требований (рис. 3.1).

Изготовление моделей и прототипов, необходимых в рамках создания изделия, происходит, как правило, посредством обычных технологий, при необходимости в комбинации с литейным производством. В частности, здесь находят применение NC фрезерные станки, копировальные фрезерные, токарные станки и пр. Кроме того, эти модели вручную собирают, склеивают или спаивают.

Новые этапы развития науки, информатики, техники CNC, лазерной технологии и т. д. позволили перейти к *интегрированным генеративным способам ускоренного формообразования* на макроуровне, избавиться от

нескольких фаз создания прототипов, рассмотренных выше. Изготовленные генеративным способом прототипы создаются на базе 3D CAD данных, и их изготовление осуществляется автоматически без инструмента и оснастки, а лишь на основании цифровой модели продукта. Именно это позволяет поддерживать информационное обеспечение на каждом этапе разработки продукта и изготовления его прототипа.

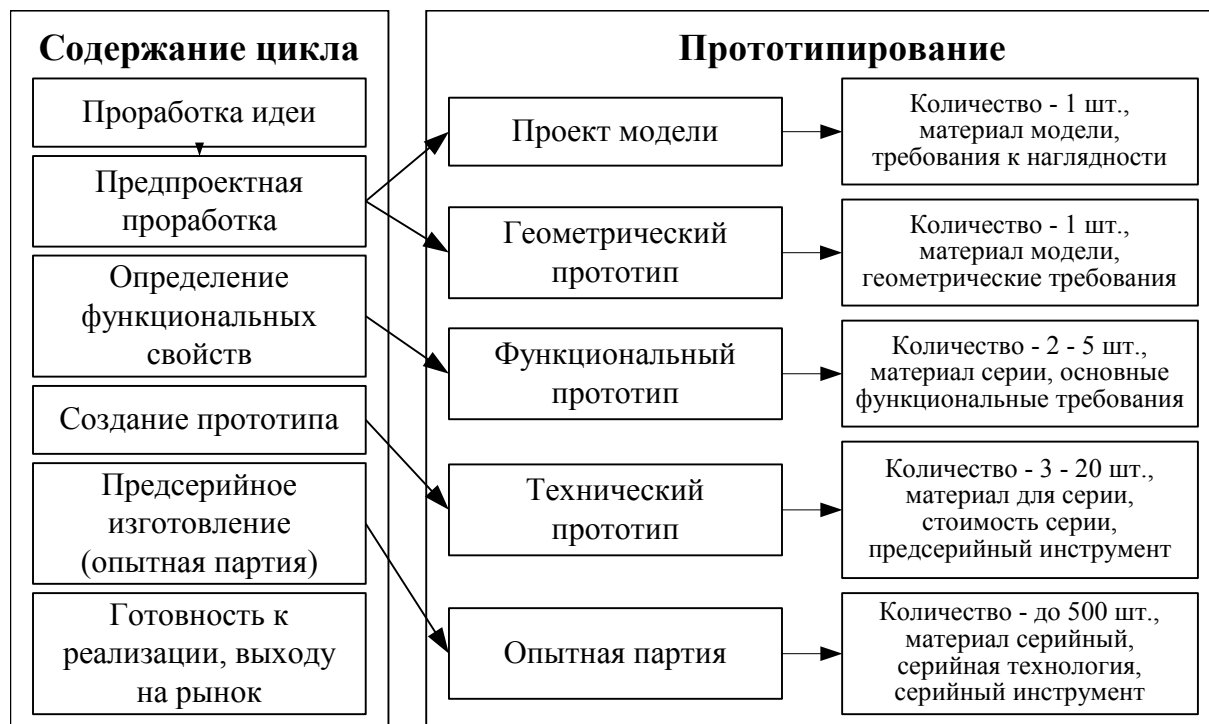


Рисунок 3.1 – Этапы создания прототипов изделий (традиционные)

Впервые такая технология - лазерная стереолитография (SL) - была представлена на автошоу в Детройте (США) в 1987 году.

Подобные технологии разрабатывались в различных центрах и странах под не совпадающими названиями: Rapid Prototyping (быстрое прототипирование или «оперативное» макетирование), Solid Freeform Fabrication (твердотельное свободное выращивание), Laminate Synthesis (послойный синтез), 3D Component Forming (формирование трехмерных объектов), формирование слоев наплавкой и др. Они относятся к генеративным технологиям, в основе которых лежат различные способы быстрого изготовления изделий или их прототипов послойным наращиванием, а не разделением объемов, что характерно для конвенциональных (традиционных) технологий резания, штамповки, электроэрозионной обработки и т. д.

*Понятие «генеративные технологии» наиболее емко и обще определяет суть этих и других различных способов ускоренного формообразования послойным наращиванием, независимо от того, каков механизм этого наращивания, какие материалы и в каком состоянии используются, какие ограничения имеют те или иные способы материализации, каковы масштабы наращиваемых объемов.*

### **3.2 Структура генеративных технологий макроуровня**

*Все способы ускоренного формообразования макроизделий реализуют генеративный принцип «от малого к большому» посредством последовательного неразъемного соединения элементарных слоев наращиваемого объема. Изделия любой сложности формы представляют собой уложенные (и скрепленные) один на другой слои с 2D контуром постоянной или переменной толщины. Именно контур в плоскости X-Y отличается наибольшей точностью, а в направлении оси Z происходит дискретное наращивание слоев, образующих своеобразные ступеньки. Естественно, изделия без ограничений по сложности формы производятся путем генеративных технологий без формообразующей оснастки, что кардинально сокращает этапы технологической подготовки производства или собственно изготовления и имеет целый ряд достоинств.*

Разработка генеративных технологий явилась настоящим прорывом в области интегрированных технологий, позволяющих во времени и пространстве совместить или чрезвычайно сблизить разработку, конструирование и изготовление типовой единичной модели, детали или изделия в сборе, сократить время в зависимости от степени сложности на 30÷70%, а иногда и в несколько раз.

Но не только фактор времени стал определяющим для быстрого завоевания все новых областей применения генеративных технологий – авиастроение, автомобилестроение, электроника, инструментальное производство, медицина, археология, архитектура и др. *Прямое выращивание изделий способно решать задачи формообразования макроизделий, микро- и нанослоев из различных материалов и управлять их функциональными физико-механическими свойствами с заданным градиентом вплоть до атомного.*

Во временной цепочке традиционного создания продукта – период между возникновением идеи и выходом ее на рынок – значительная доля приходится на изготовление моделей, прототипов и образцов изделия. В

рамках интегрированных технологий задача значительного сокращения этой доли решается наиболее успешно.

Развитие мощной вычислительной техники, способной оперировать трехмерными образами, успехи в разработке лазерных технологий обработки материалов явились основой развития технологий послойного создания трехмерных реальных объектов любой степени сложности.

*Интегрированный рабочий процесс ускоренного изготовления деталей или их прототипов на сегодняшний день представляет собой органичное соединение возможностей компьютерных технологий обработки информации, трехкоординатного моделирования (CAD), виртуального инжиниринга и современных лазерных и др. способов изготовления (CAM).*

Идеология ускоренного формообразования изделия (модели, прототипа конечного изделия) базируется на: возможности компьютерного автоматизированного проектирования изделия (по фотографиям, чертежам, аналитическим зависимостям или результатам измерений), компьютерной оптимизации его конструкции, исходя из требований дизайна, формы, функциональных свойств (CAD); трансформации трех координатной модели в совокупность послойных моделей; возможности воспроизвести эту совокупность послойных моделей (рис. 3.2), т. е. материализовать всю модель как единое целое, как твердотельное изделие или его прототип (CAM).



Рисунок 3.2 – Структура интегрированного рабочего процесса ускоренного формообразования – Rapid Prototyping

Таким образом, функциональная структура интегрированного рабочего процесса ускоренного формообразования изделия может быть представлена в такой последовательности:

1. Получение трехмерной математической модели изделия. Она создается по данным чертежа, частным аналитическим зависимостям, фотографиям. Если изделие воспроизводится, то модель получают на трех координатной измерительной машине путем обмера оригинала сканированием поверхности послойно или поточечно (рис. 3.3а).

2. Компьютерная оптимизация конструкции производится по программам, исходя из функционального назначения, дизайна, др. требований, предъявляемых к разрабатываемому изделию. Важность этого этапа определяется еще и тем, что для компьютерной оптимизации не требуется твердотельная модель или изделие, что резко сокращает время на проектирование.

3. Послойное представление теоретической модели совокупностью двумерных относительно простых моделей (рис. 3.3б).

4. Создание программ компьютерного управления движением рабочего органа («инструмента») с помощью которого послойно в соответствии с совокупностью 2D модели будет материализоваться теоретическая модель изделия или его прототипа.

5. Послойное (рис. 3.3в, г) получение одним из способов цельной твердотельной модели или изделия (или серии изделий). Наглядно иллюстрирует эти этапы ускоренного формообразования рис. 3.3.

6. Окончательное изделие или модель получают последующим улучшением свойств. Для этого на первой стадии устанавливаются различия свойств ожидаемого прототипа и требуемого изделия – по геометрической форме, физическим, механическим, химическим и др. свойствам.

На второй стадии часть этих различий устраняется за счет параметров процесса материализации теоретической модели.

На третьей, окончательной стадии происходит «облагораживание» изделия, максимально возможное приближение его функциональных свойств к требуемым: износостойкость, прочность, электропроводность, металлизация, доводка и т. д.

Изложенное позволяет по иному выстроить всю цепочку прототипирования и производства изделия, всецело базирясь на идеологии генеративного послойного изготовления (рис. 3.4). Сравнение с традиционными подходами (рис. 3.2) показывает, что генеративная



технология эффективна на этапах прототипирования и позволяет сократить количество этих этапов.

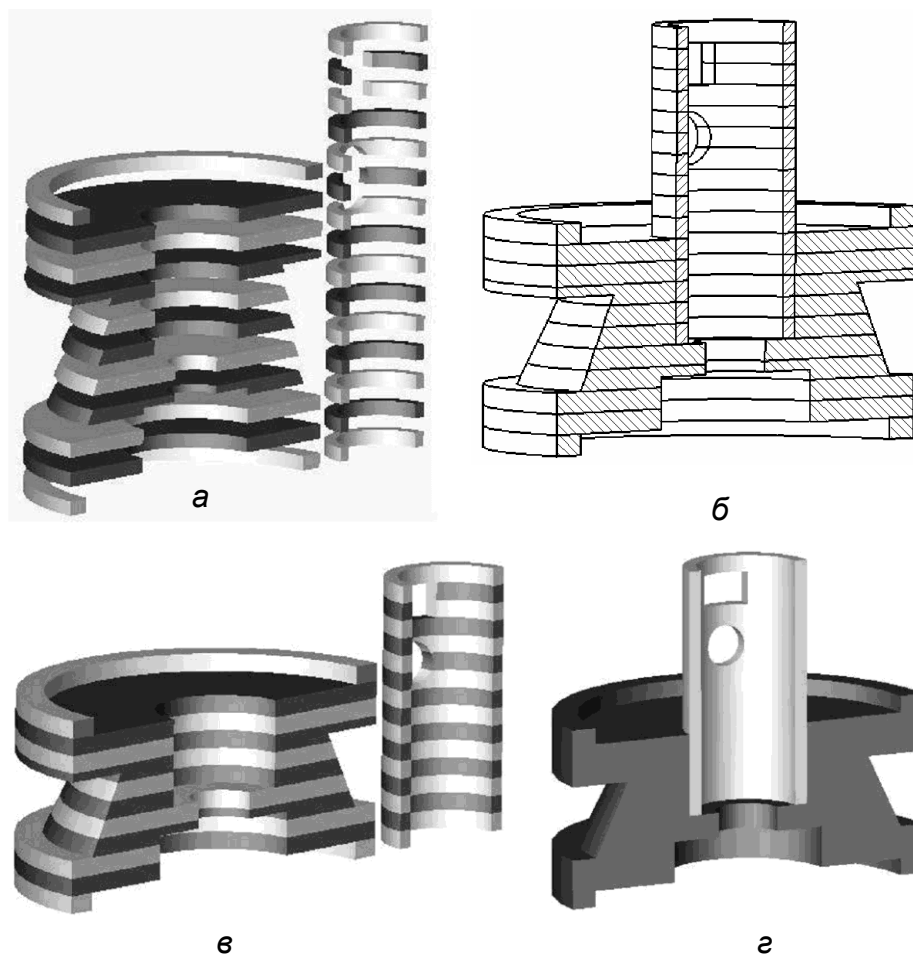


Рисунок 3.3 – Основные переходы генеративного способа послойного выращивания

Но главное достоинство состоит в том, что идея способа генеративного (послойного) изготовления является объединяющей, интегрирующей процессы моделирования, создания инструментального обеспечения и изготовления (рис. 3.5).

Это позволяет представить концептуальную структуру интегрированных технологий, базирующихся на идее генеративного изготовления следующим образом: компьютерное создание концептуальных моделей, генеративное создание функциональных прототипов, генеративное создание инструментального обеспечения, генеративное серийное производство, выход на рынок.

База данных	CAD	<b>Идея</b>	CAD RP пропорциональная модель	Общая база данных + организация
	CAD	<b>Планирование/ Определение</b>	CAD RP эргономичная модель	
	CAD, CAE	<b>Концепция</b>	CAD, CAE RP эргономичная модель	
	Разработка			
	CAD	<b>Проект/ Дизайн</b>	CAD RP функциональная модель	
	CAE	<b>Конструкция</b>	CAE RP функциональная модель	
FE	<b>Расчеты</b>	FE RP прототип		
Создание модели		<b>Создание образца</b>	RP образец	
База данных	CAT, CAQ, PPS	<b>Испытание Документирование</b>	CAT, CAQ, PPS RP образец	Общая база данных + организация
	CAQ, PPS	<b>Средства производства Планирование/ производство</b>	CAQ, PPS Rapid Tooling	
	CAT, CAL, CAQ, PPS	<b>Производство продукта</b>	CAT, CAL, CAQ, PPS Rapid Manufacturing	
<b>Продукт</b>				
Традиционная разработка продукта и традиционное создание модели		<b>Этапы разработки продукта</b>	Simultaneous Engineering и генеративные технологии производства (RP = Rapid Prototyping, Rapid Tooling, Rapid Manufacturing)	

Рисунок 3.4 – Частично замкнутые классические СИМ-цепочки процесса (слева) и полностью замкнутые цепочки процесса СИМ этапы (справа) с применением генеративных технологий

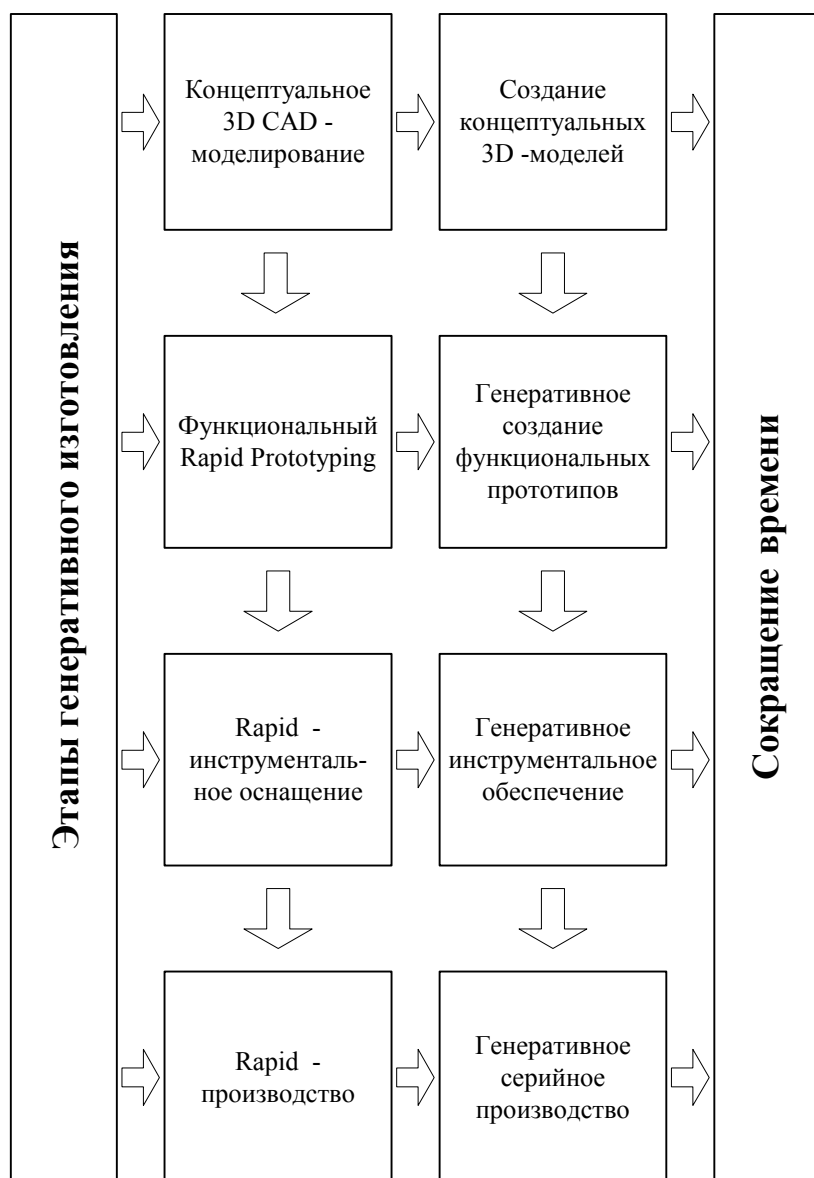


Рисунок 3.5 – Этапы генеративного создания прототипов и изделий

### 3.3 3D CAD моделирование и создание электронного образа (модели) послойного изделия

Отправной точкой для каждого генеративного метода является трехмерное описание геометрии прототипа, предназначенного для изготовления, из которого следует создание физической модели.

Например, *объемное 3D моделирование предоставляет неограниченные возможности воспроизведения в виртуальном пространстве всего многообразия объектов окружающего материального*

*мира, позволяет не только встраивать в него виртуальные модели этих предметов, но и исследовать взаимодействие их электронных образов, оптимизировать еще не существующие конструкции и процессы, манипулируя ими как реальными.*

Создание CAD моделей (3D моделирование и трансформация теоретической модели в систему 2D моделей), а также подготовка к дальнейшему использованию требует основной части времени, затрачиваемого при RP процессах. Оно требует повышенного внимания еще и потому, что может использоваться как диалоговый инструмент для оптимизации конструкции изделия, для быстрого устранения недостатков опытного образца путем изменения банка данных. Чаще всего первоначальная модель представлена как некоторое геометрическое твердое тело. С помощью CAD систем описывается геометрия детали для ее дальнейшей математической обработки с помощью треугольной аппроксимации (триангуляции) и затем это описание переводится в стандартный формат STL. Далее STL-данные пересчитываются для отдельных сечений (Slice-process) с шагом дискретизации  $h_C = 0,025 \div 0,15$  мм.

Исходя из вида RP-оборудования, Slice-process может сам преобразовываться во внешнюю систему обработки геометрии или в систему управления процессом в оборудовании.

На основе этого используются различные форматы данных, которые поддерживаются системой управления процессом, – двумерные (формат HPGL) и трехмерные (формат STL).

Геометрические данные для требуемого перевода в управляющие данные RP-процесса часто конвертируются в стандартный геометрический формат, информацию чертежа в медицинской технике, в FEM – сети технических чертежей и физических моделей. Для проработки геометрической входной информации применяются различные процессы и функциональные варианты: 3D CAD – объемный модулятор с генерацией трехмерных данных или в формате STL; обработка цифровых или оцифрованных изображений, фильтрация и очистка трехмерной точечной информации единственного физического экземпляра; система обратной связи для дальнейшей обработки большого числа трехмерных точечных данных и перевода этих данных в систему плоских моделей; система обработки рисунков для сепарации и селекции точечных данных в медицинской технике.

В качестве связи между различными системами, разрабатывающими геометрию, применяются стандартные интерфейсы IGES, VDA-FS и STL-

обмен данными. Проработка данных этими инструментами следует, в общем, до установки однозначного трехмерного описания объема как предпосылки для слоистого процесса. Опыты показали, что слоистый процесс возможен и с четкой, корректно рассеченной и очищенной трехмерно-плоской моделью, и с помощью аппроксимации и интерполяции точечных слоев модели. Создание 2D, 3D CAD модели производится на базе цифровой техники. Это не простой путь, т. к. необходимо учитывать сложность формы объекта и его вторичность в последующей эксплуатации конструкции. Поэтому *создание 3D CAD модели связано чаще всего с применением оптико-электронной цифровой техники с использованием метода триангуляции, базирующегося на совместном анализе множества пространственных координат точек, поверхности и объема, с применением специальных фильтров, логических операций, аппроксимации и соответственно метода интерполяции.*

Естественно, что при разработке интегрированных технологий необходимо создание мощной сети 3D данных, так как 3D CAD моделирование является своеобразным катализатором в общей цепочке этапов интеграции методов, процессов, способов и т. д.: форма задания изделия – 3D CAD моделирование – виртуальный инжиниринг – послойная трансформация 3D моделей в совокупность 2D моделей – критерии выбора и выбор способа материализации – послойная материализация модели (изделия) – доработка технологии тиражирования – механическая (CNC) и др. виды обработки – модификация материала поверхностного слоя – применение генеративных микро- и нанотехнологий – выходной контроль (3D измерительная программа) и т. д.

Процесс создания интегрированных технологий и их реализацию можно сделать существенно более эффективными, если он будет сочетаться с использованием возможностей телеинженерии.

*Под телеинженерией понимается промышленное использование интегрированной техники мультимедиа – коммуникации при синхронной аудио-видео и графической интерактивной информации, разработкой и эксплуатацией которой управляют ведущие эксперты. Освоение идеи телеинженерии в жизни происходит через технологическую, техническую и организационную интеграцию мультимедийной техники.*

Мультимедийная коммуникация означает одновременную передачу синхронных (видео, аудио) и асинхронных средств (тексты, графики, таблицы), что позволяет проводить совместные видеоконференции (Web-камера в персональном компьютере), удаленную работу с совместными

данными (в рамках рабочей группы) постоянно модернизируемой рабочей области звуковыми и видеосигналами и др.

Телеинженерия позволяет объединить в рамках решения единой задачи RPTM опыт, знания и умения специалистов, территориально находящихся в различных точках земного шара.

Необходимо подчеркнуть, что *3D CAD модель является электронным эталоном изделия, обладающим идеальными его геометрическими характеристиками. Электронный эталон изделия чрезвычайно важен не только для процесса изготовления изделия, но и для его верификации.*

### **3.4 Системы 3D CAD моделирования в генеративных технологиях**

Обычно 3D CAD моделирование выполняется с использованием машиностроительных САПР.

#### **3.4.1 Машиностроительные САПР**

Как правило, машиностроительные САПР (системы автоматизированного проектирования) имеют многомодульную структуру. Типично разделение модулей на группы программ конструкторского проектирования механических объектов, промышленного дизайна, инженерного анализа (функционального моделирования), технологического проектирования, обмена данными, визуализации.

К числу основных тенденций в развитии CAD (Computer-Aided Design) / CAM (Computer-Aided Manufacturing) / CAE (Computer-Aided Engineering)-систем следует отнести:

- развитие САПР, как составной части системы PLM (Product Lifecycle Management), т. е. интеграция САПР с другими системами, поддерживающими жизненный цикл изделий;
- реализация возможностей совместного проектирования на базе использования Internet.

В настоящее время в мире имеется четыре реально развивающихся машиностроительных САПР верхнего уровня: Power Solution (Delcam), Unigraphics (UGS – Unigraphics Solution), CATIA (Dessault Systemes), Pro/Engineer (PTC – Parametric Technology Corporation). Среди САПР среднего уровня необходимо отметить Solid Works (Solid Works Corporation).

### 3.4.2 Система Power Solution (Delcam)

Компания Delcam (Великобритания) занимает лидирующее положение в Северной Америке и Европе среди поставщиков программного обеспечения CAD/CAM для создания технологической оснастки.

Система Power Solution представляет собой комплект автономных программ, хорошо интегрируемых между собой и с другими CAD/CAM системами: моделирование, черчение, конструирование пресс-форм, обратный инжиниринг, механическая обработка, гравирование, измерения.

Семейство программ Power Solution предназначено для конструирования и производства сложных изделий, в частности:

- PowerSHAPE – пространственное моделирование (гибридная система 3D моделирования):
  - PS-Draft (генерирование инженерных чертежей с пространственных моделей);
  - PS-Mold (объемное конструирование пресс-форм);
  - PS-Estimator (оценка корректности моделей);
  - PS-Arm (модуль обратного инжиниринга). Модуль обратного инжиниринга по данным, полученным с координатно-измерительных манипуляторов;
  - PowerMILL – пакет для многокоординатной механической обработки;
  - PowerINSPECT – измерение и контроль материальных объектов;
  - CopyCAD – восстановление поверхностей изделия по данным 3D сканирования (обратный инжиниринг);
  - ArtCAM – построение объемных рельефов по плоским рисункам и обработка на станках с ЧПУ;
  - PS-Exchange – преобразование данных между различными форматами и др.

### 3.4.3 Система Unigraphics (Unigraphics Solution)

Система Unigraphics NX – универсальная система геометрического моделирования и конструкторско-технологического проектирования, в том числе разработки больших сборок, прочностных расчетов и подготовки конструкторской документации. В ней используется концепция мастер-процессов – средств интерактивного проектирования, учитывающих особенности конкретных приложений. В конструкторской части (подсистема CAD) имеются средства для твердотельного конструирования,

геометрического моделирования на основе сплайновых моделей поверхностей, создания чертежей по 3D модели, анализ допусков и др. В качестве графического ядра используется Parasolid. В технологической части (подсистема САМ) предусмотрены разработка управляющих программ для токарной и электроэрозионной обработки, синтез и анализ траекторий инструмента при фрезерной трех- и пятикоординатной обработке, при проектировании пресс-форм и штампов и др.

#### **3.4.4 Система CATIA (Dassault Systemes)**

Система CATIA V5 используется на этапах от создания концепции изделия до технологической поддержки производства и планирования производственных ресурсов. В системе реализовано поверхностное и твердотельное 3D моделирование и оптимизация характеристик изделий. Используется оригинальное графическое ядро CNEXT. Возможны фотореалистичная визуализация, восстановление математической модели из материального макета. Система масштабируема.

#### **3.4.5 Система Pro/Engineer (Parametric Technology Corporation)**

В системе Pro/Engineer, ведущей свою историю с 1986 г., базовые модули конструкторского проектирования предназначены для твердотельного и поверхностного моделирования, синтеза конструкций из базовых элементов формы, поддержки параметризации и ассоциативности, проекционного черчения и разработки чертежей с простановкой размеров и допусков. Дополнительные модули конструкторского проектирования имеют более конкретную, но узкую специализацию. Основные модули технологического проектирования служат для моделирования технологических процессов фрезерной, токарной, электроэрозионной обработки и для разработки постпроцессоров для систем управления оборудованием с ЧПУ.

#### **3.4.6 Системы САПР среднего уровня**

Лидирующее положение в классе САПР среднего уровня занимают системы Solid Works (Solid Works Corporation), Solid Edge (EDS PLM Solution), Inventor (Autodesk). Компания РТС также имеет САПР среднего уровня под названием Pro/Desktop. В СНГ наравне с ними нашли



распространение российские системы Компас (Аскон) и T-Flex CAD (Топ Системы), а также некоторые другие системы, в числе которых САПР компаний Autodesk, Beantly, Интермех, Вее-Pitron. Все эти системы ориентированы, в первую очередь, на платформу Wintel, как правило, имеют подсистемы конструкторско-чертежную 2D, твердотельного 3D геометрического моделирования, технологического проектирования, управления проектными данными, ряд подсистем инженерного анализа и расчета отдельных видов машиностроительных изделий, а также библиотеки типовых конструктивных решений.

### **3.4.7 Описание 3D образов изделий STL-файлами**

Формат, в котором создается и хранится исходная геометрическая модель трехмерного объекта, зависит от используемой системы твердотельного или поверхностного моделирования. Современные системы 3D моделирования используют специфические форматы данных, структура которых зависит от особенностей архитектуры и программной реализации конкретного приложения. Поэтому для унификации исходных данных при построении изделий на RP-установках в настоящее время используется триангуляционная модель в формате STL-файлов.

Хотя STL-формат наиболее простой из всех форматов описания 3D-данных, он имеет некоторые особенности в описании 3D образов изделий. Существуют по спецификации правила, согласно которым записываются данные о геометрической модели трехмерного объекта.

Формат STL-файлов (расширение файлов\*.stl), разработанный Albert Consulting Group, был введен в применение фирмой 3D Systems в 1987 г. STL (расшифровывается как STereoLithography, Surface Tessellation Language и Standard Triangulation Language), на данный момент лидирует среди форматов описания 3D данных. Триангулированный объект называется мозаичным объектом (tessellated Object) или фасеточным (faceted Object). В нем для описания формы 3D объекта используется триангуляционная модель. Качество готового изделия зависит от точности аппроксимации его модели. При уменьшении размеров треугольников накладываемой триангуляционной сетки увеличивается разрешение, а, следовательно, и точность, с которой компьютерная 3D модель представлена в STL-формате. Однако это имеет и свои минусы. При увеличении количества треугольников увеличивается соответственно и размер файла. Это приводит к необходимости увеличения

вычислительных мощностей и к возможному возникновению ошибок при обработке STL-файла программами.

Информация об изделии, содержащаяся в STL-файлах, может быть представлена в виде текстового (ASCII) либо двоичного (Binary) формата. Текстовый файл содержит понятную для чтения и понимания информацию о треугольниках. В свою очередь, двоичные файлы представлены из последовательностей нулей и единиц. После открытия STL-файлов обрабатывающая программа сканирует файл на наличие ключевых слов, присущих текстовому формату. Если они отсутствуют, то программа открывает файл и считывает информацию побайтово.

Сравнительная характеристика форматов STL-файлов:

- ASCII: прост в понимании и чтении; не компактный, медленный в процессе обработки (относительно большой размер файла); не рекомендуется для передачи по сети;
- Binary: не доступен в понимании и чтении без какого-либо транслятора; компактный по размерам; легок в передаче по сети (пересылке).

В процессе триангуляции поверхности модели могут возникать ошибки. Следствием этих ошибок является появление разрывов, самопересекающихся поверхностей, вырожденных треугольников и др. Поэтому всегда возникает задача исправления таких ошибок, которая тесно связана с задачами восстановления формы 3D модели объекта по неполному набору данных. Эту задачу фирмы 3D Systems и Materialise называют «верификацией» и используют для нее специальное программное обеспечение. В большинстве случаев мелкие искажения исправляются при переходе от 3D модели к системе 2D моделей. На данный момент STL-формата является базовым.

### **3.5 Общие черты генеративных способов материализации 3D CAD моделей изделий**

*Способы материализации теоретических 3D моделей являются важнейшей составляющей интегрированного рабочего процесса ускоренного формообразования, изготовления изделий или их прототипов, т. к. именно они реализуют прямой переход от электронного образа к твердому телу и во многом определяют сокращение времени создания изделия, продукта произвольной, самой сложной формы; степень повышения качества изделия; сокращение суммарных производственных затрат. В совокупности эти факторы определяют конкурентоспособность продукта на рынке.*

Разработанные к настоящему времени способы материализации теоретических моделей различны по многим признакам, технологическим возможностям и т. д., однако, всем существующим способам присуще достаточно много общего:

- все прототипы или изделия изготавливаются на основе 3D CAD проектирования;
- все прототипы или изделия изготавливаются послойно;
- собственно изделие или его прототип получают не путем отделения, снятия припуска с заготовки, а посредством наращивания, добавления материала, т. е. генеративным способом;
- наращивание материала в процессе формообразования происходит чаще всего в переходной его фазе от жидкого или порошкообразного к твердому состоянию;
- изготовление конструктивного элемента не требует форм или инструмента, а, значит, отпадают проблемы, связанные с износом инструмента при формообразовании резанием, штамповкой, ковкой и т. д.;
- отсутствует та или иная степень ограничений, связанных со сложностью формы изделия (внутренние полости, сложные внутренние или внешние поверхности), чем сложнее конфигурация изделия, тем большее преимущество процесса;
- резкое сокращение затрат времени;
- эффективность всех способов RP существенно повышается при их интеграции с завершающей технологией изготовления твердотельных изделий – вакуумное литье, литье под давлением и др. его виды.

### **3.6 Сущность основных генеративных способов материализации 3D CAD модели изделий**

Названия способов обозначаются аббревиатурами, составленными из начальных букв английских слов названия способов RP (Rapid Prototyping):

Рассмотрим принципы и сущность основных из применяемых способов генеративной материализации трехмерных математических моделей изделий.

#### **3.6.1 SLA (Stereo Lithographics Apparatus) – лазерная стереолитография**

Промышленные установки начали производиться с 1988 г. компанией 3D Systems Inc (табл. 3.1). Аналогичные установки выпускаются другими фирмами в США и Японии.

Таблица 3.1 – Технические характеристики SLA систем [3D Systems 2000]

Модель	SLA 250/50HR	SLA 3500	SLA 5000	SLA 7000
Тип лазера, длина волны, мощность	HeCd, 325 нм, 6 мВт	твердотельный Nd: YVO <sub>4</sub> , 354,7 нм, 160 мВт	Nd – утроитель частоты: YVO <sub>4</sub> , 354,7 нм, 216 мВт	Nd – утроитель частоты: YVO <sub>4</sub> , 354,7 нм, 800 мВт
Толщина слоя, мм	0,0625±0,1	0,05±0,1	0,05±0,1	0,0254±0,127
Диаметр луча, мм	0,06±0,08	0,20±0,30	0,20±0,30	0,23±0,28 до 0,69±0,84
Скорость построения, м/с	0,635	2,54	до 5,0	2,54±9,52
Точность позиционирования и воспроизводимости, мм	0,0025	0,00177; ±0,005	0,00177; ±0,013	0,001; ±0,001
Максимальный вес детали, кг	9,1	56,8	68,04	68,04
Объем ванны, л	32,2	99,3	253,6	253,6
Максимальная область построения, мм	250×250×250	350×350×400	508×508×584	508×508×600
Операционная система	MS-DOS	Windows NT	Windows NT	Windows NT
Габаритные размеры, м	1,24×0,69×1,64	0,95×1,02×2,00	1,24×0,69×1,64	1,24×0,69×1,64
Вес, кг	461	1100	1363	1455

Все процессы стереолитографии начинаются с проектирования внешних и внутренних поверхностей изделия с точным указанием всех геометрических элементов в одной из сред 3D проектирования: AutoCAD, 3D Компас, Pro-Engineer, 3D Studio и др. Затем 3D CAD модель преобразуется в STL-файл. Высокая точность и воспроизводимость строящейся поверхности достигается за счет увеличения количества треугольников при триангуляции (рис. 3.6). С помощью управляющих программ подготовки процесса построения осуществляется конструирование технологических поддержек изделия на платформе, разделение изделия на сечения (слои) с фиксированной толщиной,

определение параметров построения каждого сечения и далее послойный синтез изделия (рис. 3.7).

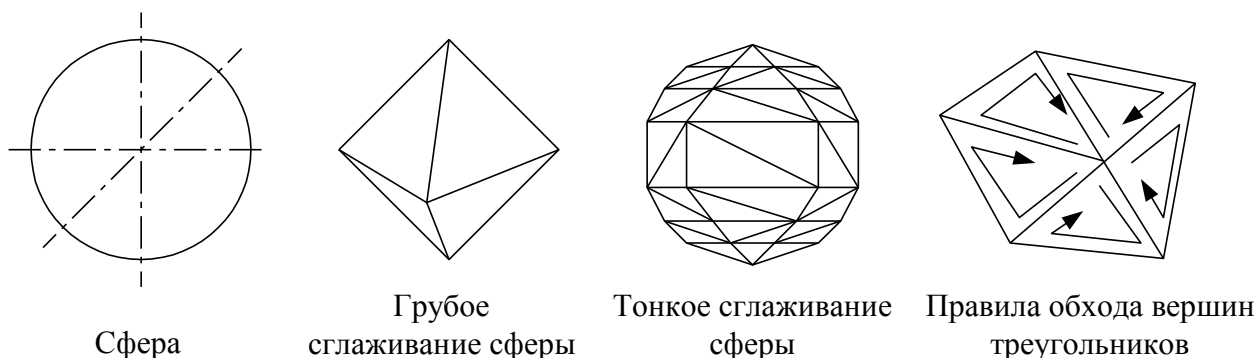


Рисунок 3.6 – Триангуляция сферы и правила обхода вершин треугольников

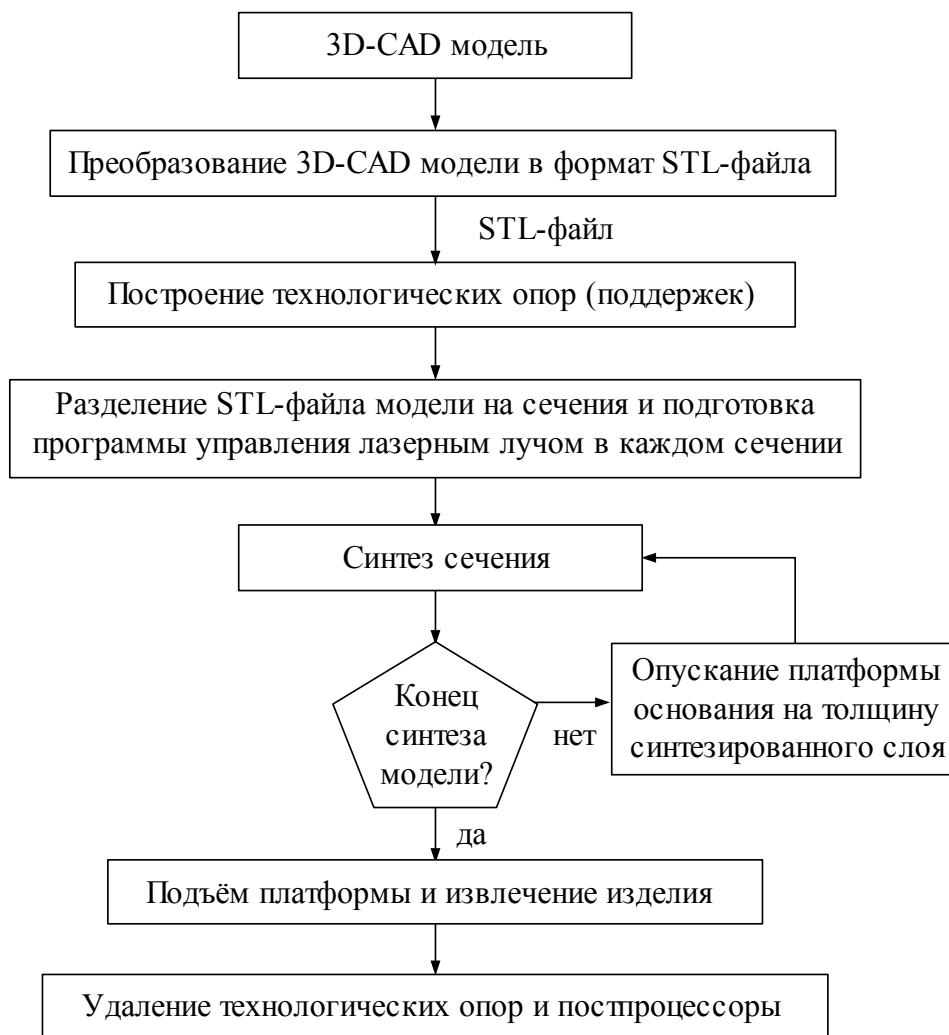


Рисунок 3.7 – Схема управляющей программы обработки STL файла

При стереолитографии геометрическое воспроизведение изделия осуществляется послойно дисперсионным отверждением жидкого фотомономера с помощью UV лазера (фотополимеризация) (рис. 3.8).



Рисунок 3. 8 – Схема процесса лазерной стереолитографии

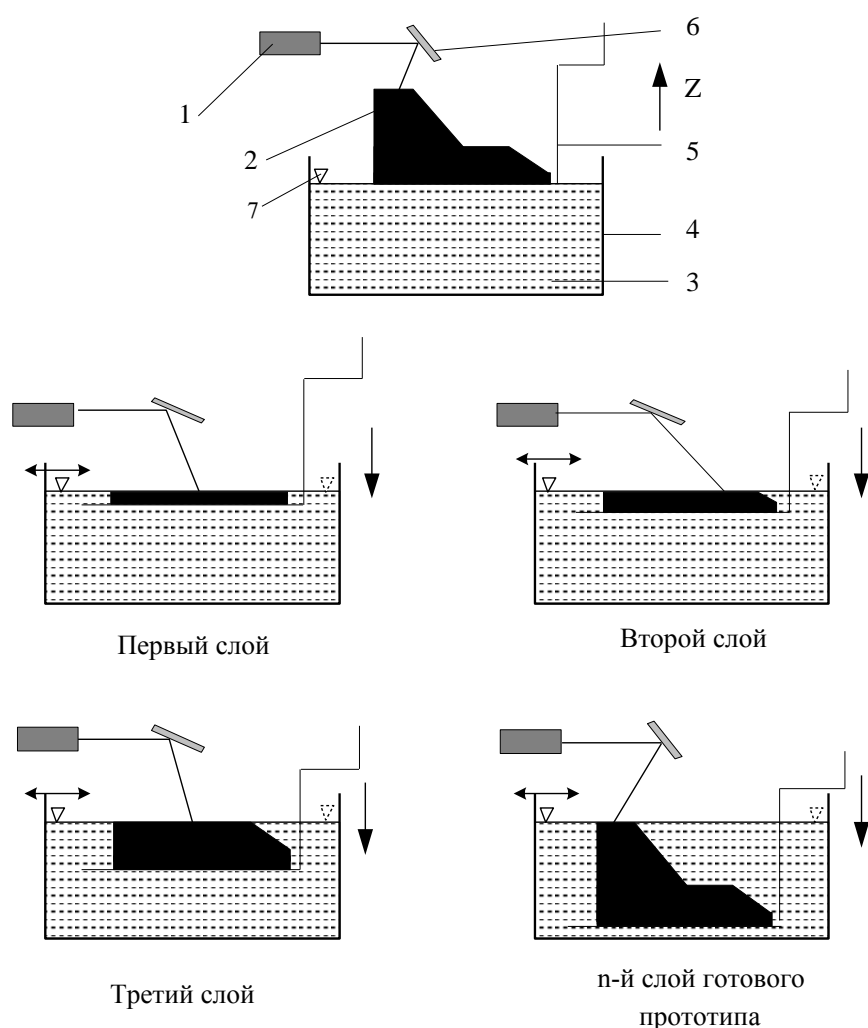


Рисунок 3.9 – Схема получения трехмерной твердотельной модели послойным наращиванием по способу стереолитографии:

1 – лазер; 2 – изделие; 3 – жидкий мономер; 4 – ванна;  
 5 – подвижная платформа; 6 – зеркало, управляющее сканированием; 7 –  
 выравнивающий нож

Луч лазера, управляемый компьютером (рис. 3.9), проходит по поверхности жидкого полимера, сканируя ее часть в плоскости X-Y в соответствии с конфигурацией формируемого слоя. В жидкой реакционно-способной среде порождаются активные центры (радикалы, ионы, активированные комплексы), которые при взаимодействии с молекулами мономера вызывают рост полимерных цепей, ведущий к фазовому изменению облученной среды – отверждению слоя. Траектория сканирования лазерного луча по каждому слою сечения определяет, в

каком месте рабочего пространства плоскости X-Y лазерный луч фокусируется на поверхности жидкого мономера, и он, полимеризуясь, отвердевает. В той части, где поверхность не подвергается воздействию лазерного луча, полимеризация отсутствует. После этого платформа установки опускается на величину шага, с которым проводились секущие плоскости теоретической модели. Луч сканирует конфигурацию второго сечения, потом третьего и т. д. Так последовательно послойным наращиванием происходит создание трехмерного твердотельного конструктивного элемента заданной геометрии.

Важным при подготовке и реализации SLA способа является обеспечение устойчивости изделия на платформе и устойчивость оболочки изделия. Для этого на стадии компьютерной подготовки 3D CAD модели при помощи специальной программы конструируются внешние технологические поддержки и внутренние переборки. С их помощью обеспечивается: поддержка выступов и консолей модели, наклонных поверхностей; предотвращение расслаивания на сложнопрофильных участках; корректировка возможного искривления слоев, примыкающих к платформе; создание составных изделий из нескольких частей; отделение полученного изделия от подвижной платформы.

Операции по удалению поддерживающей конструкции производятся вне стереолитографического устройства.

Достоинства способа лазерной стереолитографии: возможность полной автоматизации, высокая точность повторных воспроизведений, отсутствие ограничений по сложности формы изделия, возможность изготовления изделий больших размеров по их частям с последующим воссозданием целого изделия в заданном объеме.

К недостаткам лазерной стереолитографии можно отнести: возможность усадки при полимеризации материала (фотомономера), что может приводить к деформациям и, следовательно, снижать точность; химическую токсичность фотомономеров (до полимеризации); относительно высокую стоимость фотомономеров; чувствительность установки к изменениям температуры и влажности помещения, к вибрациям.

Эффективна лазерная стереолитография при концептуальном моделировании изделий и процессов сборки в машиностроении, в технологиях литья, в медицине (особенно при создании имплантантов), в архитектуре, археологии, электронике, приборостроении и др.



### **3.6.2 SLS (Selective Laser Sintering) – избирательное лазерное спекание**

SLS позволяет послойным наращиванием создавать не только модель или прототип изделия, но и собственно конечное изделие. Для изготовления используются различные порошки - полиамиды, поликарбонаты, воск, нейлон, керамика, металлы. Способ предложен Карлом Декартом в 1986 г. (США) и первоначально установки производились фирмой DTM Corp. – Sinterstation 2060, Sinterstation 2500 и др. Технологические комплексы содержат обычно следующие составляющие (рис. 3.10): устройство послойной подачи порошка, платформу, снабженную приводом вертикального перемещения, устройство послойного выравнивания порошка. Управляющие данные для лазера вводятся, исходя из 3D CAD геометрии. Порошок послойно при помощи выравнивающего ролика наносится на платформу носителя (рис. 3.10).

Управляемый луч  $\text{CO}_2$  лазера сканирует поверхность порошка в соответствии с конфигурацией заданного сечения и инициирует локальное избирательное оплавление порошковой массы. Попавшие в зону воздействия лазерного луча участки слоя порошка принимают при этом заданную форму сечения. Платформа носителя циклически опускается. Подогрев камеры снижает затраты энергии лазера на нагрев порошка, снижает уровень деформаций. Способ предполагает подачу в камеру нейтрального газа для исключения окисления порошка при нагреве (рис. 3.10, 3.11).

К преимуществам способа SLS можно отнести невысокую стоимость используемых материалов, их нетоксичность, отсутствие технологических поддержек, возможность одновременного изготовления нескольких изделий (в разных «горизонтах»), широкий спектр используемых материалов, возможность изготовления изделия по частям; высокую прочность и возможность получения окончательных изделий (прямое выращивание).

Области использования – авиационная, автомобильная, электронная, электротехническая и др. отрасли промышленности, а также медицина (имплантанты), нефтехимия, т. е. любые отрасли, где требуется быстрое прототипирование, создание моделей, единичных экземпляров или малых серий функциональных изделий сложной формы.

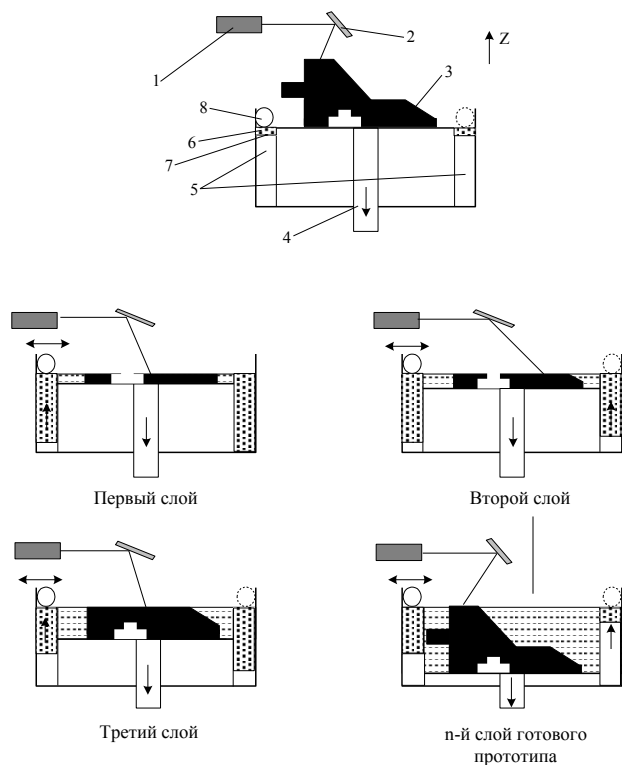


Рисунок 3.10 – Схема получения трехмерного твердотельного изделия послойным наращиванием по способу избирательного лазерного спекания

1 – лазер, 2 – оптическая система, 3 – готовое изделие,  
 4 – подвижная (по оси Z) рабочая платформа, 5 – бункеры для подачи  
 порошкового материала, 6 – порошковый материал,  
 7 – подвижный стол бункера, 8 – ролик для подачи порошка и выравнивания слоя

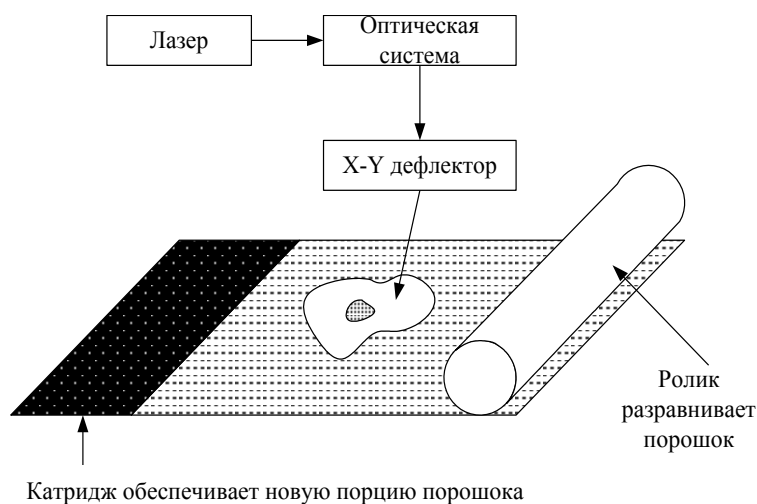


Рисунок 3.11 – Устройство разравнивания и уплотнения порошковой смеси

Экспериментально доказана возможность использования таких порошков: металл (Ni), полимер (полиамид или поликарбонат); биметалл (Ni, Fe, Al или латунь + припой) и интерметаллоид (Ni-Ti, Ti-Al, Ni-Al); керамика (Al+ZrO<sub>2</sub>).

### **3.6.3 3DW (Three Dimensional Welding) – трехмерная наплавка (сварка)**

С помощью дуговой сварки послойно наплавляется металл в виде простых форм, из которых затем составляются более сложные структуры. Используется две управляющие системы: CNC для сварочного робота и файлы STL CAD для послойного построения. Установка оснащена системами термоконтроля, интерактивного охлаждения среды, удаления паров и механических частичек.

### **3.6.4 BPM (Ballistic Particle Manufacturing) – изготовление с использованием баллистики частиц**

Базируется на принципе чернильного печатающего устройства. Формирование послойным наращиванием осуществляется за счет того, что отдельные маленькие капельки термопластического материала, вылетая из «печатающей» головки, застывают в необходимом месте сначала поддерживающей платформы, а затем – предыдущего слоя. Установки различных фирм отличаются количеством применяемых «печатающих» головок – от 2-х до 5-ти. В последнем случае отпадает необходимость использования поддерживающих конструкций.

### **3.6.5 DMD (Direct Metal Deposition) – прямое нанесение металла**

Интегрированная технология Direct Metal Deposition (прямое нанесение металлов) позволяет изготавливать, ремонтировать и переделывать промышленную оснастку, наносить упрочняющие покрытия и строить опытные образцы изделий из стандартных промышленных металлов.

Технология DMD позволяет изготавливать металлические детали со 100% плотностью.

DMD сочетает в себе пять общеизвестных технологий: лазеры, CAD, CAM, сенсоры и порошковую металлургию. В ходе процесса DMD луч лазера фокусируется на металлической заготовке (рис. 3.12), трехмерной металлической пресс-форме (детали, приблизительно воспроизводящей форму

объекта) или поврежденной металлической детали, создавая зону расплавленного металла. Тонкая струя металлического порошка впрыскивается в зону расплава, увеличивая его объем. Цельнометаллическая деталь строится послойно в результате перемещения луча лазера и струи порошка под управлением компьютера, в соответствии с данными САD файла.

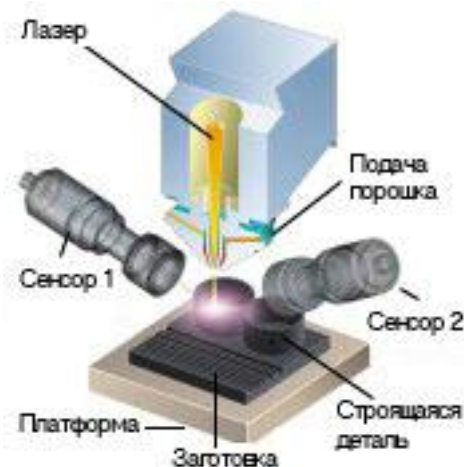


Рисунок 3.12 – Схема DMD (Direct Metal Deposition) – прямое нанесение металла

Технология DMD сочетает в себе особенности лазерной стереолитографии (SLA) и избирательного лазерного спекания (SLA). DMD создает детали из таких металлов и сплавов, как инструментальные стали, титан, алюминий, медь, нержавеющая сталь, иридий и инконель, а также из металлокерамических композитов. По своим характеристикам (предел текучести, удлинение, ударная вязкость, удельная прочность) DMD металлы соответствуют или даже превосходят характеристики «обычных» металлов.

Процесс DMD позволяет быстро изменять состав металла путем инъекции в расплав разных типов металлических порошков. Это дает возможность создавать гибридные металлические композиты.

Некоторые особенности DMD особенно незаменимы при изготовлении промышленных форм из инструментальной стали. Что особенно важно, эта технология создает полностью насыщенные формы или формообразующие поверхности из инструментальной стали без какого-либо синтеза или

выжигания связующего вещества. Поскольку DMD создает детали "почти точной формы", они обычно подвергаются доводке на электроэрозионных станках для достижения точных размеров (постпроцессы).

### 3.6.6 FDM (Fused Deposition Modeling) – моделирование оплавлением

Безлазерный процесс (Fused Deposition Manufacturing) предложен Скоттом Крапом (Scott Cramp). Коммерческие установки компания Stratasys (США) выпускает с 1991 г.: FDM Quantum, FDM-2000, FDM-3000 и FDM-8000 (табл. 3.2). Формообразование модели (конечной детали) происходит при помощи экструзии расплавленного материала (рис. 3.13) через одно или несколько сопел.

Подача разогретого материала может осуществляться непрерывно или дискретно. По физической сути сюда могут быть отнесены способы MJM, MJS, 3D Printer и др.

Таблица 3.2 – Технические характеристики FDM систем [Stratasys, 2000]

Модель	FDM 2000	FDM 3000	FDM 8000	Quantum
Размеры построения, мм	254×254 ×254	254×254 ×406	457×457 ×609	600×500 ×600
Точность, мм	± 0,127	± 0,127	± 0,127	± 0,127 (для размеров $l < 127$ мм) и ±0.015 мм/мм ( $l > 127$ мм)
Габаритные размеры, м	0,66×0,91 ×1,07	0,66×1,07 ×0,91	1,49×1,91 ×1,00	2,24×1,98 ×1,12
Вес, кг	160	160	392	1134
Требуемая мощность	220÷240 ×10 В·А	220÷240 ×10 В·А	220÷240 ×10 В·А	208÷240 ×50 В·А
Ширина слоя, мм	0,254÷2,54	0,254÷2,54	0,254÷2,54	0,38÷0,51
Толщина слоя, мм	0,05÷0.762	0,05÷0.762	0,05÷0.762	0,18÷0.25

При использовании металлов намотанная на бобину проволока  $\varnothing 0,1 \div 0,2$  мм подается в головку FDM, оплавляется и через сопло, управляемое специальным координатным приводом, подается на платформу. Слои формируются в соответствии с 2D CAD моделью в координатах X-Y толщиной от 0,025 мм до 1,25 мм с возможной толщиной стенок  $0,22 \div 6$  мм. После формирования слоя по всему сечению платформа установки опускается на шаг, равный толщине слоя, и процесс повторяется до полного построения твердотельной модели.

Применяемые материалы – термопласты, воск, металлы. При необходимости для укрепления построенной слоями детали используют опорные конструкции (чаще всего сотовые) из картона, полистирола, воска и др. Точность изготовления –  $0,1 \div 0,2$  мм. К достоинствам процесса можно отнести высокую производительность, нетоксичность применяемых материалов и легкость перестройки с одного материала на другой, компактность установки и малые затраты. Системы FDM имеют модульную конструкцию, что позволяет расширять функциональные возможности системы.

Не лишен способ и недостатков. Это, прежде всего, низкая прочность и связь между слоями, необходимость строгого контроля температуры во избежание расслоения; необходимость непрерывного движения экструдера во избежание затвердения материала; необходимы технологические подпорки.

Сфера применения – изготовление концептуальных моделей, функциональных прототипов, конечный продукт, точное литье, инструментальное обеспечение.

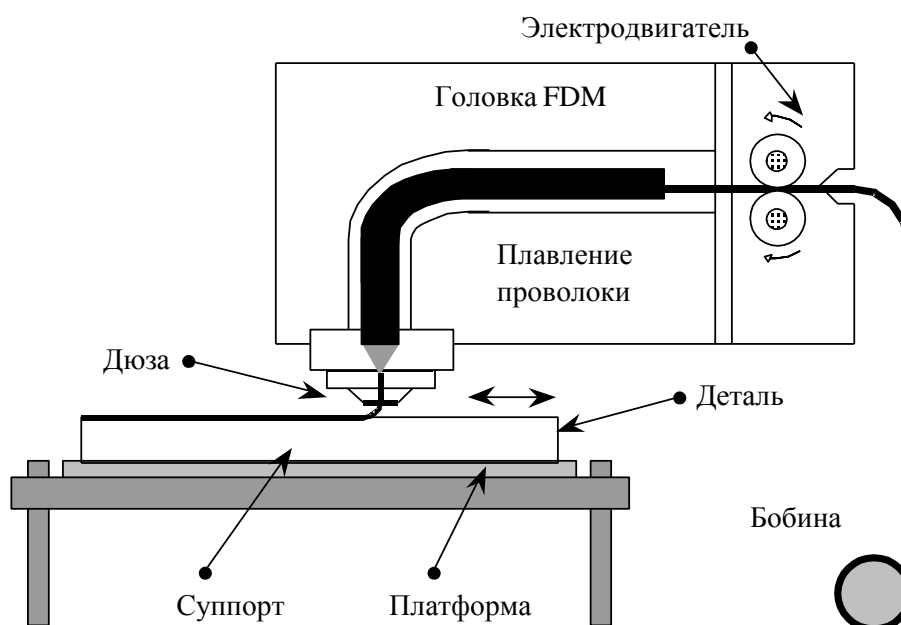


Рисунок 3.13 – Способ моделирования оплавлением (FDM)

Технология нашла применение в автомобильной, аэрокосмической, электронной и др. отраслях промышленности.

### **3.6.7 GPD (Gas Phase Deposition) – осаждение из газовой фазы**

Принципиально возможно создание 3D CAD моделей с использованием газовой среды. Способы базируются на расщеплении молекул реактивного газа под действием лазерного луча и использовании продуктов этого расщепления на построение твердотельной модели, например, из углерода, карбидов, силикона, нитридов.

Возможно инициировать химическую реакцию между газом и слоем порошка с тем, чтобы формовать твердотельную деталь, например, из карбида кремния или нитрида кремния.

### **3.6.8 HIS (Holographic Interference Solidification) – отверждение голографической интерференцией**

В основе лежит свойство жидких полимеров затвердевать при интерференции определенных лучей. Когда голографический образ проектируется на смолу, она отвердевает по всему объему образа.

Способ интересен именно тем, что воспроизведение твердого трехмерного объекта из 3D CAD происходит не послойно, а сразу во всем объеме.

### **3.6.9 LENS (Laser Engineering Net Shaping) – формирование с помощью лазерной инженерной сети**

Способ базируется на подаче через сопло на подложку порошка и одновременном его оплавлении лучом лазера (рис. 3.14).

Сопло с порошком может быть по одну сторону с подложкой или коаксиально с лазерным лучом. Скрепление с предыдущим слоем облегчается тем, что струя порошка оплавляется лучом лазера, подогревающим одновременно и предыдущий слой.

Технические характеристики LENS систем представлены в табл. 3.3.

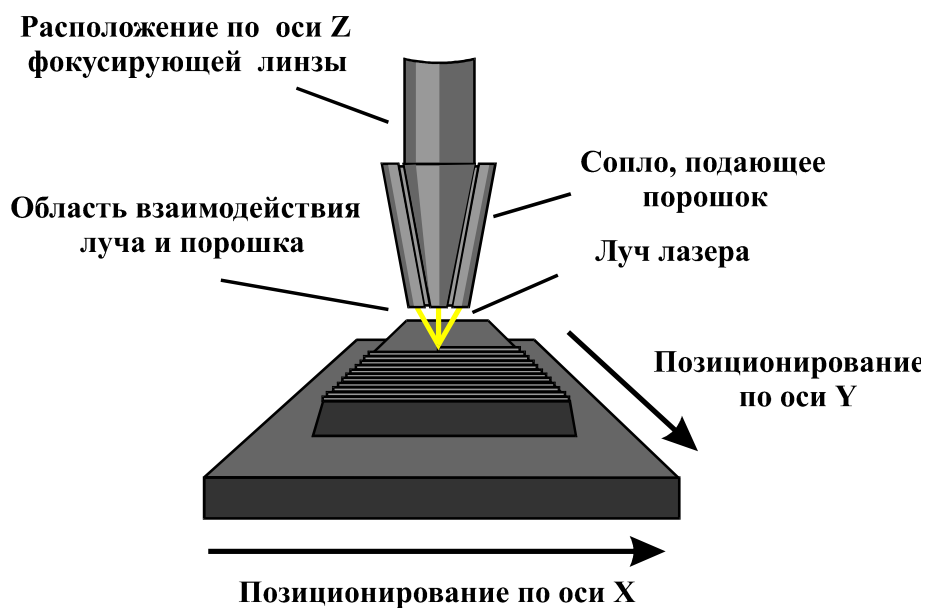


Рисунок 3.14 – Схематическое изображение LENS способа

Таблица 3.3 – Технические характеристики LENS систем [Optomes, 2000]

Модель	LENS 750	LENS 850
Лазерная система	750 Вт: АИГ, с возможностью увеличения до 1400 Вт	1100 Вт: двойная головка АИГ, с возможностью увеличения до 2200 Вт
Рабочая камера, мм	30×30 - X-Y передвижная платформа, 30 мм по оси Z	45×45 - X-Y передвижная платформа, 105 мм по оси Z
Подача порошка	Пневматическая система	Двойная пневматическая система
Требуемая мощность	208×100 В·А	208×100 В·А
Основа системы	Pentium	Pentium

### 3.6.10 LLM (Layer Laminate Manufacturing) – способ моделирования наслаиванием

Способ объединяет группу технологий, при которой слои необходимой конфигурации вырезаются последовательно из листов ранее уже изготовленной фольги или другого листового материала при помощи



лазера, резца, фрезы и одновременного (или после разрезания) соединения их вдоль срезов (или по всей поверхности). Поскольку отдельные слои нужно только контурировать (а не создавать), технологии по способу LLM являются более продуктивными, чем больше поверхность по сравнению с периметром слоя. Опоры не требуется. Строго говоря, технологии LLM комбинируют вырезание слоев и наращивание изделия с их помощью. Используемые материалы – бумага, синтетические материалы, металлы, керамика, дерево. Металлы свариваются, керамика спекается, остальные склеиваются.

LLM изделия очень прочны, поэтому подходят для литья в песчаные формы, для точного литья, вакуумного литья, для песчаных спеченных стержней, высокотемпературного формообразования.

К данной группе технологий относят такие, как LMP – Laser Milling Process (способ послойного фрезерования), SOM – Stratified Object Manufacturing (изделие составляется не послойно, а более крупными частями), а также LOM – Laminated Object Manufacturing – изготовление слоистых объектов.

LOM основан на использовании ламинирования: лазерный луч вырезает контуры сечения листового материала для каждой секущей плоскости слоистой 3D CAD модели. Площадь сечения не сканируется. Конструктивные элементы последовательно вырезаются из отдельных листов клеейкой бумаги, фольги, пластика, металла, керамики, композитов толщиной 50÷500 мкм. Новый слой соединяется с предыдущим за счет прокатки термоваликом (рис. 3.15).

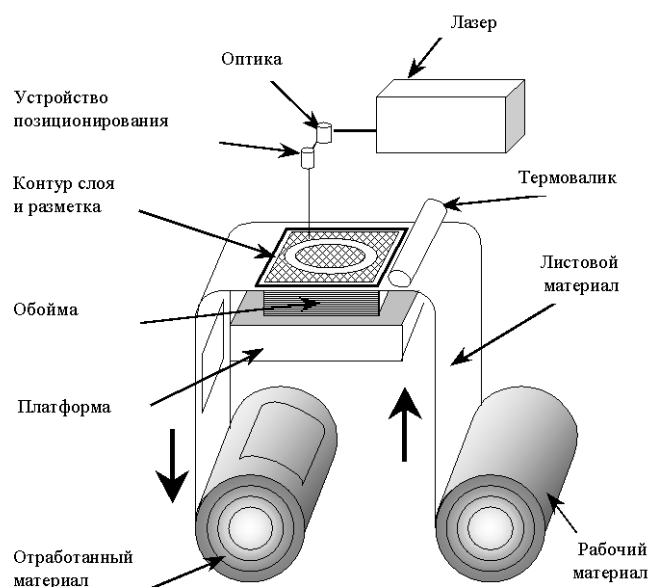


Рисунок 3.15 – Получение модели наращиванием слоистого материала

Исходные данные рассчитываются для каждого слоя (листа фольги) в 3D формате CAD данных о конструкции и передаются в систему управления LOM установки, где и создаются с помощью специального программного обеспечения поперечные сечения детали. Области излишнего материала разрезаются на квадраты в единых координатах каждого среза для последующего удаления. При вырезании контура и разрезки излишних областей фольги лазер проникает только на определенную заранее рассчитанную глубину. В результате наращивания вырезанных лазером сечений из листового материала формируется точная трехмерная модель. Поверхности срезов дорабатываются (шлифуются, полируются, окрашиваются, покрываются лаком).

Характеристики LOM систем приведены в табл. 3.4.

Таблица 3.4 – Характеристики LOM систем [He isys, 2000]

Модель	LOM-1015 Plus	LOM-2030H
Габариты детали, мм	381×254×356	813×559×508
Мощность лазера, Вт	25	50
Диаметр лазерного луча, мм	0,20÷0,26	0,203÷0,254
Дискретность перемещения системы воспроизведения, мм	0,05	0,0508
Основа системы управления	Pentium	Pentium
Программное обеспечение системы	Windows NT OS, LOMSlice™	Windows NT OS, LOMSlice™
Толщина слоя, мм	0,08÷0,25	0,076÷0,254
Размеры ролика, мм	356 – ширина,	711 – ширина,
Габаритные размеры, м	1,23×0,74×1,31	0,21×1,41×1,40
Вес, кг	454	1 288
Требуемая мощность	220×15 В·А	220×30 В·А
Требования к атмосфере	Температура 20÷27°С Влажность < 50%	Температура 20÷27°С Влажность < 50%

Благодаря использованию недорогих листовых материалов LOM-изделия отличаются надежностью, прочностью, устойчивостью к деформациям и относительно невысокой стоимостью.

Достоинства способа: лазерный луч вырезает только контуры сечения, т. е. раскраивает листы и не воздействует на материал внутри сечения, тем самым сохраняя его исходные свойства, исключая физико-химические превращения, значительную усадку и деформации материала; возможность выбора нетоксичных и дешевых материалов; нет необходимости в технологических подпорках; установки относительно дешевы, легко управляемы, малогабаритны, быстро осваиваются персоналом.

К недостаткам можно отнести следующее: способ имеет ограничение по сложности конструкции изделия, поскольку для сложнопрофильных моделей затруднено, а подчас и невозможно удаление излишнего материала. С этим связаны и большие возможные потери материала. При удалении отходов возможно повреждение модели. Имеется опасность расслоения модели при доработке поверхности для снижения шероховатости.

### **3.6.11 MJM (Multi Jet Modeling) – многоструйное воспроизведение**

По этому способу модель строится с использованием техники, сходной со струйной печатью на обычном принтере, но в трех измерениях. Рабочий орган – «печатающая головка» - включает 352 сопла, возможно до 1536, образующих линейную решетку: струя из каждого сопла осаждает специально разработанный термополимерный материал там, где он необходим по управляющей программе. Головка MJM движется возвратно-поступательно по оси  $X$ , формируя слой. После завершения построения первого слоя платформа опускается по оси  $Z$  на величину, равную его толщине, и начинается формирование следующего слоя (рис. 3.16).

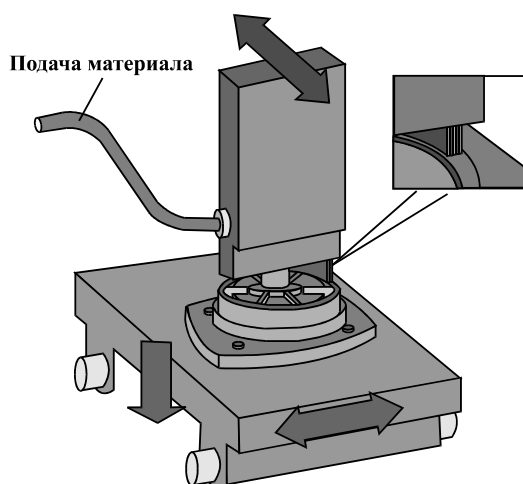


Рисунок 3.16 – Схематическое изображение MJM способа

### **3.6.12 MJS (Multiphase Jet Solidification) – отверждение многофазной струи**

Обрабатываемый материал греется в камере растапливания до температуры плавления и пропускается через форсунку. Управление температурой согласовано при этом так, чтобы расплавленный материал покрывал поверхность необходимым слоем.

Способ основан на образовании слоя посредством системы форсунки, распределяющей растапливаемый материал по поверхности. Есть сходство с FDM способом. Существенное различие – подача исходного материала и сам исходный материал.

При MJS – способе изделия изготавливаются из низкоплавких металлических сплавов, а также из высококачественной стали, титана, керамики вследствие обработки порошкообразных смесей. В каждом случае обрабатываемый материал нагревается до температуры, близкой к температуре плавления, и, управляемый компьютером, через форсунку выдавливается. Материал застывает в течение нескольких секунд. Когда материал еще горячий, он разогревает поверхность предыдущего слоя и таким образом осуществляется неразъемное соединение слоев.

При изготовлении изделий из низкоплавких материалов продуктом можно пользоваться сразу. При использовании порошкообразных материалов изделие необходимо дополнительно обрабатывать. Обработка порошкообразных материалов находит применение при использовании сплавов, плавящихся при высокой температуре, и керамических материалов (температура плавления 1300°C).

### **3.6.13 RMPD (Rapid Micro Product Development) – быстрое изготовление микроизделий**

Способ базируется на использовании масок, применяемых в микроэлектронике (сходство с фотополимеризацией). Данные о САД модели применяются для изготовления масок. Маски используют для лазерной полимеризации послойно наносимого жидкого фотомономера. Минимальная толщина слоя – 1 мкм, разрешение его по осям X-Y составляет 10 мкм. Способ эффективен при создании сложных микросистем, объединяющих компоненты электроники, оптики, механики.

### 3.6.14 SGC (Solid Ground Curing) – отверждение плотного основания

Способ основывается на принципе фотополимеризации. В отличие от способа, при котором поверхность слоя сканируется лучом лазера, здесь требуемая экспозиция обеспечивается при помощи маски и ультрафиолетовой лампы.

Исходя из описания геометрии детали в STL-формате, производится создание требуемой геометрии изделия через взаимодействие двух отдельно существующих циклов. В первом происходит изготовление маски-негатива, которая служит как литографическая структура для процесса экспозиции. В собственно формообразовании участвует, прежде всего, слой тонкого жидкого полимера, накладываемого на носитель. После экспозиции на заранее созданную маску наносится фотомономер и происходит его наращивание. После охлаждения воска производится опускание слоя на определенную толщину, как правило, 0,15 мм, затем начинается цикл образования обновлением восковой маски и наложением жидкого фотомономера. Использование воска является характерным для SGC, он используется как опорная конструкция. На отдельном этапе затвердевания после экспозиции маски обеспечивается полное отверждение фотополимера. В дальнейшем происходит процесс извлечения изделия из восковой формы и очистки его поверхности с использованием лимонной кислоты.

Характеристики SGC систем приведены в табл. 3.5.

Таблица 3.5 – Характеристики SGC систем [Cubital, 2000]

Модель	SGC 4600	SGC 5600
Рабочий объем, мм	350×350×350	500×350×500
Разрешающая способность, мм	0,084	0,084
Толщина слоя, мм	0,15	0,1÷0,2
Минимальный размер детали, мм	0,4	0,4
Производительность, см <sup>3</sup> / час	164	426
Скорость построения, с / слой	120	70
Основа системы управления	Unix	Unix

### 3.6.15 TDP (Three Dimensional Printing, 3D Printing) – трехмерная печать

Основан на принципе трехкоординатной глубокой печати. С помощью 3D принтеров изготавливают физические модели, используя струйное моделирование. Слой порошка распределяется по поверхности подвижной платформы в рабочей емкости. Затем связующее вещество, поступающее из многосопловой головки, связывает те области порошка, которые формируют контур и площадь одного сечения модели. Платформа в емкости опускается на толщину одного слоя. По всей рабочей поверхности емкости (включая скрепленный слой) распределяется слой порошка (рис. 3.17), головка очерчивает контур следующего сечения и заполняет его площадь и т. д.

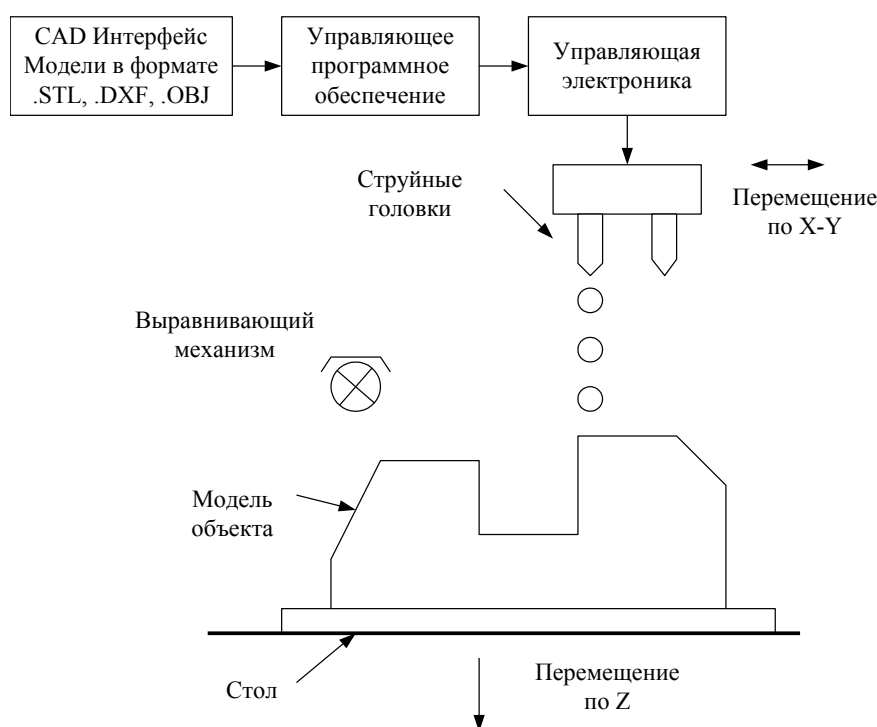


Рисунок 3.17 – Технология построения детали 3D принтером

Имеются многочисленные варианты установок, реализующих этот способ. Установки отличаются применяемыми материалами (исходными и связующими), различием вспомогательных элементов – поддержек, механизмом отверждения, количеством используемых сопел, точностью изготовления, рабочим объемом. Так, установка Object Quadra Tempo имеет 1536 сопел, тогда как установка Z402 всего лишь 128. Хотя

3D принтеры не дают высокой точности и прочности готового прототипа, механических свойств их достаточно для задач визуализации, отработки дизайна. Установки компактны – возможно их размещение у рабочего места конструктора. Деталь, в зависимости от сложности и габаритов, может быть изготовлена в течение нескольких минут или нескольких часов. Применяемые материалы – минералы, крахмал, керамика, целлюлоза, полистирол.

Рассмотренная технология позволяет более эффективно решать задачи концептуального проектирования, визуализации, быстрого и недорогого получения прототипов, оригиналов, мастер-моделей, натуральных моделей, форм для вакуум-формования и др. Технология также успешно применяется для послойного изготовления таблеток, медицинских препаратов (20000 таблеток в час), а также для изготовления структуры костей, сухожилий, хрящей, имплантантов с использованием живых клеток и биоматериалов.

### **3.6.16 Гибридные технологии послойного выращивания**

*Под гибридными технологиями понимаются такие, которые обладают генеративными и не генеративными свойствами.* Например, в технике LLM используют режущий инструмент (резец, фреза, проволока) для того, чтобы из листового материала вырезать единичный слой, используемый для наращивания изделия. Гибридные технологии базируются на использовании станков (фрезерных), оснащенных генеративным модулем. Сюда можно отнести СМВ (Controlled Metal Build Up) – лазерная сварка слоев. Название означает селективную лазерную сварку слоев проволочкой. На изделии близко друг от друга находятся наплавленные валики так, что образуются тонкие слои. Стандартная присадочная проволочка послойно расплавляется посредством диодного лазера, расплавленный металл задерживается в своеобразных небольших ванночках. Каждый слой можно фрезеровать с высокими скоростями. Модуль для лазерной генеративной наплавки входит в комплект фрезерного станка. После формирования из каждого слоя выфрезеруется необходимый контур. При этом обеспечивается высокое качество обработанной поверхности и плотность наплавленного материала.

Станок считывает STL-данные полностью и безошибочно. Software позволяет просчитывать геометрию траектории и данные для управления лазером и подачей проволочки.

В СМВ-установке на оси Z монтируется передвижная платформа для фрезерного шпинделя, на которой расположен диодный лазер и механизм подачи проволоки. Процесс соответствует классическому процессу лазерной сварки, используются все стандартные виды сварочной проволоки из различных материалов.

Назначение способа – локальное применение для быстрого и экономичного ремонта, усовершенствование инструмента, штампов, форм для литья под давлением, изготовление механических деталей.

Способ UCS (Ultrasonic Consolidation Solidica) – наплаивание и ультразвуковая сварка базируется на наварке слоев полосами и обработке этих слоев фрезерованием. Толщина создаваемого слоя – до 0,1 мм. Сначала алюминиевый лист раскатывается на поверхности изделия.

Второй этап – осуществляется прижатие листа к неподвижной детали с помощью вибрирующего волновода - концентратора. За счет высокой частоты и небольшой амплитуды очищают поверхность, а затем приваривают за счет действия с незначительной высоты и большой амплитуды. Связывание осуществляется из-за текучести материала в наружном слое. Лист вырезается с небольшим выступом и наваривается следующая канавка, пока не образуется целый слой. Контурирование осуществляется торцевой фрезой (2D). Процесс продолжается послойно, пока от 3 до 6 мм. Обе стадии процесса чередуются, пока деталь не будет готова. Затруднение вызывает наличие внутренних полых пространств. В таком случае для заполнения полостей используют полимерный материал, вымываемый в ходе технологического процесса.

Применяют фрезерный станок с вмонтированной установкой ультразвуковой сварки для наплавки и оконтуривания ранее изготовленных алюминиевых лент. Фрезерная головка и сварочная установка подвижна в x-направлении и установлена на основании.

Сварочная установка содержит катушку с алюминиевым листом, установку для раската и прессования, ультразвуковую головку, волновод-концентратор для сваривания единичного валика с наполовину готовой деталью. Скорость сварки составляет до 2,5 м/мин. Фрезерование сухое (обработка алюминия). Станок имеет обдувочное устройство для сдувания обрезков листа и опилок. Толщина алюминиевого листа – 0,1 мм, ширина – 25 мм. Возможна обработка стального листа. Точность обработки  $\pm 0.05$  мм. Производительность – 12,5 мм/час. Возможно изготовление структур со встроенными датчиками, электронными деталями, батарейками и т.д. Процесс можно прерывать и запускать на любом этапе изготовления, что облегчает вмонтирование любых вставок.



## **3.7 Классификация генеративных технологий макроуровня**

### **3.7.1 Принципы систематики**

Отличительные признаки различных генеративных технологий основываются, в первую очередь, на физико-химических особенностях процессов создания единичного слоя и способов его соединения с предыдущим слоем.

В настоящее время по принципу послойного выращивания (или наращивания) изделий создано и достаточно успешно реализовано большое количество технологий. Их перечень гораздо шире, чем число относимых непосредственно к идеологии RP. Поэтому представляется целесообразным и необходимым разработать классификацию интегрированных генеративных технологий на более широкой основе, тем более, что ограниченная классификация RP технологий, предложенная их создателями, в настоящее время характеризует лишь занятую технологическую нишу в различных отраслях производства, не является исчерпывающей, а разнообразие способов материализации 3D CAD модели требует осознанного выбора той или иной технологии, тех или иных установок.

Представленная классификации генеративных процессов основана на терминологии, общепринятой в теории и технологии размерного формообразования. Предлагаемая классификация позволит приблизить понятие «генеративные технологии» к разряду существующих технологических процессов изготовления, используя для этого подходы и критерии, принятые в машиностроении. Добавление признаков, определяемых спецификой рассматриваемых процессов, даст возможность более полно оценить технологические возможности генеративных технологий и отдельных способов их реализации.

На основе проведенного анализа генеративных технологий, прежде всего способов материализации 3D CAD моделей, выделены комплексы признаков – энергетических, материаловедческих, инструментальных, технологических, формообразующих. В рамках этих комплексов классификационные признаки разбиты на 18 групп, каждая из которых содержит от 3 до 21 признака. Часть их заимствована с добавлением или изменением отдельных показателей признаков.

### 3.7.2 Классификация интегрированных генеративных технологий макроуровня

Названия и описание способов реализации интегрированных генеративных технологий (ИГТ) макроуровня приведено в предыдущих подразделах.

Условные обозначения соответствуют аббревиатурам, составленным из начальных букв английских слов названия способов RP (Rapid Prototyping) и представлены в алфавитном порядке:

- 3DW (Three Dimensional Welding) – трехмерная наплавка (сварка);
- BPM (Ballistic Particle Manufacturing) – изготовление с использованием баллистики частиц;
- DMD (Direct Metal Deposition) – прямое нанесение металла;
- FDM (Fused Deposition Modeling) – моделирование оплавлением;
- GPD (Gas Phase Deposition) – осаждение из газовой фазы;
- HIS (Holographic Interference Solidification) – отверждение голографической интерференцией;
- LENS (Laser Engineering Net Shaping) – формирование с помощью лазерной инженерной сети;
- LOM (Laminated Object Manufacturing) – изготовление слоистых объектов;
- MJM (Multi Jet Modeling) – многоструйное воспроизведение;
- MJS (Multiphase Jet Solidification) – отверждение многофазной струи;
- RMPD (Rapid Micro Product Development) – быстрое изготовление микроизделий;
- SGC (Solid Ground Curing) – отверждение плотного основания;
- SLA (Stereo Lithographics Apparatus) – лазерная стереолитография;
- SLS (Selective Laser Sintering) – избирательное лазерное спекание;
- TDP (Three Dimensional Printing) – трехмерная печать;

Последним дополняющим пунктом является доработка изделий после выращивания – постпроцессы (PP), к ним также можно отнести верификацию изделий:

- PP (Post Process) – постпроцессы.

При систематизации генеративных технологий запись постпроцесса для определенного способа RP целесообразно выполнять следующим образом: PP(аббревиатура способа), например PP(SLA).

### 3.7.3 Комплекс энергетических признаков

В первую очередь обращено внимание на энергетический аспект ИГТ. В энергетический комплекс признаков ГТ включено 6 групп.

**Вид энергии, непосредственно подводимой к объекту (на границе объекта и окружающей среды).** Группа 1 характеризует вид энергии, непосредственно подводимой к объекту (изготавливаемому изделию):

- 1.1 - тепловая  $\Rightarrow$  BPM, FDM, MJM, MJS, SLS;
- 1.2 - механическая  $\Rightarrow$  BPM, DMD, FDM, LENS, MJM, MJS, TDP;
- 1.3 - электрическая  $\Rightarrow$  3DW;
- 1.4 - светолучевая  $\Rightarrow$  SGC;
- 1.5 - лазерная  $\Rightarrow$  DMD, GPD, HIS, LENS, LOM, RMPD, SLA, SLS.

В данной группе рассматривается энергия на границе объекта и окружающей среды, идущая на подготовку наносимого материала к формообразованию. Возможны варианты использования нескольких видов энергии в одном RP способе: BPM, DMD (нагревание термопластичного материала и его направленное набрызгивание) и др. Механическая энергия используется для всех случаев подачи материала из сопел (форсунок). Для LOM (ламинирование) механическая энергия на прокатку валиком при склеивании не учитывается, также как и для всех вспомогательных технологических процедур, связанных с выравниванием слоев до (SLS) или после (SLA) формирования.

**Энергия, определяющая образование формы.** Группа 2 характеризует энергию, определяющую физический механизм формообразования:

- 2.1 - тепловая (нагрев-охлаждение)  $\Rightarrow$  3DW, BPM, DMD, FDM, LENS, MJM, MJS, SLS;
- 2.2 - химическая (склеивание слоев)  $\Rightarrow$  LOM, TDP;
- 2.3 - фотохимическая (при воздействии лучевой энергии)  $\Rightarrow$  GPD, HIS, RMPD, SGC, SLA.

**Распределение энергии во времени.** Группа 3 определяет характер поступления энергии к объекту:

- 3.1 - непрерывный, в течение всего процесса (нагрев-охлаждение)  $\Rightarrow$  BPM, FDM, HIS, MJM, MJS, RMPD, SGC, SLA, TDP;
- 3.2 - пульсирующий (силовые электросварочные установки)  $\Rightarrow$  3DW;
- 3.3 - импульсный  $\Rightarrow$  DMD, GPD, LENS, LOM, SLS.

Применительно к методам, использующим луч лазера, признаки данной группы соответствуют характеристикам лазерного излучения, подаваемого в зону формообразования.

**Подвод энергии и распределение ее в пространстве, занимаемом объектом.** Группа 4 определяет характер подвода и распределения энергии:

4.1 - точечный (воздействие отдельных частиц, вылетающих из сопла) ⇒ BPM, DMD, LENS, MJS;

4.2 - линейный (криволинейный - сканирование поверхности лазером непрерывного действия) ⇒ FDM, SLA;

4.3 - поверхностный (воздействие лампой ультрафиолетового света) ⇒ MJM, RMPD, SGC;

4.4 - объемный (термическая постобработка) ⇒ SLA;

4.5 - точечно-линейный (сканирование поверхности импульсным лазером) ⇒ 3DW, LENS, LOM, MJS, SLS;

4.6 - точечно-поверхностный (интегрированное воздействие частиц, вылетающих из сопла) ⇒ BPM, DMD, GPD;

4.7 - точечно-объемный (лазерная энергия отвердевания фотополимера в интерференционных узлах голографического пространственного образа) ⇒ HIS.

**Энергоемкость процесса формообразования.** Группа 5 характеризует энергоемкость процесса:

5.1 - минимальная энергоемкость ⇒ HIS, RMPD, SGC, SLA, TDP;

5.2 - низкая энергоемкость ⇒ BPM, FDM, MJM, MJS, SLS;

5.3 - средняя ⇒ 3DW, DMD, LENS, LOM;

5.4 - высокая ⇒ GPD.

Верхней границей первого энергетического уровня является энергия фотополимеризации. Второй энергетический уровень включает методы, при которых нарушаются силы связи только между относительно небольшой частью молекул и атомов. Поэтому при втором энергетическом уровне (верхней границей является энергия плавления материала объекта) для преодоления сил связи требуются относительно малые энергии. Типичными представителями этой группы будут методы пластического деформирования и обработки резанием. Третий энергетический уровень включает виды обработки с диапазоном энергий от величины плавления до величины испарения. Четвертый энергетический уровень превышает энергию испарения обрабатываемого материала. Сюда относится способ GPD (Gas Phase Deposition) – осаждение из газовой фазы.

**Зоны поглощения энергии.** Генеративные технологии обладают разнообразными технологическими признаками, имеющими различную энергетическую основу. Поэтому представляется полезным их классифицировать по характеру зон поглощения энергии и плотности ее потоков (группа б):

6.1 - единая сфокусированная  $\Rightarrow$  DMD, LENS, LOM, SLA, SLS;

6.2 - множество локализованных  $\Rightarrow$  BPM, GPD, MJM;

6.3 - объемная в элементарном слое  $\Rightarrow$  FDM, RMPD, SGC;

6.4 - объемная  $\Rightarrow$  MJS;

6.5 - макрообъемная  $\Rightarrow$  3DW, HIS.

В процессе индукционной наплавки погружением детали в расплавленный металл толщина формируемого слоя зависит от адгезионного взаимодействия расплава и наращиваемой поверхности детали. Заполнение пор – от условий смачивания. Площадь наращиваемой поверхности определяет объемную зону поглощения энергии в процессе наращивания, т. е. по мере увеличения толщины слоя.

При плазменной наплавке исходного порошка толщина формируемого слоя зависит от кинетического и термодинамического факторов, процесс характеризуется объемной зоной поглощения энергии.

В ионно-вакуумных процессах плазма вакуумной дуги является мощным источником ионов материала катода, устремляющихся к подложке под действием отрицательного потенциала, приложенного к подложке. Весь объем камеры заполнен плазмой. Ионы плазмы бомбардируют катод, вызывая испарение с его поверхности нейтральных и возбужденных атомов, которые в свою очередь ионизируются в дуге и возвращаются на катод в виде ионов. В отличие от этих двух способов при электромагнитной наплавке, например, ферромагнитного порошка образуется не единая объемная зона поглощения энергии, а множество локализованных зон.

*Лазерная полимеризация, лазерное спекание слоев, голографическая интерференция, термическая полимеризация по всей поверхности и другие RP технологии являются органичной составной частью широкого класса генеративных технологий, эффективно решающих задачи послойного формообразования на макроуровне. Формируемые ими изделия могут*

*быть конечными деталями, моделями или прототипами, что предполагает необходимость постпроцессов.*

### **3.7.4 Комплекс материаловедческих признаков**

Состав, структура и физико-механические свойства материалов, используемых в ИГТ, имеют принципиально важное значение не только для моделей, прототипов, но и для конечных изделий.

**Виды применяемых материалов.** Способы можно группировать также по применяемым материалам (группа 7):

7.1 - фотополимер  $\Rightarrow$  HIS, RMPD, SGC, SLA;

7.2 - термопласт  $\Rightarrow$  BPM, FDM, MJM, SLS;

7.3 - воск  $\Rightarrow$  MJM, TDP;

7.4 - листовый пластик  $\Rightarrow$  LOM;

7.5 - бумага  $\Rightarrow$  LOM;

7.6 - фольга  $\Rightarrow$  LOM;

7.7 - керамика  $\Rightarrow$  MJS;

7.8 - металл  $\Rightarrow$  3DW, DMD, LENS, MJS, SLS;

7.9 - порошок + связующее  $\Rightarrow$  TDP;

7.10 - реактивный газ  $\Rightarrow$  GPD.

**Методы изготовления по виду и способу наращивания материала.**

Группа 8 рассматривает комбинацию признаков - «исходное состояние используемого материала» и «вид воздействия на материал»:

• Жидкое исходное состояние материала;

8.1 - оплавление + отверждение  $\Rightarrow$  BPM, FDM, MJS;

8.2 - полимеризация + свет одной частоты + лампа  $\Rightarrow$  SGC, PP(SLA);

8.3 - полимеризация + свет одной частоты + луч лазера  $\Rightarrow$  RMPD, SLA;

8.4 - полимеризация + свет двух частот (пространственная голографическая интерференция)  $\Rightarrow$  HIS;

8.5 - полимеризация + нагрев  $\Rightarrow$  PP;

• Твердое исходное состояние материала;

8.6 - плавление  $\Rightarrow$  3DW;

8.7 - склеивание слоев  $\Rightarrow$  LOM;

• Порошкообразное исходное состояние материала;

8.8 - 1-компонентные  $\Rightarrow$  BPM, DMD, SLS;

8.9 - N- компонентные  $\Rightarrow$  DMD, SLS;

8.10 - 1-компонентное + связующее  $\Rightarrow$  TDP.

### 3.7.5. Комплекс технологических признаков

**Технологические признаки.** Генеративные технологии изготовления отличаются широким спектром способов их реализации – спекание, сварка, сборка, наплавка, послойное литье, окунание в расплав, конденсация пара, газа, плазмы, синтез на кристаллической подложке и др. Технологические признаки прямого формообразования различаются в зависимости от агрегатного состояния технологической среды – твердого, жидкого или газообразного. В группе 9 генеративные технологии прямого формообразования классифицируются по технологическим признакам с выделением 3 подгрупп, различающихся агрегатным состоянием технологической среды:

- Твердое агрегатное состояние;
  - 9.1 - прессование, спекание слоев порошка на подложке ⇒ SLS;
  - 9.2 - послойное формирование наращиваемых объемов порошками и др. частицами ⇒ TDP;
  - 9.3 - послойное соединение листовых двумерных заготовок ⇒ LOM;
  - 9.4 - послойное формирование и спекание оболочек из материала детали ⇒ DMD, PP;
  - 9.5 - послойное соединение порошков и др. частиц для создания оболочковых форм ⇒ 3DW, PP;
  - 9.6 - спекание, сварка послойно сформированных заготовок ⇒ 3DW;
  - 9.7 - сборка из объемных трехмерных частей единой детали (неразъемное соединение) ⇒ SLA, TDP;
- Жидкое агрегатное состояние;
  - 9.8 - послойное формирование детали или ее поверхностных объемов наплавкой ⇒ 3DW;
  - 9.9 - послойное формообразование изделия каплями расплава ⇒ MJS;
  - 9.10 - послойное формообразование изделий струями расплавов ⇒ BPM, FDM, MJM;
  - 9.11 - послойное литье по моделям растворенных и расплавленных материалов ⇒ SGC;
  - 9.12 - послойное выращивание изделия путем полимеризации, иницируемой облучением ⇒ HIS, LENS, RMPD, SGC, SLA;
  - 9.13 - создание оболочковых изделий струей растворов или расплавов ⇒ DMD;

9.14 - послойное наращивание одно- или многократным окунанием в расплав материала;

- Газообразное агрегатное состояние;

9.15 - формирование слоев имплантацией и осаждением пара, газа и плазмы ⇒ GPD;

9.16 - послойное наращивание объема детали осаждением пара, газа и плазмы ⇒ DMD, GPD;

9.17 - послойное осаждение потоков пара, газа и плазмы легкоплавких материалов ⇒ GPD;

9.18 - наращивание функциональных слоев осаждением пара, газа и плазмы ⇒ GPD;

9.19 - послойный синтез тугоплавких соединений осаждением пара, газа и плазмы ⇒ GPD;

9.20 - послойный синтез материала осаждением на кристаллическую подложку из газа и плазмы ⇒ GPD;

9.21 - послойное формообразование оболочек осаждением пара, газа и плазмы ⇒ GPD.

**Вид среды обработки.** Группа 10 характеризует среду обработки и имеет следующие показатели:

10.1 - инертные газы ⇒ 3DW, DMD, LENS, SLS;

10.2 - реактивные газы ⇒ GPD;

10.3 - воздух ⇒ BPM, FDM, HIS, LOM, MJM, MJS, RMPD, SGC, SLA, TDP.

**Давление среды обработки.** Группа 11 определяет относительный уровень давления среды обработки:

11.1 - пониженное ⇒ GPD;

11.2 - нормальное ⇒ BPM, FDM, HIS, LOM, MJM, MJS, RMPD, SGC, SLA, SLS, TDP;

11.3 - повышенное ⇒ 3DW, DMD, LENS.

### **3.7.6 Комплекс инструментальных признаков ГТ**

Понятие «инструмент» в генеративных технологиях не идентично такому же понятию в традиционных технологиях, например, роль «инструмента» часто выполняет луч лазера.

**Тип рабочих движений инструмента.** Группы 12÷14 расширяют понятие движений формообразования. Группа 12 характеризует их тип:

12.1 - поступательное ⇒ MJM, TDP;

12.2 - вращательное ⇒ DMD;



12.3 - осциллирующее  $\Rightarrow$  3DW, BPM, DMD, FDM, GPD, LENS, LOM, MJS, SLA, SLS;

12.4 - вероятностное  $\Rightarrow$  SLS;

12.5 - фрактальное  $\Rightarrow$  SLS;

12.6 - отсутствует  $\Rightarrow$  HIS, RMPD, SGC.

Типы движений 12.4, 12.5 используются для уменьшения температурных деформаций.

**Направление рабочих движений инструмента.** Группа 13 характеризует направление в системе координат изделия:

13.1 - поступательное по оси  $X \Rightarrow$  3DW, BPM, FDM, LOM, MJM, MJS, TDP;

13.2 - поступательное по оси  $Y \Rightarrow$  3DW, BPM, FDM, MJM, MJS, TDP;

13.3 - поступательное по оси  $Z \Rightarrow$  DMD;

13.4 - вращательное вокруг оси  $X \Rightarrow$  DMD;

13.5 - вращательное вокруг оси  $Y \Rightarrow$  DMD;

13.6 - вращательное вокруг оси  $Z \Rightarrow$  DMD;

13.7 - сложное в плоскости  $X-Y \Rightarrow$  DMD, LENS, SLA, SLS.

Периодическое движение опускания платформы по оси  $Z$  на заданный шаг построения (толщину слоев), присущее большинству RP способов, в данной классификационной группе входит составной частью в движение по оси  $Z$  в принятой системе координат.

**Скорости рабочих движений инструмента.** Группа 14 характеризует скорости рабочих движений:

14.1 - отсутствует  $\Rightarrow$  HIS, RMPD, SGC;

14.2 - низкая  $\Rightarrow$  FDM, LOM, MJM, MJS;

14.3 - средняя  $\Rightarrow$  3DW, BPM, DMD, TDP;

14.4 - высокая  $\Rightarrow$  GPD, LENS, SLA, SLS.

Уровень скоростей рабочих движений инструмента целесообразно согласовать со скоростями при традиционной обработке резанием: низкая - менее  $10^{-5} \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$  соответствует уровню линейных скоростей износа инструмента; средняя -  $10^{-5} \div 1 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$  - применяемым скоростям подачи; высокая - более  $1 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$  - скоростям резания. В отличие от традиционных технологий для генеративных понятие «износ инструмента» не применимо.

### 3.7.7 Комплекс признаков формообразования ИГТ

Комплекс формообразующих признаков был рассмотрен как замыкающий, раскрывающий смысл принципа послойного выращивания макроизделия. Он включает главный физический процесс, характер и метод формообразования, объемные признаки, интенсивность образования.

**Главный физический процесс, определяющий размерное формообразование.** Группа 15 характеризует основные физические процессы, определяющие размерное формообразование:

- 15.1 - плавление  $\Rightarrow$  3DW, LENS, SLS;
- 15.2 - отвердевание  $\Rightarrow$  3DW, BPM, DMD, FDM, LENS, MJM, MJS, SLS;
- 15.3 - испарение  $\Rightarrow$  LOM;
- 15.4 - конденсация  $\Rightarrow$  GPD;
- 15.5 - пластическая деформация  $\Rightarrow$  LOM, SLA, SLS, TDP;
- 15.6 - химическое растворение  $\Rightarrow$  PP(SLA);
- 15.7 - химическое осаждение  $\Rightarrow$  PP(SLA);
- 15.8 - электролиз (гальваностегия, гальванопластика)  $\Rightarrow$  PP(SLA);
- 15.9 - фотополимеризация  $\Rightarrow$  HIS, RMPD, SGC, SLA;
- 15.10 - направленное взаимодействие наэлектризованных или намагниченных частиц  $\Rightarrow$  3DW, GPD;
- 15.11 - взаимодействие диспергированных частиц и связывающих материалов  $\Rightarrow$  TDP.

Признак 15.6 - химическое растворение - связан не с наращиванием слоев, а с их удалением (см. группу 16)

**Характер формообразования.** Группа 16 характеризует основной процесс формообразования:

- 16.1 - нанесение (наращивание) материала  $\Rightarrow$  3DW, LOM, MJM, MJS, PP;
- 16.2 - изменения агрегатного состояния исходного материала  $\Rightarrow$  FDM, GPD, HIS, RMPD, SGC, SLA;
- 16.3 - направленное соединение частиц, образующих твердое тело  $\Rightarrow$  BPM, DMD, LENS, SLS, TDP;
- 16.4 - удаление материала заготовки  $\Rightarrow$  LOM, PP.

Признак 16.4, как и 15.6, отражает возможность построения ГТ, использующих элементы послойного снятия материала.

**Метод формообразования.** Группа 17 определяет метод формирования формообразующих поверхностей:

17.1 - кинематический  $\Rightarrow$  3DW, GPD, HIS, LENS, LOM;

17.2 - копирования  $\Rightarrow$  SGC;

17.3 - комбинированный  $\Rightarrow$  BPM, FDM, MJM, MJS, RMPD, SLA, SLS, TDP;

17.4 - адаптивный  $\Rightarrow$  DMD.

**Объемные признаки формообразования.** Группа 18 расширяет понятие элементарного объема при формообразовании:

18.1 - элементарный точечный объем (ЭТО)  $\Rightarrow$  BPM, DMD, HIS, SLA, SLS, TDP;

18.2 - элементарный линейный объем (ЭЛО)  $\Rightarrow$  3DW, FDM, LENS, MJM, MJS;

18.3 - элементарный поверхностный объем (ЭПО)  $\Rightarrow$  GPD, LOM, RMPD, SGC, TDP.

Рассмотрим эти понятия более подробно.

Формообразование – это образование требуемой формы изделия, определяемой геометрическим характером и взаимным расположением ограничивающих ее поверхностей, а также параметрами макро- и микрогеометрии. Если рассматривать эту задачу как технологическую, то под формообразованием следует понимать получение твердотельного изделия заданной формы, размеров, топографии поверхностей, механических и физико-химических свойств, определяемых конструкторско-технологической документацией (в т. ч. и в электронном виде).

Традиционно формообразование осуществляют формообразующие элементы (точки, линии или поверхности), принадлежащие твердотельному инструменту (режущему, давящему и т. п.) и контактирующие с поверхностью изделия. Для генеративных технологий, как уже отмечалось, потребность в традиционном инструменте отпадает, здесь «инструментом» являются элементы технологической системы: луч лазера, струя полимера, металла и т. д.

В RP технологиях в процессе формообразования подвижная платформа и «инструмент» – формообразующий элемент системы – совершают относительные перемещения, обеспечивая тем самым формообразование изделия послойным наращиванием.

В генеративных технологиях для формообразования изделия необходимо иметь аналитическое описание следующих основных характеристик (свойств):

- описание изделия ограничивающими его поверхностями в 3D изображении;
- представление 3D CAD модели адекватной совокупностью 2D CAD моделей;
- «инструмент» с формообразующими параметрами (пятно контакта луча лазера, диаметр сопла и т. п.);
- формообразующие движения в технологической системе.

Совокупность представленных характеристик образуют модель формообразования для генеративных технологий.

Модели формообразования могут различаться конструктивными особенностями формообразующих элементов и формообразующими движениями.

Анализ существующих RP технологий показывает, что формообразование изделий может быть осуществлено по трем признакам объемов формообразования: ЭТО, ЭЛО, ЭПО.

Элементарный точечный объем (ЭТО) формируется в первую очередь зоной контакта луча лазера с поверхностным слоем жидкого полимера, порошка керамики, металла и др. материалов. Понятие «элементарный объем» вытекает из особенностей генеративного процесса формообразования изделий, так как их создание выполняется по слоям, представляющим собой сумму конечного множества точечных и/или линейных объемов.

Элементарный линейный объем (ЭЛО) формируется конечномерной линией (щель, сопла) или сопряженными элементарными точками, образующими линию. Так же как и точки, линии создают единичный слой изделия. Последовательное объединение необходимого количества линий формирует заданный слой изделия.

Третью группу составляют RP технологии, где формообразование изделий происходит путем наращивания элементарных поверхностных объемов (ЭПО). Инструмент формирует различными физическими способами единичный элементарный поверхностный объем, после чего происходит его соединение с предыдущим слоем создаваемого изделия.

### 3.7.8 Примеры приложения принципов классификации к генеративным технологиям макроуровня

Ранее рассмотрены технологии, которые в литературе относят к идеологии Rapid Prototyping. Предложенная классификация позволяет использовать рассмотренные признаки применительно к существенно более широкому кругу технологий, в том числе к генеративным технологиям микро- и наноуровня. Рис. 3.18 дает представление о возможностях применения предложенного подхода к таким технологиям, как ионно-плазменный синтез слоев, плазменная наплавка, сварка послойно сформированных заготовок, электромагнитная наплавка, индукционная наплавка погружением, ультрафиолетовая полимеризация по площади сечения и др.

Предложенная классификация позволяет с единых позиций рассматривать и оценивать характеристики различных технологических процессов послойного выращивания изделий или их поверхностных слоев.



Рисунок 3.18 – Пример расширения классифицируемых технологий по зонам поглощения

### **3.7.9 Информационная система поддержки принятия решений по использованию интегрированных генеративных технологий макроуровня**

Изложенное и мировой опыт реализации генеративных технологий позволяют считать их важнейшим ресурсом современного производства. С их помощью можно сократить время на создание новых конструкций и на их отладку, на доведение продукции до рынка и на ее совершенствование, что и позволяет ей оставаться конкурентоспособной. Для принятия решений по эффективному применению конкретной генеративной технологии необходимо знать области ее рационального применения и технологические возможности.

Предложенная классификация позволила разработать информационную систему по генеративным технологиям, которая ориентирована на изучение особенностей и анализ возможностей интегрированных технологий с целью принятия правильного решения при их выборе. Основой информационной системы является разработанная классификация и банк данных по предметной области этих технологий. Система содержит данные по описанию и классификацию технологий, базы данных оборудования и его технологических характеристик. Система разработана в среде управления базами данных Visual FoxPro.

При разработке информационной системы решаются следующие основные задачи:

- сбор, систематизация и анализ информации по интегрированным генеративным технологиям;
- автоматизация работы с классификационными признаками интегрированных технологий, обеспечивающая всесторонний анализ их возможностей и рациональный выбор способа материализации компьютерной модели изделия при решении конкретной технологической задачи;
- формирование базы данных оборудования и его технологических характеристик.

Главная экранная форма информационной системы представлена на рис. 3.19. Из главной формы можно перейти к работе со следующими подсистемами:

- информационной – описание интегрированных технологий и их классификация;
- просмотра или редактирования баз данных классификационных групп и признаков RP интегрированных технологий;

- просмотра или редактирования базы данных технологического оборудования и его технических характеристик;

- вспомогательными (описание, настройки и обслуживание баз данных).

Информационная система предоставляет пользователю следующие основные возможности работы:

- просматривать или редактировать сведения по генеративной технологии, собранные из различных литературных источников, как непосредственно в системе (только текст), так и в редакторе MS Word;

- получить информацию по классификационным признакам для выбранной технологии;

- формировать систему классификации интегрированных технологий

- редактировать классификационные группы и признаки;

- устанавливать метки взаимосвязи интегрированных технологий и классификационных признаков;

- работать с примечаниями пользователя к классификационным группам и признакам;

- пополнять и редактировать базы данных оборудования и их характеристик;

- работать со справочными данными по группам и обозначениям оборудования.

- устанавливать закладки с комментариями на выбранные записи в базах данных;

- устанавливать индексирование (последовательность визуального представления) и фильтры (ограничение объема визуального представления по заданным условиям) на записи в базах данных, что обеспечивает пользователю эффективную работу с информацией.



Рисунок 3.19 – Главная экранная форма информационной системы RP интегрированных технологий

Разработанная информационная система относится к обучающим прикладным программам, которые ориентированы на изучение особенностей и анализ возможностей интегрированных генеративных технологий. Основой информационной системы является классификация и банк данных по предметной области ИГТ. Система содержит данные описания и классификационные признаки всех комплексов, оборудования и его технологических характеристик.

### **3.8 Примеры систем генеративных технологий**

#### **3.8.1 Система лазерной стереолитографии на базе установки SLA 5000**

Система лазерной стереолитографии является основным оборудованием, используемым в исследованиях и изготовлении. Она включает установку SLA 5000 фирмы 3D Systems (США); компьютерную станцию подготовки процесса; камеру PCA 500 для окончательной полимеризации изделия, выращенного из фотомономера; вакуумную камеру производства физико-технического института НАНУ (Харьков); низкотемпературный шкаф; моечную камеру.

Установка SLA 5000 (рис. 3.20) относится к новому поколению систем ускоренного формообразования изделий. Она включает твердотельный лазер  $\text{Nd:YVO}_4$  мощностью не менее 216 мВт и длиной волны 354,7 нм, систему фиксированных перемещений платформы, которая обеспечивает получение толщин слоев в пределах 0,05÷0,15 мм, оптическую систему управления лазерным лучом с диаметром светового пятна 0,23÷0,28 мм и скоростью сканирования до 5,0 м/с, ванну объемом 253,61 литра. Допустимый вес построенного изделия составляет 68,04 кг при максимальных габаритах 508×508×584 мм (X×Y×Z).

Компьютерная станция подготовки процесса при работе с STL-файлом выполняет следующие функции:

- рациональное размещение изделия перед построением на рабочей платформе;
- трансформация 3D CAD модели в совокупность 2D CAD плоских сечений (с заданными толщинами слоев), при одновременном контроле качества описания исходной модели по сечениям (соблюдение условий непрерывности поверхности и контроль минимально допустимой толщины стенок изделия);





Установка лазерной  
стереолитографии SLA-5000  
и управляющая  
компьютерная станция



Рабочая станция подготовки  
процесса



Камера ультрафиолетового  
отверждения PCA-500



Вакуумная камера

Рисунок 3.20 – Система лазерной стереолитографии на базе установки SLA-5000

- подготовка программы управления движением лазерного луча, определение параметров процесса, ориентации модели, автоматическое или в ручном режиме создание элементов поддержки (технологических опор).

Компьютер системы управления установкой SLA 5000 обеспечивает:

- автоматическое управление и контроль процесса послойного построения изделия;

- визуальный контроль за текущими параметрами построения (начало и конец времени построения, мощность лазера, степень выполнения и др.);

- автоматическое выключение установки в случае завершения или отклонения от заданных условий построения.

Камера РСА 500 предназначена для окончательной полимеризации изделия. Она оснащена источниками ультрафиолетового излучения – 8 флуоресцентных ламп общей мощностью 640 Вт, а также рефлекторными зеркалами. Изделие помещается на столе  $\varnothing$  800 мм, который вращается со скоростью 1 об/мин. Рефлекторные зеркала обеспечивают равномерное освещение объекта.

В вакуумной камере выполняются работы с рабочими смесями при изготовлении гибких (силиконовых) пресс-форм на этапе тиражирования.

Низкотемпературный термошкаф предназначен для термообработки изготовленного изделия с целью повышения его механических свойств после полного отверждения, а моечная камера для промывки готовых изделий и удаления технологических опор после построения.

Процесс построения представляется таким образом. Луч лазера мощностью  $P_L$  пропускается через оптическую систему и с помощью сканирующего управляющего зеркала попадает на поверхность жидкого фотомономера. Для обеспечения высокой точности положения луча механизм сканирования имеет малую инерционность и время запаздывания.

Время, требуемое для полимеризации, зависит от спектральных характеристик фотомономера, характеристик лазерного луча (длина волны, мощность  $P_L$ , диаметр луча  $D_L$ ) и скорости его перемещения по поверхности фотополимера (скорость сканирования  $V_L$ ).

Процесс отверждения фотополимера зависит от количества полученной оптической энергии в области фокусирования лазерного луча. Фокусирование лазерного луча происходит на поверхности фотомономера. Однако с учетом полупрозрачности фотомономера лазерный луч

проникает и на определенную глубину. Время, требуемое для отверждения слоя под формируемым сечением, зависит от спектральных характеристик фотомономера, связанных с его вязкостью и поверхностным натяжением.

Перемещаясь со скоростью  $V_L$  по поверхности фотомономера, лазерный луч мощностью  $P_L$  обеспечивает экспозицию  $E_{\max}$ , которая определяется по следующей зависимости:

$$E_{\max} = 2 \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{P_L}{D_L V_L}, \quad (3.1)$$

Экспозиция фотополимера определяется как произведение плотности мощности лазерного излучения на выдержку (время экспозиции). Поскольку реальный процесс формирования поверхности фотополимера производится при непрерывном сканировании лазерным лучом, целесообразно в качестве выдержки рассматривать максимальное время воздействия на элементарную площадку.

Максимальное время воздействия  $\tau_{\max}$  лазерного луча диаметром  $D_L$  на элементарный участок фотополимера длиной  $dL$  при скорости сканирования  $V_L$  определяется зависимостью:

$$\tau_{\max} = \frac{D_L + dL}{V_L} = \lim_{dL \rightarrow 0} \frac{D_L + dL}{V_L} = \frac{D_L}{V_L}. \quad (3.2)$$

Глубина отверждения фотомономера зависит от экспозиции и активности лазерного излучения. Уравнение, определяющее глубину отверждения фотополимера  $h_{\text{отв}}$  в зависимости от величины экспозиции  $E$ , имеет следующий вид:

$$h_{\text{отв}} = h_e \ln \left( \frac{E}{E_C} \right), \quad \frac{E}{E_C} > 1; \text{ иначе } 0, \quad (3.3)$$

где  $E_C$  - пороговая экспозиция, при которой фотополимер переходит из жидкого состояния в квазитвердое;  $h_e$  - коэффициент, равный глубине отверждения фотополимера при экспозиции, в  $e$  раз превышающей пороговую экспозицию ( $e$  - основание натурального логарифма).

Построение изделия проводится в следующем порядке. Исходное положение – платформа устанавливается под поверхностью жидкого фотомономера на расстоянии, равном шагу, с которым 3D CAD модель рассекалась параллельными плоскостями. Уровень этой поверхности соответствует фокусировке лазерного луча. Управляющий компьютер обеспечивает перемещение выравнивающего ножа в пределах габаритов формируемого сечения.

После завершения сканирования требуемого сечения вначале по контуру, а затем по площади и опускания платформы на требуемый шаг производится нивелирование поверхности жидкого фотомономера выравнивающим ножом. Цикл повторяется многократно до завершения формирования изделия. После этого платформа поднимается над поверхностью жидкого фотомономера, производится операция удаления его остатков, очистка и промывка.

### **3.8.2 Система избирательного лазерного спекания на базе установки Vanguard Si2 SLS**

Система избирательного лазерного спекания включает следующие составляющие:

- установку для избирательного лазерного спекания Vanguard Si2 SLS производства фирмы 3D Systems (США);
- шкаф управления;
- компьютерную сеть;
- охладитель;
- станцию отрыва BOS;
- высокотемпературную печь Laser Oven;
- гидравлический подъемник;
- систему обеспечения газообразным азотом;
- смеситель порошков.

Установка Vanguard Si2 SLS (рис. 3.21) предназначена для быстрого производства (Rapid Manufacturing) конечного изделия, т. е. она без стадии получения модели прототипа непосредственно способна обеспечивать производственный процесс.

Она оснащена новейшими системами сканирования, новым компьютерным оборудованием, отличается оптимизированными параметрами процесса выращивания, повышенной точностью размеров и качества поверхности, включая кромки. Установка имеет два режима работы – режим высокого разрешения и режим высокой скорости изготовления (увеличение до 50%).

Установка оснащена CO<sub>2</sub> лазером мощностью 100 Вт. Скорость сканирования в пределах 7,5÷10 м/с, что в два раза выше, чем на установке SLA 5000. Рабочее пространство 381×330×457 мм<sup>3</sup> (X-Y-Z). Компьютерная станция на основе процессора Pentium III, операционная система Windows 2000.



Рисунок 3.21 – Система избирательного лазерного спекания на базе установки Vanguard Si<sub>2</sub> SLS

Габариты рабочей установки 2,13×1,33×1,98 м. Шкаф управления содержит управляющий компьютер и монитор. Охладитель как вспомогательный агрегат предназначен для отвода тепла от лазерной системы.

Станция отрыва BOS предназначена для очистки деталей от лишнего порошка и его последующей фильтрации с целью повторного использования.

Высокотемпературная (до 1070°C) печь Laser Oven – предназначена для спекания металлических и керамических порошков, выжигания связующего вещества, расплавления бронзы и инфильтрации. Имеет автономное программное обеспечение.

В ходе избирательного лазерного спекания из порошковых материалов формируются объемные геометрические тела. Первый слой материала, оплавленного под действием лазерного CO<sub>2</sub> луча, создается на рабочей платформе, которая может перемещаться по оси Z. Работа лазерного луча контролируется таким образом, что поверхность слоя порошка, нагреваемого практически до точки плавления, воспроизводит ИК-изображение полученного сечения. Поступающей в эту зону энергии лазерного луча достаточно для спекания материала в однородный слой. На

него наносится новый слой порошка с помощью специального роликового механизма. Процесс повторяется до завершения наращивания всего объема изделия. Специальные поддерживающие конструкции в данном процессе не требуются, поскольку их роль выполняет масса порошка в пределах рабочей емкости.

### **3.8.3 Измерительная система на базе сканирующей установки Imetric Iscan II**

Разработка систем оцифровки изображения, основанных на триангуляции и интерференционном проецировании, быстро развивается. Такие системы производят сканирование поверхности произвольной формы в трех измерениях. Сегодня эффективные системы оцифровки используются в промышленности для контроля качества, когда данные сканирования служат для сравнения (верификации) фактической геометрической формы детали с ее 3D CAD моделью.

Оптико-цифровая сканирующая система Iscan II фирмы Imetric (Швейцария) предназначена для пространственного сканирования объектов с целью получения трехмерного изображения, а также сопоставления данных обмера с 3D CAD моделью (рис. 3.22). Система состоит из следующих компонентов:

- сенсорная (сканирующая) головка с цифровой камерой разрешением 1280×1024 пикселей и проектором;
- источник света с ксеноновой лампой высокого давления мощностью 1000 Вт;
- волоконно-оптический кабель для подсоединения источника света к проектору;
- компьютер управления и обработки данных с программным обеспечением, совместимым с Windows NT (Windows 2000);
- углеволоконные калибровочные пластины 300×300 и 600×600 мм со стандартными визирными маркерами (для небольших объектов);
- фотограмметрическая система.

Фотограмметрическая система состоит из следующих компонентов:

- метрологической фотокамеры с традиционной оптикой (фокусное расстояние 24 мм), встроенной фотовспышкой, интегрированным компьютером Pentium (Windows NT) и цветным монитором;
- фотограмметрического программного обеспечения, позволяющего выполнять следующие операции: распознавание образа с помощью

фотокамеры, автоматическое измерение объектов с наклеенными светоотражающими маркерами, идентификацию целей, автоматическое ориентирование объекта, трансформацию координат реперных точек и геометрических поверхностей для фотограмметрического анализа и визуализации.



Рисунок 3.22 – Оптико-цифровая сканирующая система Imetric IscanII в составе:

- 1 – сканирующая головка на треноге;
- 2 – источник света с оптоволоконным кабелем;
- 3 – компьютер управления и обработки данных;
- 4 – переносной фотоаппарат для фотограмметрии со встроенным компьютером

Вспомогательное оснащение системы Iscan II включает набор светоотражающих маркеров различных диаметров, набор углеволоконных стандартных стержней с маркерами, покрытыми светоотражательным веществом длиной 2 м и пр. Габариты пространства возможных измерений от 100×100×100 мм до 10000×10000×10000 мм. Перед сканированием объекта необходимо осуществить настройку и калибровку системы. Если

деталь имеет сравнительно небольшие размеры (до 500÷1000 мм), то она может быть отсканирована при помощи калибровочной пластины или другого ссылочного объекта, на котором она может быть размещена или который может быть размещен над деталью. Крупногабаритные детали подготавливаются к измерениям наклейкой светоотражательных маркеров. Кроме этого необходимо проконтролировать отражательные свойства детали. Сканер может эффективно работать только с темными и яркими объектами. Если деталь имеет небольшой блеск, то ее поверхность необходимо обработать темной аэрозольной краской. Необходимо также подобрать интенсивность окружающего освещения, поскольку яркий свет будет отражаться в камере. Если объект достаточно большой, то устранение ярких пятен с различных ракурсов может занять существенное дополнительное время.

При сканировании больших объектов с наклеенными светоотражающими мишенями необходимо соблюдать следующие правила: в каждом виде камера должна фиксировать минимум четыре маркера. Рекомендуемое расстояние между маркерами до 400 мм. Кроме этого необходимо следить, чтобы сканируемые маркеры одновременно находились в поле зрения камеры и проектора. Камера измеряет заданные координаты с помощью маркеров, также как и при помощи стандартных калибровочных приспособлений. При преобразовании полученных данных в цифровой вид очень важно получить совмещение координат измеряемых точек с координатами реперных точек, полученных при фотограмметрии.

Система сканирования Iscan II в течение нескольких минут производит съемки объекта в виде множества точек поверхности и регистрирует их автоматически в одной общей системе координат X-Y-Z. Объект представляется в виде последовательно отсканированных поверхностей.

Преимущества данной оптической цифровой системы:

- высокая скорость измерений;
- высокое разрешение по сечениям;
- мобильность;
- легкость использования.

Порядок работы: на каждый объект наклеивается совокупность мишеней (целей) и производится фотографирование целей на поверхности; с помощью программного обеспечения осуществляется привязка мишеней к системе координат (X-Y-Z), затем производится сканирование



поверхностей как совокупностей точек и наложение массива (облака) точек на систему точек с известными координатами.

Облако точек на поверхности измеряется путем подачи на объект двухполосного света (свет-тень). Между светом и тенью образуется граница, которая повторяет искривление измеряемой поверхности.

Сначала на объект подается 2 полосы, затем 4, 8 и т. д. В результате расстояние между полосами последовательно уменьшается, а также предельное расстояние между границами. Таким образом, любая часть поверхности воспринимается как совокупность полос (границ свет-тень) и замер этих сечений дает совокупность измеряемых точек (линий).

Любой объект представляется в виде последовательно отсканированных частей поверхностей, при этом мишени на поверхности видны на двух смежных поверхностях.

После сканирования с помощью специального программного обеспечения производится ручное «сглаживание-сшивание» всех поверхностей в единый объект. При необходимости измеряемый объект может быть представлен в триангуляционном формате (STL-файл), с которым возможно далее работать в системах RP. Полученный STL-файл используется для контроля качества изготовления изделия (верификации) путем совмещения его оцифрованного изображения с 3D CAD моделью с учетом заданных предельных отклонений.

Для установления соответствия обработанной поверхности заданным параметрам шероховатости измерения можно производить при помощи различных приборов, предназначенных для ее объективной оценки.

Ужесточение требований к качеству обработанной поверхности ставит вопрос повышения точности этих оценок. Центр располагает соответствующим сегодняшним требованиям профилометром-профилографом Surtronic 3+ фирмы Taylor-Hobson (рис. 3.23). Он является переносным прибором, предназначенным для измерения основных параметров шероховатости в лабораторных и производственных условиях:

$R_a$  – среднее арифметическое отклонение профиля;

$R_z$  – высота неровностей профиля по десяти точкам;

$R_q$  – среднее квадратичное отклонение профиля;

$R_{\max}$  – наибольшая высота неровностей профиля;

$t_p$  – относительная опорная длина профиля;

$S_m$  – средний шаг неровностей.

Базовая длина, зависящая от величины шероховатости, может иметь следующие значения: 0,25, 0,8 и 2,5 мм.

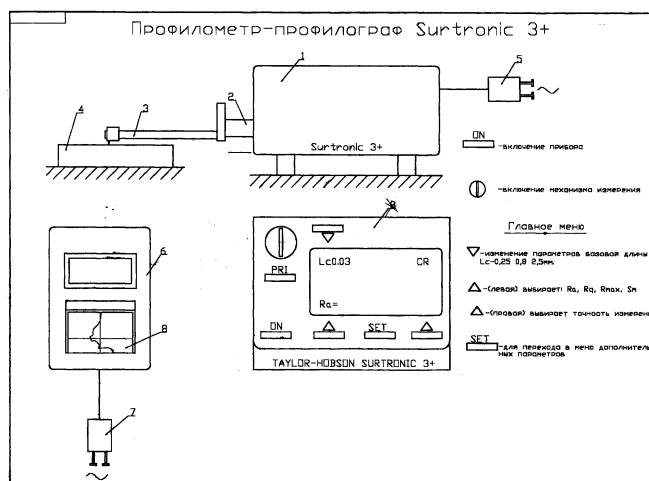


Рисунок 3.23 – Внешний вид и схема профилометра-профилографа Surtronic 3+ фирмы Taylor-Hobson:

- 1 - блок управления; 2 - приводной вал – держатель; 3 - измерительный щуп;  
 4 - измеряемая поверхность; 5 - блок питания; 6 – принтер;  
 7 - блок питания; 8 – профилограмма

Принцип работы прибора следующий: механизм привода осуществляет продольное перемещение измерительной головки с заданной скоростью. На измерительной головке закреплен щуп, на конце которого находится алмазная игла, ощупывающая исследуемую поверхность. Щуп связан с индукционным датчиком, сигнал с которого подается в блок управления. При перемещении щупа он дополнительной опорой, находящейся возле алмазной иглы, опирается на измеряемую поверхность,

скользя по ней. Таким образом, пятка щупа является как бы базой, от которой отсчитывается перемещение иглы щупа. Так как радиус опоры достаточно большой, то возможно перемещение щупа не только по гладкой поверхности, но и развитой, например, слоистой. Эта особенность позволяет производить измерения на сложных поверхностях и в труднодоступных местах. При перемещении щупа по измеряемой поверхности алмазная игла поднимается и опускается на микронеровностях поверхности. При этом в индукционной катушке, связанной с алмазной иглой, возникает ЭДС, пропорциональная размерам микронеровностей. Сигнал подается в прибор, где производится подсчет параметров шероховатости.

В комплект входит непосредственно сам прибор, печатающее устройство, блок питания. Прибор состоит из блока управления и вала-держателя, на котором устанавливается щуп с алмазной иглой. Исходные данные и результаты измерений выводятся на экран прибора. Принтер позволяет создавать твердые копии отчетов.

Применительно к геометрическим телам, получаемым генеративными способами, характеристики прибора соответствуют задаче по оценке шероховатостей поверхностей первого и второго порядка, различно ориентированных относительно вектора наращивания.

### **3.9 Используемые материалы**

Процесс лазерной стереолитографии SLA реализуется в среде многофункциональных или специальных фотополимеров.

Система SLA 5000, использующая полимеры в качестве рабочего материала, очень эффективна, так как резко снижается энергоемкость производства (требуется в 50÷100 раз меньшее количество энергии, чем при использовании термических методов), а использование материала достигает 100%. Разнообразие свойств изделия может быть достигнуто путем выбора необходимого из широкого диапазона существующих мономеров и полимеров.

Фотополимеры обладают уникальными характеристиками, пригодными для генеративных технологий. Во-первых, процесс фотополимеризации всегда происходит в тонких слоях. Во-вторых, изменяя свойства вязкости, можно обеспечить увеличение скорости процесса и уменьшение усадки материала, т. е. достичь целей, которые стоят перед генеративной технологией. С другой стороны, знание условий процесса, которые являются результатом

использования лазерных источников энергии, позволяют оценить механизм основных процессов фотополимеризации. Возможно использование смол в других, отличных от SL методов RP.

В исследованиях лучшие результаты были получены при использовании стереолитографического материала SL 7540 фирмы Vantico и RPC Cure 300 (Швейцария).

SL 7540 представляет собой фотореактивный материал в жидком состоянии, по цвету напоминающий янтарь. Плотность соответствует  $1,14 \div 1,18 \text{ г/см}^3$  (при  $25^\circ\text{C}$ ) и вязкость  $279 \div 540 \text{ cps}$  (при  $30^\circ\text{C}$ ). Рекомендуемая при формировании изделия толщина слоя  $0,025 \div 0,2 \text{ мм}$ . Глубина проникновения луча в материал –  $0,25 \text{ мм}$ . Характеристика основных свойств приведена в табл. 3.6.

Таблица 3.6 – Основные свойства смолы SL 7540 после отверждения

Характеристики	Значения после 90 минутного облучения УФ	Значения после 90 минутного облучения УФ +80 °C
Модуль упругости, МПа	1,538÷1,662	1,324÷1,393
Удлинение при разрыве, %	21,2÷22,4	19,2÷22,1
Предел прочности при изгибе, МПа	48÷52	37÷42
Теплопроводность, Вт/м·°К	0,159	
Твердость, НВ	79	80
Плотность, г/см <sup>3</sup>	1,18	

Для технологии лазерного избирательного спекания SLS применяются порошки из достаточно широкой гаммы материалов – от воска до алюминия, стали и керамики.

В центре были использованы порошки полиамида Dura Form PA и стеклонаполненный жаропрочный полиамид Dura Form GF. Это новое поколение нейлоновых материалов, специально разработанных для термопластиковых деталей, устойчивых к агрессивным средам (спирты, гидрокарбонаты, топливо, растворители), требующих повышенного качества поверхности. Материалы обладают повышенной жесткостью, термостойкостью и механической прочностью, долговечностью и

стабильностью, поддаются механической обработке, сварке, соединению склеиванием. Материал Dura Form GF длительно сохраняет функциональные свойства при температуре до 135°C, а PA – до 100°C.

Характеристика основных свойств материалов Dura Form PA и Dura Form GF приведены в табл. 3.7.

Таблица 3.7 – Основные свойства порошковых материалов Dura Form PA и Dura Form GF, применяемых в SLS технологии

Свойство	Характеристики Dura Form		
	Единица измерения	PA	GF
Плотность	г/см <sup>3</sup>	0,59	0,84
Средний размер частиц	мкм	58	48
Диапазон размера частиц 90%	мкм	25÷92	10÷96
Поглощение влаги (23°C)	%	0,41	0,30
Температура плавления	°C	184	185
Предел прочности	МПа	44	38,1
Удлинение при разрыве	%	9	2
Шероховатость поверхности, $R_a$	мкм	8,5	6,2
Шероховатость после доработки, $R_a$	мкм	0,13	1,0
Объемное удельное электросопротивление	Ом·см	$3,1 \cdot 10^{14}$	$2,0 \cdot 10^{14}$
Поверхностное удельное сопротивление	Ом·см	$3,0 \cdot 10^4$	$2,3 \cdot 10^{14}$
Диэлектрическая прочность	В/мм	$1,6 \cdot 10^4$	$1,5 \cdot 10^4$

Наличие в системе SLS станции отрыва BOS и смесителя порошков позволяет многократно использовать порошки, не попавшие при послойном выращивании изделий в зону воздействия лазерного луча.

### 3.10 Особенности базирования и выбор ориентации изделия в процессе его послойного выращивания

Расположение RP изделия в рабочем пространстве камеры установки SLA имеет ряд отличительных особенностей. Требуется выбрать базирование и ориентацию изделия, которое еще предстоит изготовить путем материализации его электронного образа.

При этом надо исключить какое-либо смещение или опрокидывание в процессе послойного изготовления изделия и обеспечить требуемое качество. Ориентация изделия важна не только по отношению к платформе установки, но и по отношению к вектору наращивания слоев.

Как видно из рис. 3.24,  $h_1 > h_2 = h_3$ , а величина ступеней при одинаковых шагах платформы (равной толщине слоев) больше там, где минимальный радиус кривизны совпадает с осью Z. Эти поверхности будут иметь большую шероховатость. Минимальная шероховатость там, где поверхность сформирована плоскими участками, обращенными вверх.

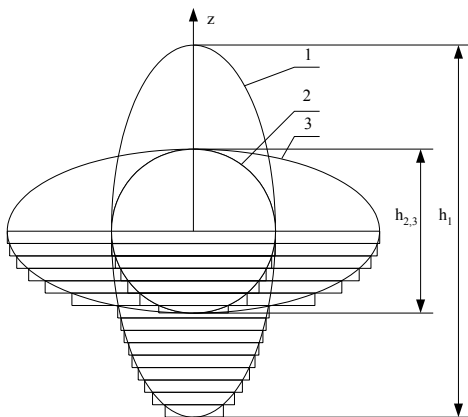


Рисунок 3.24 – Изменение величины ступеней при различной кривизне и расположении поверхностей второго порядка:

- 1 – большая ось эллипса параллельна оси Z;
- 2 – большая ось эллипса параллельна оси Y;
- 3 – большая ось эллипса перпендикулярна оси X

При послойном выращивании в зависимости от конфигурации последующие слои могут «нависать» над предыдущими. В этом случае обязательным является выращивание поддержек, которые по назначению аналогичны приспособлениям для механической обработки. Именно эти поддержки должны устойчиво удерживать послойно выращиваемое изделие во время изготовления от возможных наклонов, смещений и опрокидывания.

Программное обеспечение подготовки процесса стереолитографии составлено так, чтобы предусматривать одновременное с изделием выращивание поддержек. Они могут создаваться в автоматическом режиме или оператором. Изготовление изделий сложных конфигураций и

обеспечение меньших допусков на размер невозможно осуществить без создания систем поддержек.

Каждая деталь, изготавливаемая методами SLA, должна иметь и поддержку основания, чтобы обеспечить переход первых слоев от платформы к изделию. На рис. 3.25 представлена сотовая поддержка RP изделия.

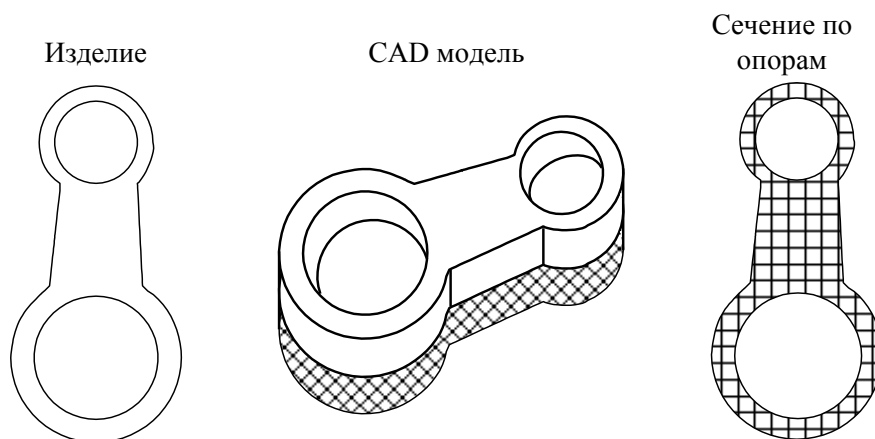


Рисунок 3.25 – Преобразование твердотельной поддержки основания

Поддержки могут быть соединены с предшествующими слоями детали, обеспечивая прочную структуру. Этот метод предпочтителен, когда нужно меньшее количество укрепляющего материала. Таким образом сокращается время построения. Это особенно целесообразно для маленьких участков, расположенных намного выше платформы. На рис. 3.26 изображены примеры различных типов поддержек: клинья, поддержка портала, поддержка консоли.

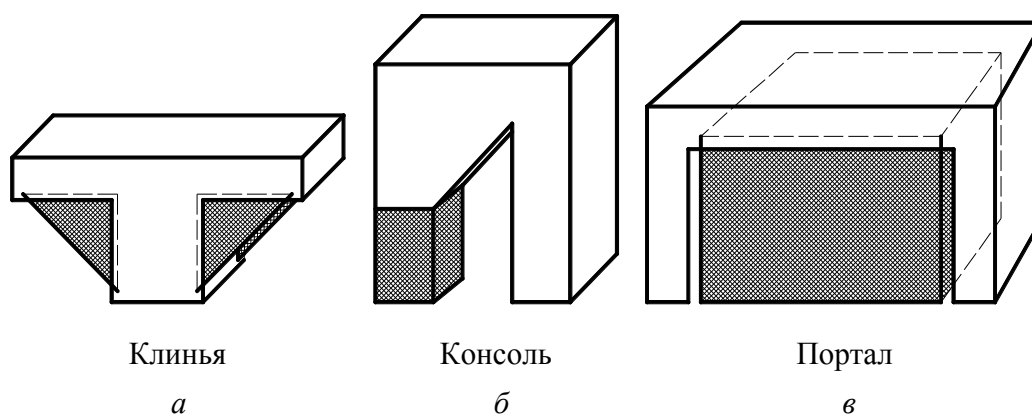


Рисунок 3.26 – Различные типы поддержек поверхностей

Консольные секции изделия оснащаются треугольными поддержками-клиньями. Они прочны, легко удаляемы. Если существуют плоские, обращенные вниз области больше, чем 1,27 мм, они должны быть поддержаны. Наклонные поверхности между  $0^\circ$  и  $30^\circ$  от горизонтали должны рассматриваться как плоские, обращенные вниз области.

В поддержках нуждаются и изделия, сформированные поверхностями второго порядка (рис. 3.27). При различной ориентации эллипса послойно выращиваются, начиная с основания, поддержки для поверхностей второго порядка, обращенных к платформе.

Области нависания слоев зависят от кривизны обращенных вниз поверхностей и шага платформы. На рис. 3.27 толщины слоев для наглядности не адаптированы к кривизне поверхностей.

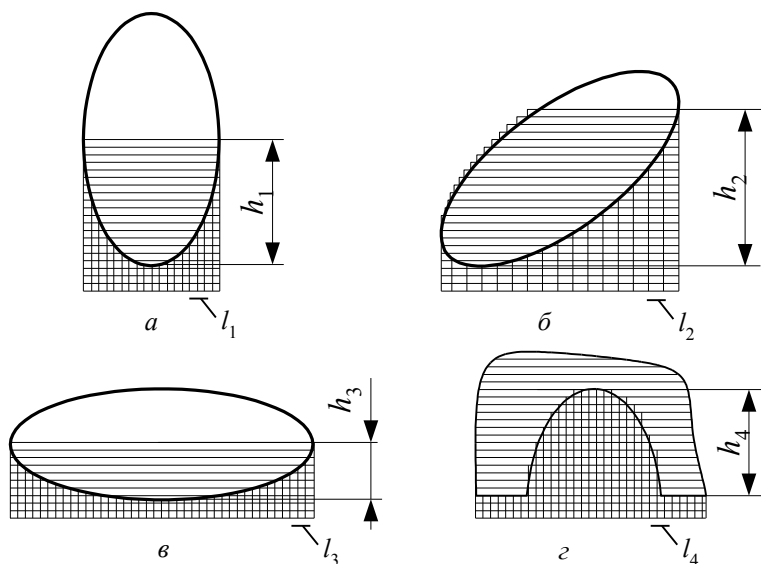


Рисунок 3.27 – Поддержки поверхностей второго порядка  
 а, б, в – наружные, г - внутренние;  
 $h_1, h_2, h_3, h_4$  – высота нависающих слоев

Таким образом, правильная ориентация изделия может сократить время его изготовления за счет рационального выбора и последующего удаления опорных конструкций, а также затраты на их генерацию, повысить качество изделия (рис. 3.28а - г). Рассмотренные варианты ориентации свидетельствуют о том, что в одних случаях (а) удастся одновременно улучшить шероховатость, устранять поддержки и минимизировать время изготовления; в другом (б) – только минимизировать время; в третьем (в) – устранить опоры при увеличении



длительности построения; в четвертом (г) – снизить технологические погрешности при увеличении длительности выращивания.

Перед построением количество опорных поддержек должно быть сокращено до минимума. С одной стороны, они требуют дополнительного материала и замедляют процесс создания изделия, с другой стороны, требуются затраты на их устранение вручную после завершения процесса. Поддержки должны быть легко доступны для удаления из готового изделия.

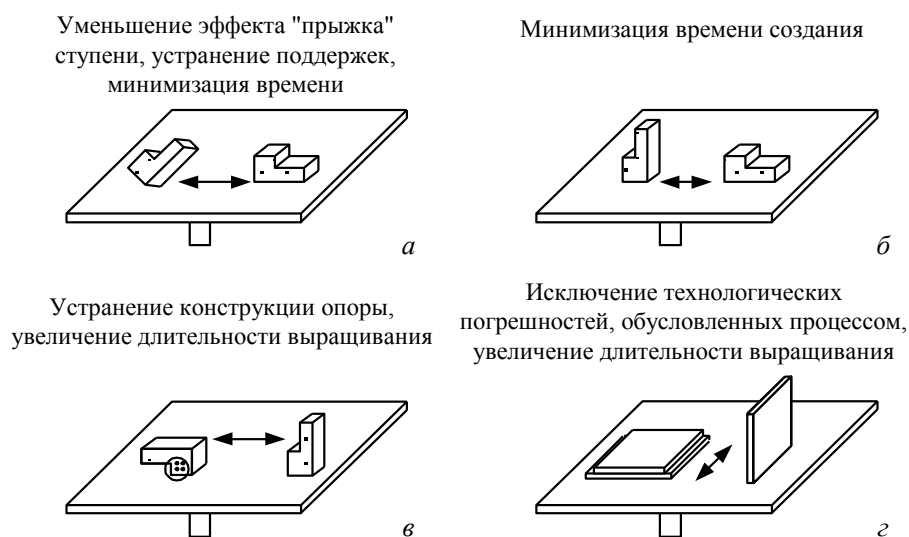


Рисунок 3.28 – Влияние ориентации детали на процесс SLA и его выходные характеристики

Ориентирование детали оказывает также влияние на погрешности, обусловленные процессом. Например, большие плоские поверхности во многих способах очень трудно изготовить без поддержек, если они расположены в направлении выращивания.

Из рассмотренного следует вывод о том, что при изготовлении изделий по SLA технологии в качестве баз может приниматься не только та или иная поверхность выращиваемого изделия (подобно тому, как это делается при механической технологии изготовления). Такую же роль могут играть поддержки. Особенностью использования в качестве баз технологических поддержек является то, что они не являются конструктивным элементом изделия, выращиваются послойно одновременно с собственно изделием в тех же уровнях и имеют сотовую структуру. После завершения послойного выращивания изделия поддержки отделяются от него. Использование в качестве баз поддержек расширяет возможности для выбора рациональной ориентации изделия

относительно вектора наращивания слоев в соответствии с требованиями к точности, шероховатости поверхностей и длительности стереолитографического процесса.

*Возможный, а в ряде случаев наиболее предпочтительный подход, при котором заданное геометрическое тело совместно с поддержками рассматривается как единое послойно выращиваемое изделие. Тогда поверхность платформы может рассматриваться в качестве технологической базы изделия, что многое упрощает и, прежде всего, расширяет возможности выбора ориентации изделия относительно вектора наращивания слоев. Для случая, представленного на рис. 3.27, базирование такого изделия будет осуществляться по поверхностям  $l_1, l_2, l_3, l_4$ .*

### **3.11 Принцип обратимой структурной декомпозиции и трансформации изделий при их послойном выращивании**

Предлагаемый принцип обратимой структурной декомпозиции и трансформации изделия базируется на следующих положениях:

- *сложное изделие, представляющее собой систему объектов, разбивается на составные более технологичные элементы (структурная декомпозиция системы – необходимое условие);*
- *изделие или элементы благоприятным образом оптимально в определенном смысле ориентируются в пространстве и размещаются на поверхности платформы (геометрическая 3D трансформация – достаточное условие);*
- *создание изделия или элементов производится с возможностью изменения толщин формируемых слоев по критерию минимума технологического времени (или себестоимости изготовления) с ограничением по заданной погрешности формообразования (технологическая трансформация – достаточное условие);*
- *после изготовления составных элементов они собираются в изделие (обратимость декомпозиции – необходимое условие).*

Для оценки возможности структурной декомпозиции и трансформации изделий для оптимизации процесса их создания необходимо рассмотреть следующие вопросы:

- ориентация детали на этапе формообразования;
- разделение изделия на части;
- формирование деталей слоями различной толщины.

Необходимость рациональной ориентации деталей на этапе формообразования является дополнительным резервом расширения технологических возможностей способа лазерной стереолитографии.

Рассмотрим деталь, имеющую площадь основания  $S_1$  и высоту  $H_1$ . Выполним ее переориентацию относительно поверхности платформы таким образом, чтобы ее высота уменьшилась и стала равной  $H_2$  ( $H_2/H_1 < 1$ ). Тогда площадь детали увеличится до значения  $S_2 \approx S_1 H_1/H_2 > 1$ . Будем рассматривать технологическое время построения на базе аппроксимационной степенной модели:

$$T = k S^{m_S} H^{m_H}, \quad (3.4)$$

где  $k$  - коэффициент, учитывающий влияние прочих технологических параметров;  $m_S, m_H$  - соответственно степени влияния площади детали  $S$  и высоты  $H$  на технологическое время.

Рассмотрим коэффициент относительного технологического времени:

$$K_{\text{Тотн}} = \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{S_2}{S_1}\right)^{m_S} \left(\frac{H_2}{H_1}\right)^{m_H} = \left(\frac{H_1}{H_2}\right)^{m_S} \left(\frac{H_2}{H_1}\right)^{m_H} = \left(\frac{H_2}{H_1}\right)^{m_H - m_S}, \quad (3.5)$$

где значения показателей степени влияния параметров (табл. 3.8) соответствуют следующим:  $m_S = 0,72$ ,  $m_H = 1$ .

Тогда, для  $H_2/H_1 < 1$  и  $m_H - m_S > 0$ , имеем  $K_{\text{Тотн}} < 1$ , т. е. трансформация привела к уменьшению технологического времени ( $T_2 < T_1$ ).

Также необходимость рациональной ориентации вытекает из использования изменения толщины слоев. При формообразовании одной детали, не являющейся телом вращения, возникает необходимость ее ориентации, обеспечивающей выравнивание углов  $\alpha$  в различных сечениях. При обработке системы деталей возникает конфликт, связанный с их различной кривизной в границах общих слоев, что приводит к комбинационным задачам, которые должны решаться применительно к конкретным ситуациям.

Таким образом, можно считать предварительно доказанной целесообразность рациональной ориентации деталей. Более подробно этот вопрос необходимо рассмотреть применительно к базированию и ориентации изделий, имеющих достаточно сложную форму.

Принципиальной особенностью установок для лазерной стереолитографии является существенное превышение скоростей сканирования лазерным лучом поверхности фотомономера  $X$ - $Y$  над скоростью шага вертикального перемещения платформы по оси  $Z$ . Чем

большая площадь поверхности X-Y сканируется, тем эффективнее использование установки. Рациональное использование площади платформы (плотность расположения объектов на рабочей площади платформы) наряду с предложенным способом сокращения количества слоев наращивания изделий (количества шагов платформы) позволяет существенно сократить время изготовления изделий или составляющих их частей с последующим соединением в единое целое.

В соответствии с предложенным принципом обратимой структурной декомпозиции порядок подготовки и реализации процесса построения изделия представляется следующим:

- Выбирается база изделия, обеспечивающая его наилучшую ориентацию относительно направления построения (оси Z).

- Производится разделение изделия на составляющие части примерно равной высоты. Разделение предпочтительно проводить по плоским поверхностям, перпендикулярным вектору выращивания по границам слоев. Эти плоскости имеют минимальную шероховатость, что в последующем обеспечит минимальные погрешности соединения составных частей в единое изделие. 3D CAD модель разбивается на составные части по следующему принципу. Анализируется график зависимости высоты движения стола от количества слоев для исходной детали. Разбиение на части может производиться в точках перегиба рассматриваемой зависимости, что характеризует изменение скорости (т. е. времени) построения детали.

- Решается задача рациональной ориентации каждой составляющей части изделия относительно вектора наращивания слоев.

- Выполняется планировка предельно плотного размещения рационально ориентированных деталей в пределах рабочей площади платформы.

- Реализуется процесс послойного выращивания 3D CAD объектов.

- Соединение поверхностей отдельных элементов производится склеиванием по поверхностям технологических разъемов. Для обеспечения точности базирования возможно создания дополнительных базирующих элементов.

Обратимая структурная декомпозиция и трансформация позволяет сократить технологическое время на построение изделия и снизить себестоимость ее изготовления.

Рассмотрим пример построения изделия на установке SLA 5000, с помощью предложенного подхода. На рис. 3.29 представлена тестовая деталь – усеченная пирамида с отверстием и полуцилиндрическим пазом.

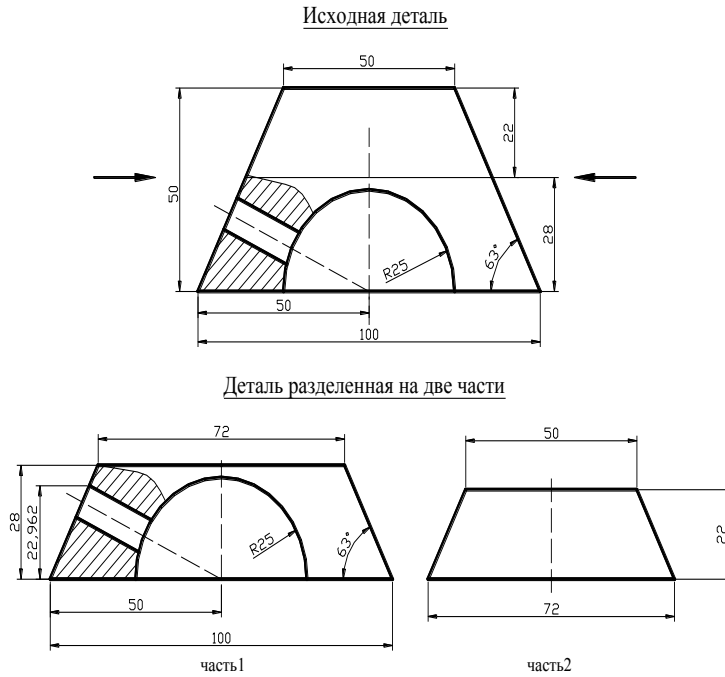


Рисунок 3.29 – Разделенная модель прототипа

Пирамида, изготавливаемая целиком, разделяется на 848 слоев. Согласно рис. 3.30, где представлен график зависимости величины перемещения стола от количества слоев, деталь разделяется на переходе поверхностей разных порядков. В данном случае это будут боковые наклонные поверхности и поверхность полуцилиндра. Разделение детали можно осуществить по плоскости на высоте  $22 \div 23$  мм рис. 3.29, нижнюю ее часть необходимо выполнить высотой не 25 мм, а  $25 + (2 \div 3)$  мм.

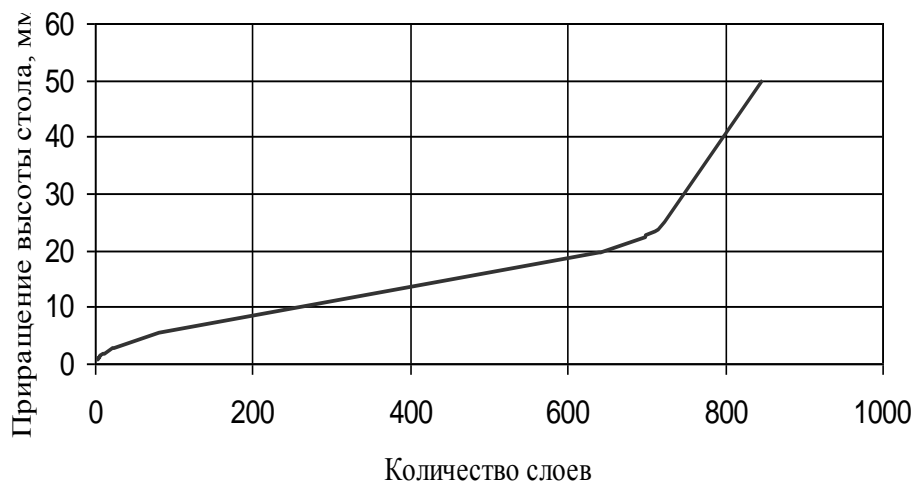
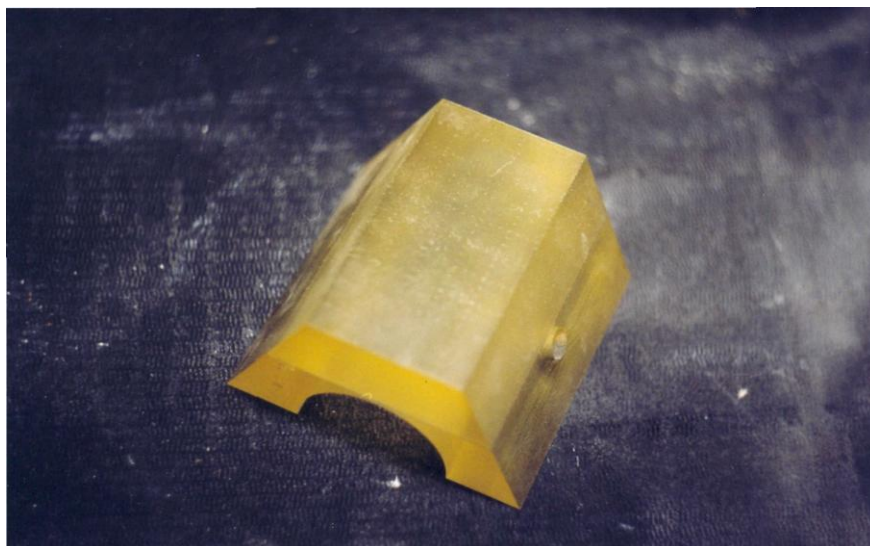
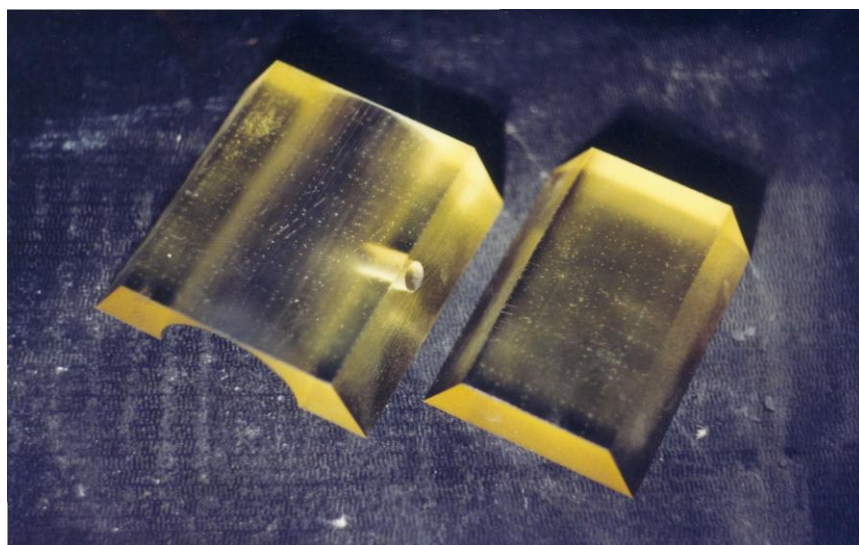


Рисунок 3.30 – График зависимости высоты стола от номера приращения

На рис. 3.31 представлена фотография изготовленной детали. В процессе изготовления тестовой пирамиды технологическое время уменьшилось на 20%.



*a*



*б*

Рисунок 3.31 – Построенная тестовая деталь:  
*a* – в сборе; *б* – разделенная на части по высоте

Применение обратимой декомпозиции и ориентации к рассмотренным тестовым деталям позволило сократить технологическое время на 15÷40%, и таким образом существенно снизить себестоимость изготовления деталей способом лазерной стереолитографии.

### **3.12 Качество и точность твердотельных изделий, изготовленных по генеративным технологиям**

Точность изготовления изделий макроуровня генеративным способом определяют аналитические и технологические погрешности процесса. Аналитические погрешности складываются из погрешностей послойного формообразования и погрешностей триангулируемой 3D CAD модели. Технологические погрешности связаны с изменением линейных и объемных характеристик наращиваемого материала в процессе его структурных изменений и погрешностями, вносимыми работой оборудования.

#### **3.12.1 Аналитические погрешности генеративных технологий макроуровня**

Большинство современных RP (Rapid Prototyping) CAD (Computer-Aided Design)/CAM (Computer-Aided Manufacturing)-систем автоматизированного проектирования и изготовления работают с фиксированным шагом на базе триангуляционной модели. Объемная модель аппроксимируется плоскими треугольниками, а затем модель рассекается семейством параллельных плоскостей. В результате получается группа контуров, которые берутся за основу для формирования траектории движения рабочего органа RP установки. Реализация подобного алгоритма достаточно отработана. Трехмерная электронная модель изделия является исходной для создания управляющих программ RP технологий. Для этого используются STL-файлы. Основное требование, предъявляемое к представлению объекта в STL-формате – это замкнутость поверхности и ее геометрическая однозначность (рис. 3.32). Степень приближения триангулированной модели к исходной 3D CAD проявляется в форме внешней погрешности, которую определяют параметры триангулирования.

Погрешность триангулирования (внешняя погрешность) зависит от количества аппроксимирующих треугольников. Требуемое число данных обратно пропорционально заданной точности приближения. Для достаточно сложных изделий с криволинейными поверхностями снижение внешней погрешности ведет к необходимости использования большого массива данных, что существенно увеличивает количество времени на

триангуляцию. При очень больших объемах данных алгоритмы могут становиться неустойчивыми.

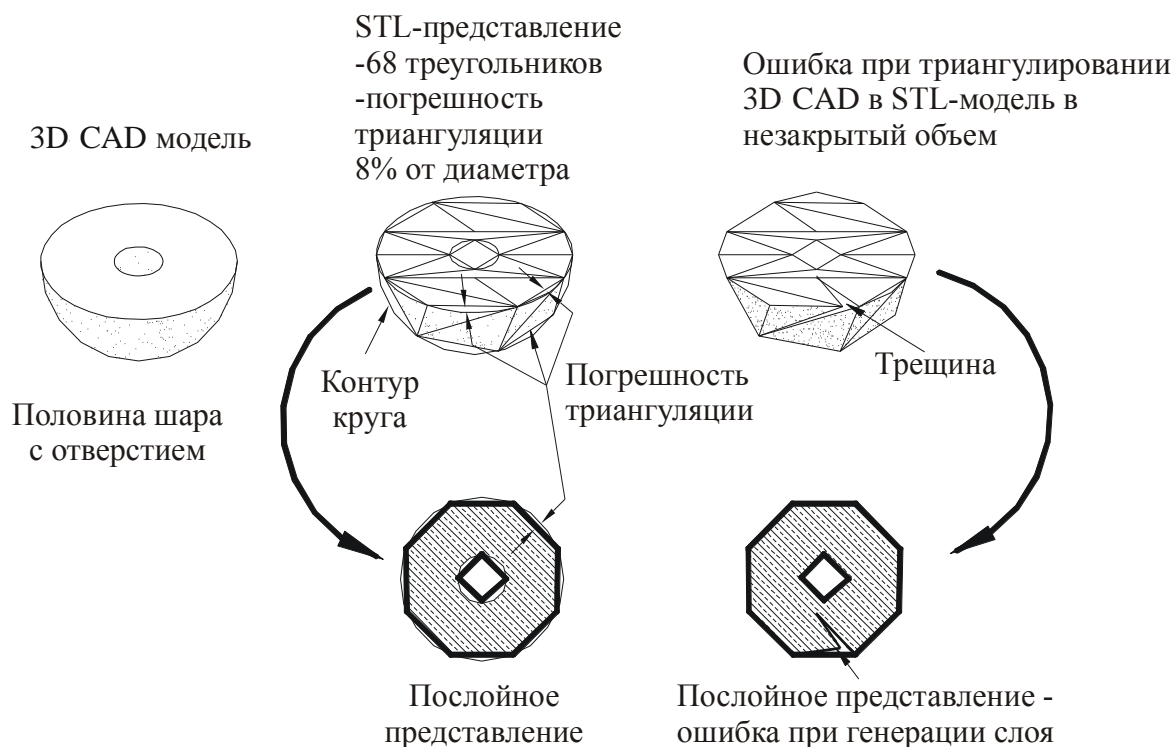


Рисунок 3.32 – Преобразование 3D CAD модели в STL-модель

Наличие незамкнутых или разрывных системообразующих поверхностей порождает несплошности объема изделия, что приводит к ошибке триангуляции (внутренняя или системная ошибка) при генерации твердотельных слоев (рис. 3.32).

Из ориентации нормального вектора разрезанного треугольника получается информация о расположении объема материала в данном слое. На этом основании при представлении геометрии модели в отдельных слоях будет сохраняться информация о внутреннем и внешнем контурах. Эти данные являются информацией для управления RP установкой. На рис. 3.32 показан пример генерации слоев детали по 3D CAD модели. Величина треугольников определяет ошибку триангулирования – отклонение STL-представления от номинального профиля. Она может быть снижена за счет увеличения числа треугольников, что не представляет значительных трудностей при существующих компьютерных средствах и эффективных способах проверки самого процесса триангуляции. В отдельных случаях возникает погрешность STL-модели,



как, например, “трещина” между гранями треугольника, которая приводит к ошибке при создании управляющей программы.

По экспериментальным данным фирмы 3D Systems проведен анализ величины внешней погрешности при переходе от трехмерной CAD модели к STL-файлу в зависимости от геометрических характеристик элементов изделий. Анализировались элементы, которые описываются поверхностями первого и второго порядка, имеющие осевую симметрию, а также несимметричными поверхностями второго порядка. На рис. 3.33 представлены трехмерные изображения этих элементов: 1 – усеченная пирамида (поверхность первого порядка); 2 – ступенчатая подставка (поверхность первого порядка); 3 – полуэллипсоид (поверхность второго порядка с осью симметрии); 4 – корпус (поверхность второго порядка, не имеющая оси симметрии). В процессе исследований установлено, что STL-поверхности второго порядка описываются почти на два порядка большим количеством треугольников, но при этом может быть получена погрешность менее 0,01 мм. Отдельную проблему могут составить лишь поверхности второго порядка, не имеющие центра симметрии, так как триангулирование этих поверхностей значительно увеличивает массив данных.

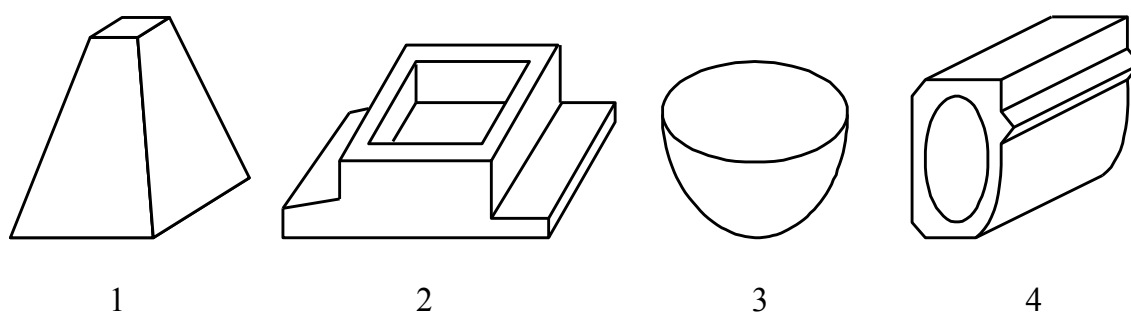


Рисунок 3.33 – Трехмерное изображение тестируемых деталей:

- 1 – усеченная пирамида (поверхность первого порядка);
- 2 – ступенчатая подставка (поверхность первого порядка);
- 3 – полуэллипсоид (поверхность второго порядка с осью симметрии);
- 4 – корпус (поверхность второго порядка, не имеющая оси симметрии)

*Погрешность триангулирования для поверхностей первого порядка представляет собой избыточный слой полимера в RP модели, которая всегда имеет ступенчатую форму (рис. 3.34). RP модель всегда изготавливается с положительным допуском для наружных поверхностей, т. к. необходима последующая доработка, которая обеспечит сглаживание ступенек поверхности детали.*

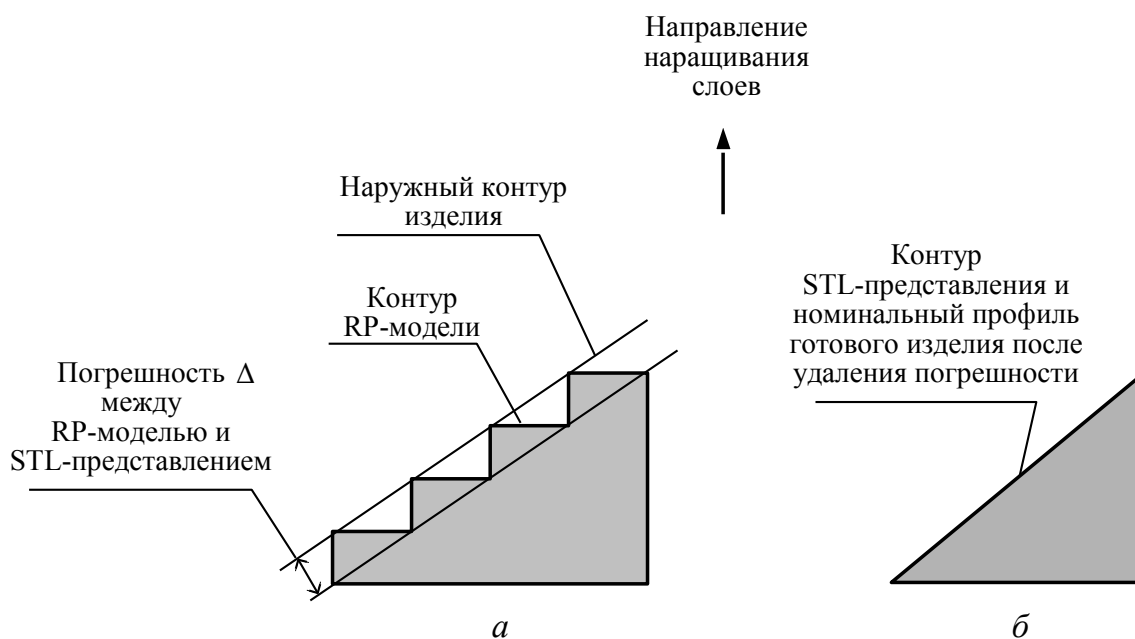


Рисунок 3.34– Расхождения между STL-представлением изделия и RP-моделью: *a* – действительное; *б* – требуемое.

### 3.12.2 Погрешность формообразования

При использовании генеративных технологий детали строятся дискретно по слоям на подвижной платформе установки, которая в исходном положении находится под поверхностью исходного материала (жидкого фотомономера – лазерная стереолитография, порошок – избирательное лазерное спекание) на глубине  $0,025 \div 0,2$  мм. При минимальном шаге перемещения платформы по оси *Z* погрешность также минимальна, но время построения увеличивается, что вызывает увеличение себестоимости изготовления. Использование максимально возможного шага построения может привести к погрешностям, превышающим установленный уровень. Следовательно, необходимо рассмотреть возможность регулирования шага построения, определяющего толщину наращиваемого слоя.

*Погрешность формообразования при использовании генеративных технологий макроуровня можно рассматривать как избыточную часть исходного материала, находящегося на номинальной поверхности изделия вследствие технологических особенностей процесса послойного выращивания.*

*В общем случае погрешность формообразования представляет собой сумму компонент геометрической и случайной погрешностей.*

При рассмотрении вопроса целесообразности формирования деталей слоями различной толщины будем учитывать только *геометрическую составляющую погрешности, называя ее в дальнейшем погрешностью формообразования.*

Из литературы известно, что погрешность формообразования определяется в первую очередь толщиной наращиваемого слоя  $h_c$  и геометрическими характеристиками поверхности детали, обобщенно характеризуемыми углом между точками поверхности и осью  $Z$  (вектором наращивания). Поскольку реальные детали, создаваемые генеративными технологиями, представляют собой достаточно сложные композиции геометрических элементов, то для дальнейшего рассмотрения необходимо выбрать тестовый образец, отвечающий задачам исследования. *Тестовый образец должен отвечать следующим основным требованиям: иметь аналитическое описание поверхности в доступной для анализа форме; углы между касательной к боковой поверхности и осью  $Z$  должны соответствовать области существования для всего множества реальных деталей ( $\pm 90^\circ$ ); размеры образца должны позволять проводить визуализацию технологического процесса формообразования и элементов погрешности с реальным соотношением размеров.* Сформулированным требованиям в полной мере отвечает полусфера единичного радиуса с осью, совпадающей с  $Z$ . Поскольку полусфера является телом вращения, то при визуализации будем рассматривать только ее образующую.

Образующая полусферы в цилиндрической системе координат с центром в начале координат определяется следующим уравнением:

$$r = f(z, R) = \pm \sqrt{R^2 - z^2}; 0 \leq z \leq R, \quad (3.6)$$

где  $r, z, R$  - соответственно радиус образующей в плоскости, перпендикулярной оси  $Z$ , координата по оси  $Z$  и радиус полусферы.

На рис. 3.35 представлены примеры формирования полусферы единичного радиуса слоями постоянной толщины  $h_c$  при ее послойном выращивании. Толщины слоев  $h_c = 0,025, 0,1, 0,2$  мм соответствуют минимальному, базовому и максимальному значениям. На совмещенном рис. 3.35 можно видеть основные тенденции формирования погрешности формообразования – ее значения возрастают при увеличении толщин наращиваемых слоев и угла между касательной и осью  $Z$ .

Для продолжения анализа рассмотрим геометрические элементы погрешности формообразования.

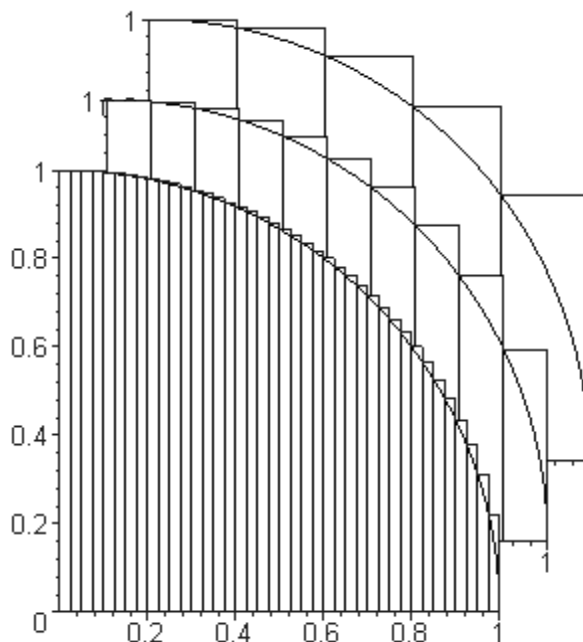


Рисунок 3.35 – Примеры формирования полусферы единичного радиуса слоями постоянной толщины  $h_C$  при послойном выращивании генеративными технологиями

### 3.12.3 Элементы погрешности формообразования

Расчетная схема определения параметров погрешности формирования единичного слоя генеративным способом представлена на рис. 3.36. Для упрощения дальнейших рассуждений будем рассматривать формообразование тестовой полусферы в цилиндрической системе координат  $r = f(z)$ .

Рассмотрим формирование  $i$ -го слоя детали с толщиной наращиваемого слоя  $h_C$ . Нижняя плоскость слоя соответствует координате  $z_{i-1}$ , верхняя -  $z_i = z_{i-1} + h_C$ . Пересечение нижней плоскости наращиваемого слоя с поверхностью детали  $r = f(z)$  происходит в точке  $A$  ( $r_{i-1} = r_{i-1}^*$ ). Пересечение верхней плоскости слоя с поверхностью детали может происходить в точках  $B$

$(r_i, 0 > \delta = \overline{CB})$  или  $B^* (r_i^*, 0 < \delta = \overline{CB^*})$  в зависимости от знака приращения границ наращиваемого слоя  $f(z_{i-1} + h_C) - f(z_{i-1})$ .

Определим следующие элементы сечения наращиваемого слоя и технологической погрешности формообразования:

- линейная модель сечения поверхности детали  $\overline{AB}$  ( $\delta < 0$ ),  $\overline{AB^*}$  ( $\delta > 0$ );
- угол между касательной к поверхности детали (ее линейной моделью в сечении) и осью Z:  $\alpha = \angle CAB$  ( $\alpha < 0, \delta < 0$ ),  $\alpha = \angle CAB^*$  ( $\alpha > 0, \delta > 0$ );

- линейная модель сечения боковой поверхности наращиваемого слоя  $\overline{CB}$  ( $\delta < 0$ ),  $\overline{C^*B^*}$  ( $\delta > 0$ ), в общем случае граница слоя определяется через приращение на толщине  $h_C$ ,  $r_C = r_{i-1} - \delta$ ;

- площадь сечения избыточного слоя полимера  $S_\Delta$  определяется  $\square ABC$  ( $\delta < 0$ ) и  $\square AB^*C^*$  ( $\delta > 0$ );

- погрешность формообразования  $\Delta$  (наибольшая величина сечения избыточного слоя исходного материала, измеряемая по нормали к линейной модели сечения поверхности детали)  $\Delta = \overline{CD}$  ( $\delta < 0$ ),  $\Delta = \overline{C^*D^*}$  ( $\delta > 0$ );

- шаг погрешности формообразования  $L_\Delta$  (основание  $\square ABC$ ,  $\square AB^*C^*$ , равное длине линейной модели сечения поверхности детали)  $\overline{AB}$  ( $\delta < 0$ ),  $\overline{AB^*}$  ( $\delta > 0$ );

- длина затылочной  $l_\Delta$  и фронтальной частей погрешности формообразования  $\overline{AD}$ ,  $\overline{DB}$  ( $\delta < 0$ );  $\overline{AD^*}$ ,  $\overline{D^*B^*}$  ( $\delta > 0$ ).

### 3.12.4 Параметризация элементов погрешности

Анализ расчетной схемы (рис. 3.36) показывает, что основным и необходимым технологическим параметром, определяющим значения элементов погрешности формообразования, является толщина наращиваемого слоя  $h_C$ . Следующими по значимости и достаточными для описания являются конкурирующие между собой параметры, зависящие от функционального описания поверхности детали:  $\delta = f(z, h_C)$  - приращение границ детали на толщине слоя  $h_C$  и  $\alpha = f(z, h_C)$  - угол между касательной к поверхности детали и осью Z. В свою очередь эти параметры носят взаимозависимый характер:  $\alpha = f(h_C, \delta)$ ,  $\delta = f(h_C, \alpha)$ .

Какому из этих параметров ( $\alpha, \delta$ ) отдать предпочтение при описании элементов погрешности формообразования, заранее определить затруднительно, поэтому будем рассматривать оба возможных варианта.

Рассмотрим параметры, элементы погрешности формообразования, их взаимосвязь и области допустимых значений при послойном выращивании деталей генеративными технологиями макроуровня (расчетная схема представлена на рис. 3.36).

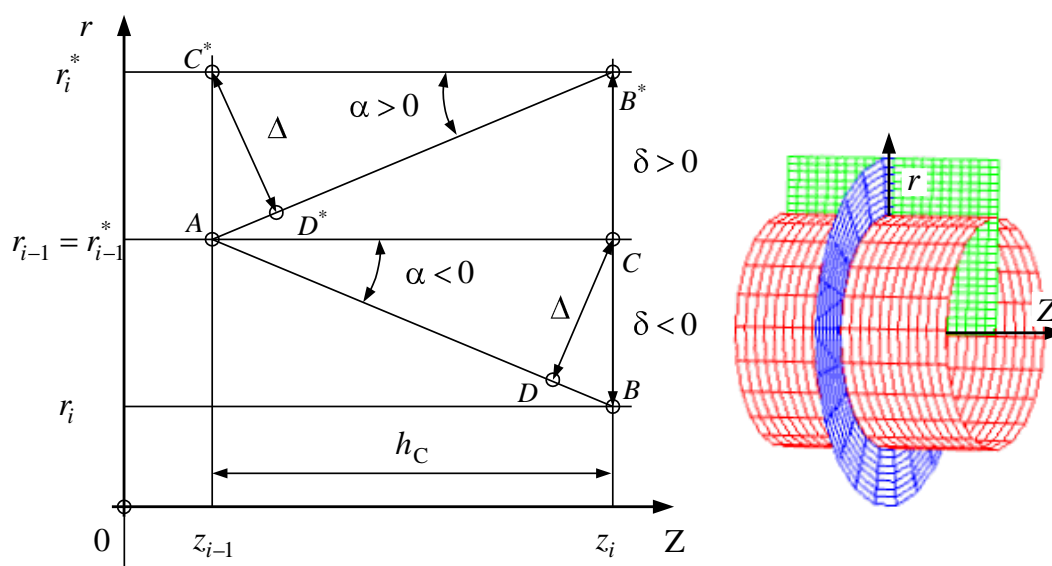


Рисунок 3.36 – Расчетная схема определения параметров погрешности формирования единичного слоя.

Условные обозначения:  $h_C$  - толщина слоя;

$\delta = \overline{CB} = \overline{C^*B^*}$  - приращение границ детали на толщине слоя;

$\alpha$  - угол наклона поверхности детали;

$\Delta = \overline{CD} = \overline{C^*D^*}$  - погрешность формообразования;

$L_\Delta = \overline{AB} = \overline{A^*B^*}$  - шаг погрешности формообразования;

$l_\Delta = \overline{AD} = \overline{A^*D^*}$  - длина затылочной части погрешности формообразования;

$\square ABC = \square A^*B^*C^*$  - площадь сечения избыточного слоя

*Толщина наращиваемого слоя.* Толщина наращиваемого слоя  $h_C$  задается дискретными значениями от  $h_{C(\min)}$  до  $h_{C(\max)}$  с дискретностью  $h_{C(\text{disc})}$ . Для дальнейшего анализа использовались следующие значения:  $h_{C(\min)} = h_{C(\text{disc})} = 0,025$  мм,  $h_{C(\max)} = 0,2$  мм.

*Угол  $\alpha$*  Как технологический параметр  $\alpha$  определяется следующей зависимостью:

$$\alpha = \operatorname{arctg}\left(\frac{\delta}{h_C}\right); -\frac{\pi}{2} \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}, \quad (3.7)$$

где предельные значения  $\alpha = \pm\pi/2 = \pm 90^\circ$  соответствуют поверхностям детали, перпендикулярным оси  $Z$ , а  $\alpha = 0$  - поверхностям с образующими, параллельными оси  $Z$ .

Как характеристика аналитически заданной поверхности (тестовый пример - полусфера в цилиндрической системе координат (3.6)  $\alpha$  представляет собой угол наклона касательной к поверхности детали и определяется через первую производную уравнения поверхности:

$$\frac{dr}{dz} = \frac{d}{dz} \pm \sqrt{R^2 - z^2} = \mp \frac{z}{\sqrt{R^2 - z^2}}; 0 \leq z \leq R, \quad (3.8)$$

т. к. в технологическом плане нас интересуют только абсолютные значения  $\alpha$ , то окончательно имеем:

$$\alpha = \operatorname{arctg}\left(\frac{z}{\sqrt{R^2 - z^2}}\right); 0 \leq z \leq R, \quad (3.9)$$

где обозначения соответствуют (3.6).

*Приращение границ детали на толщине наращиваемого слоя.* Приращение границ детали определяется следующими зависимостями:

$$\delta = f(z_i) - f(z_i - h_C) = h_C \operatorname{tg} \alpha, \quad (3.10)$$

где  $z_i$  - соответственно координата верхней границы  $i$ -го наращиваемого слоя толщиной  $h_C$ .

Область существования значений  $\delta = f(h_C, \alpha)$  определяется (3.10) при  $\alpha \rightarrow \pm 90^\circ$ ,  $\delta \rightarrow \pm \infty$ , эта математическая ситуация имеет место для поверхностей, перпендикулярных оси  $Z$ . Из технологических ограничений можно считать, что в таком случае  $\delta \rightarrow \pm \delta_{\max}$ , где  $\delta_{\max}$  - максимальный линейный размер торцового участка детали. Случай, когда  $\alpha \rightarrow 0^\circ$ ,  $\delta \rightarrow 0$ , соответствует цилиндрическим участкам поверхности детали.

*Погрешность формообразования.* Погрешность формообразования представляет собой высоту сечений избыточного слоя ( $\square ABC$ ,  $\square AB^*C^*$ ) и является заведомо положительной величиной, тогда с учетом соотношений ( $\overline{CD} \perp \overline{AB}$ ,  $\overline{C^*D^*} \perp \overline{AB^*}$ ,  $\square CAB = \square C^*B^*A = \alpha$ ) имеем:

$$\Delta = h_C \sin|\alpha| = |\delta| / \sqrt{1 + \left(\frac{\delta}{h_C}\right)^2}; 0 \leq \Delta \leq h_C. \quad (3.11)$$

Принципиально важным выводом из анализа уравнения (3.11) является диапазон значений погрешности формообразования с верхней границей, не превышающей значения толщины наращиваемого слоя при любой форме участков поверхности детали:

$$\Delta_{\max} = \lim_{\alpha \rightarrow \pm \frac{\pi}{2}} \Delta(h_C, \alpha) = \lim_{\delta \rightarrow \pm \infty} \Delta(h_C, \delta) = h_C. \quad (3.12)$$

Визуализация влияния толщины наращиваемого слоя  $h_C$  и угла  $\alpha$  на погрешность формообразования детали  $\Delta$  способом лазерной стереолитографии представлено на рис. 3.37.

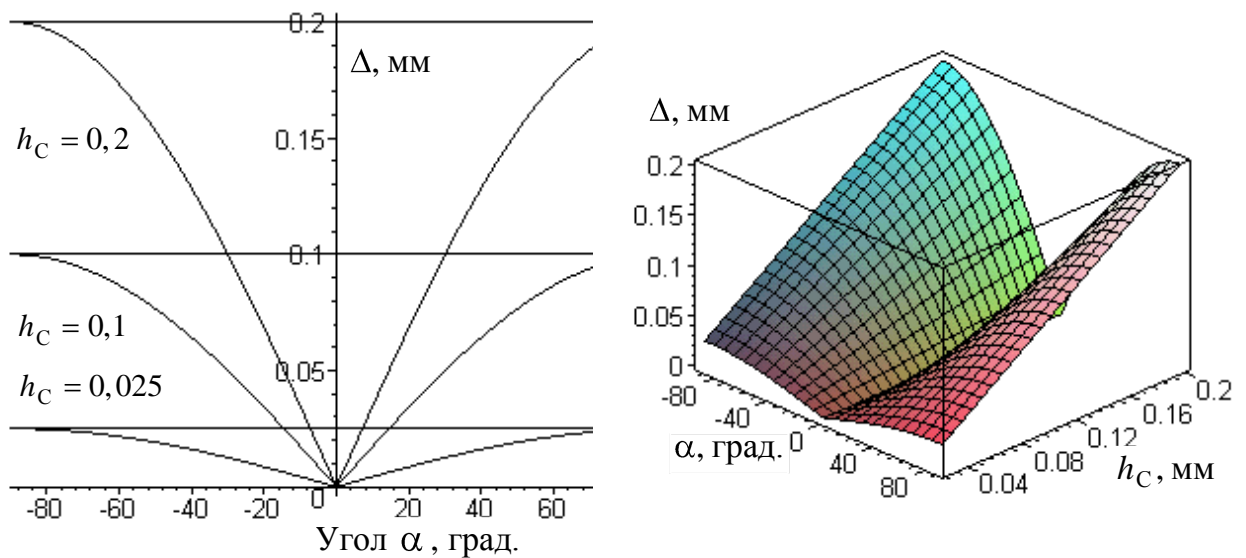


Рисунок 3.37 – Влияние толщины наращиваемого слоя  $h_C$  и угла  $\alpha$  на погрешность формообразования детали  $\Delta = h_C \sin|\alpha|$

*Шаг погрешности формообразования.* Представляет собой основание треугольного сечения избыточного слоя исходного материала ( $\square ABC$ ,  $\square AB^*C^*$ ) и является положительной величиной:

$$L_\Delta = \frac{h_C}{\cos \alpha} = \sqrt{h_C^2 + \delta^2}, \quad (3.13)$$

где при  $\alpha = 0$ ,  $L_\Delta = h_C$ ;  $\alpha \rightarrow \pm \pi/2$ ,  $L_\Delta \rightarrow \infty \cong \delta_{\max}$ .



Визуализация влияния толщины наращиваемого слоя  $h_C$  и угла  $\alpha$  на шаг погрешности формообразования детали  $L_\Delta$  генеративными технологиями макроуровня представлено на рис. 3.38.

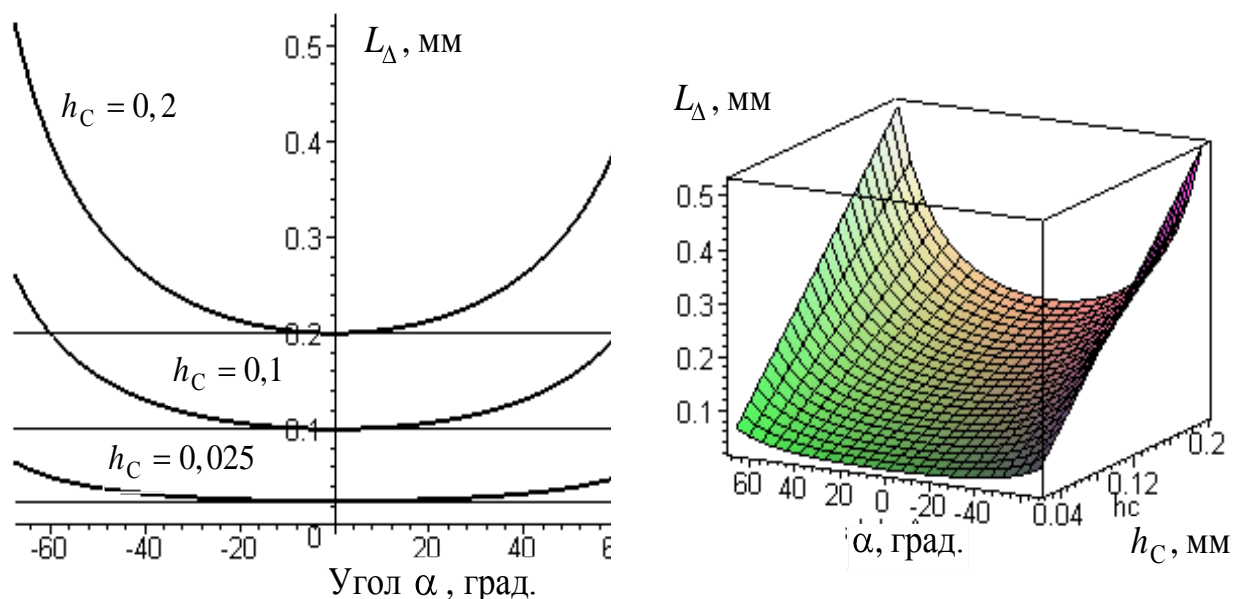


Рисунок 3.38 – Влияние толщины наращиваемого слоя  $h_C$

и угла  $\alpha$  на шаг погрешности формообразования детали  $L_\Delta = \frac{h_C}{\cos \alpha}$

*Длина затылочной части погрешности формообразования.* Представляет собой расстояние ( $\overline{AD}$ ,  $\alpha < 0$ ;  $\overline{AD}^*$ ,  $0 < \alpha$ ;  $\overline{AC}$ ,  $\alpha = 0$ ) и определяется следующими зависимостями:

$$l_\Delta = f(h_C, \alpha) = h_C \left( \frac{1}{\cos \alpha} - \cos \alpha \right), \text{ если } 0 \leq \alpha; \text{ иначе, } h_C \cos \alpha, \quad (3.14)$$

где при  $\alpha \rightarrow -\pi/2$ ,  $L_\Delta \rightarrow 0$ ;  $\alpha = 0$ ,  $l_\Delta = h_C$ ;  $\alpha \rightarrow \pi/2$ ,  $L_\Delta \rightarrow \infty \cong \delta_{\max}$ .

$$l_\Delta = f(h_C, \delta) = \frac{\delta^2}{h_C \sqrt{\delta/h_C^2}}, \text{ если } 0 \leq \alpha; \text{ иначе, } \frac{h_C}{\sqrt{\delta/h_C^2}}, \quad (3.15)$$

где области существования аналогичны (3.14).

Визуализация влияния толщины наращиваемого слоя  $h_C$  и угла  $\alpha$  на длину затылочной части погрешности формообразования детали  $l_\Delta$  генеративными технологиями представлена на рис. 3.39.

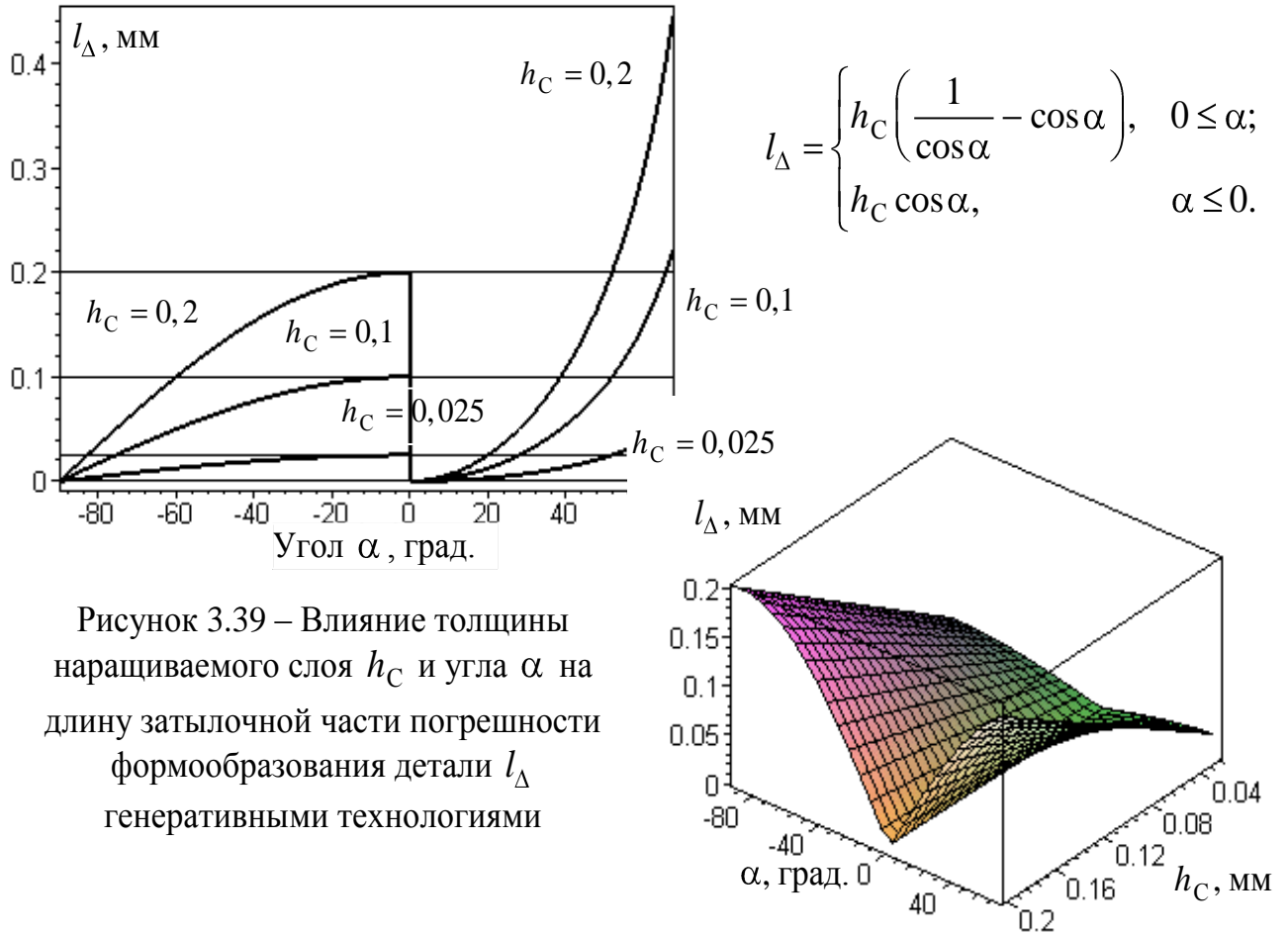


Рисунок 3.39 – Влияние толщины наращиваемого слоя  $h_C$  и угла  $\alpha$  на длину затылочной части погрешности формообразования детали  $l_\Delta$  генеративными технологиями

*Площадь сечения избыточного слоя наращиваемого материала.* Представляет собой площадь ( $VABC = VAB^*C^*$ ):

$$S_\Delta = \frac{1}{2} h_C^2 \operatorname{tg} |\alpha| = \frac{1}{2} h_C |\delta| \quad (3.16)$$

Визуализация влияния толщины наращиваемого слоя  $h_C$  и угла  $\alpha$  на площадь сечения избыточного слоя погрешности формообразования детали  $S_\Delta$  генеративными технологиями представлена на рис. 3.40.

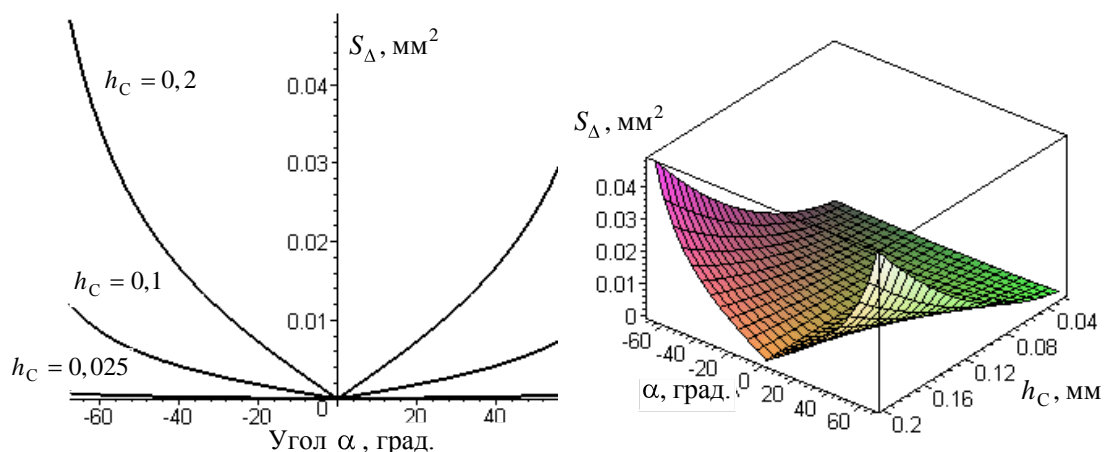


Рисунок 3.40 – Влияние толщины наращиваемого слоя  $h_C$  и угла  $\alpha$  на площадь

избыточного слоя погрешности формообразования детали  $S_{\Delta} = \frac{1}{2} h_C^2 \text{tg}|\alpha|$

генеративными технологиями

*Профилограммы поверхности детали.* Проведенная параметризация элементов погрешности формообразования генеративных технологий позволяет перейти к профилограммам поверхности детали.

На рис. 3.41 представлены профилограммы погрешности формообразования генеративными технологиями (развертка) по образующей тестовой полусферы единичного радиуса: а) совмещенная для толщин слоев  $h_C = 0,2, 0,1, 0,025$  (без обеспечения пропорций); б) совмещенная для толщин слоев  $h_C = 0,2, 0,1, 0,025$  (с обеспечением пропорций); в, г, д) соответственно для отдельных значений толщин наращиваемых слоев  $h_C = 0,2, 0,1, 0,025$  (с обеспечением пропорций).

Анализ полученных профилограмм подтверждает правильность аналитических расчетных зависимостей (3.7) – (3.15) и тезис об определяющем влиянии толщины наращиваемого слоя  $h_C$  на значения элементов погрешности формообразования. Результаты параметризации позволяют перейти к рассмотрению возможности оптимизации толщины слоев по критерию заданной точности формообразования.

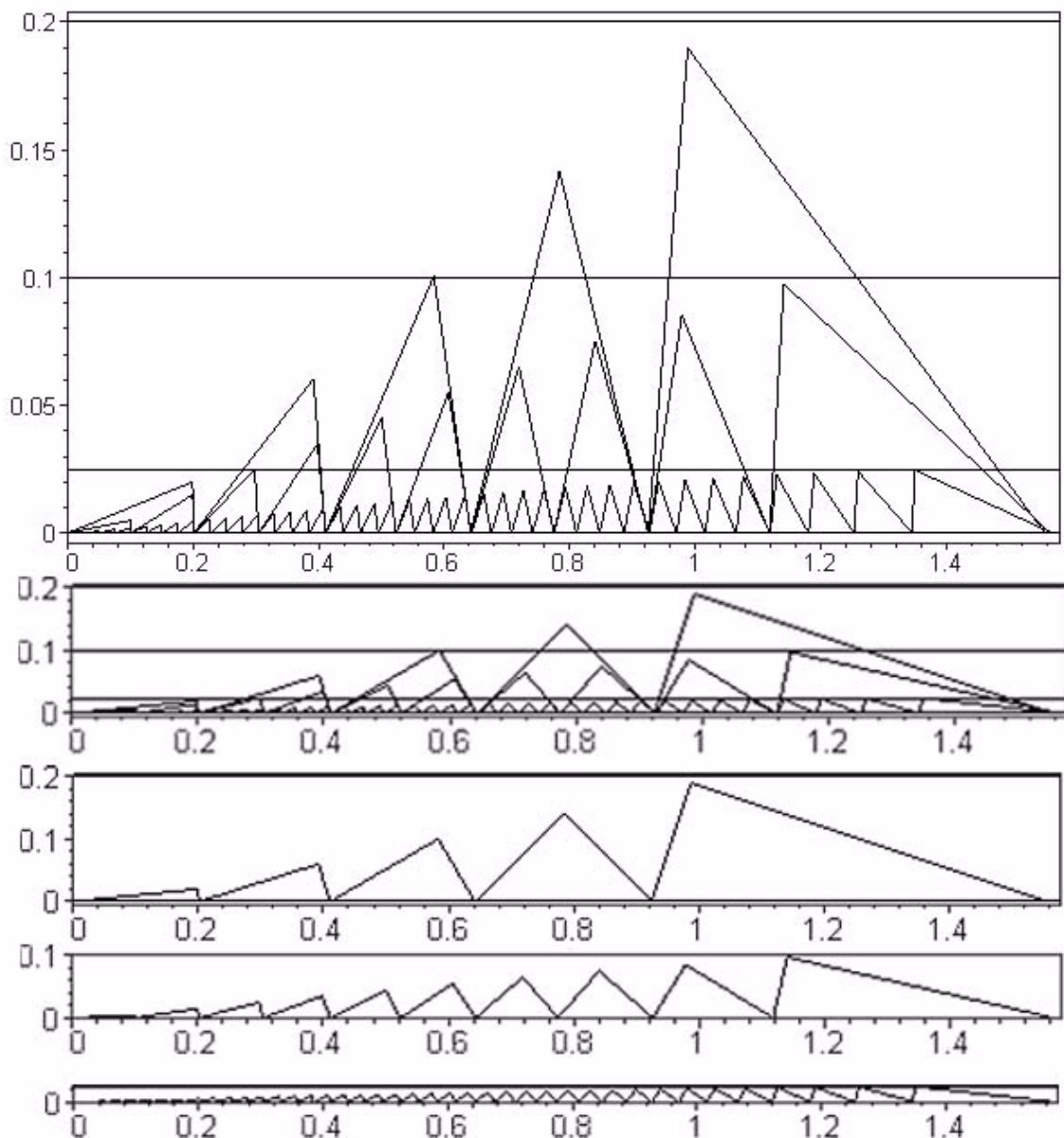


Рисунок 3.41 – Профилограммы погрешности формообразования генеративными технологиями (развертка) по образующей тестовой полусферы единичного радиуса: а) совмещенная для толщин слоев  $h_C = 0,2, 0,1, 0,025$  (без обеспечения пропорций); б) совмещенная для толщин слоев  $h_C = 0,2, 0,1, 0,025$  (с обеспечением пропорций); в, г, д) соответственно для отдельных значений толщин наращиваемого слоя  $h_C = 0,2, 0,1, 0,025$  (с обеспечением пропорций)

### 3.12.5 Оптимизация толщин наращиваемых слоев

Расчетные значения толщин наращиваемых слоев можно определять на базе решения уравнения (3.11) относительно  $h_C$  :

$$h_{C(\text{расч})} = \frac{\Delta_{\text{зад}}}{\sin|\alpha|}, \quad (3.17)$$

где  $\Delta_{\text{зад}}$  – заданное значение погрешности формообразования;  $\alpha$  - угол между касательной к поверхности детали (ее линейной моделью в сечении) и осью Z.

Рассмотрим области допустимых значений технологических параметров, входящих в уравнение (3.17). Угол  $\alpha$  находится в интервале  $90^\circ \div -90^\circ$ . Заданное значение погрешности формообразования  $\Delta_{\text{зад}}$  должно выбираться с учетом ранее сделанного вывода из анализа уравнения (3.11) – *верхняя граница значений погрешности не может превышать толщину наращиваемого слоя при любой форме участков поверхности детали. Расчетные значения толщин наращиваемых слоев должны ограничиваться технологическими возможностями установок генеративных технологий макроуровня* и для рассматриваемого случая лежат в интервале  $h_C = 0,025 \div 0,2$  мм.

Влияние угла  $\alpha$  на допустимые расчетные значения толщины наращиваемого слоя  $h_{C(\text{расч})}$  для заданных значений погрешности формообразования  $\Delta_{\text{зад}} = 0,025, 0,05, 0,1, 0,2$  мм представлено на рис. 3.42.

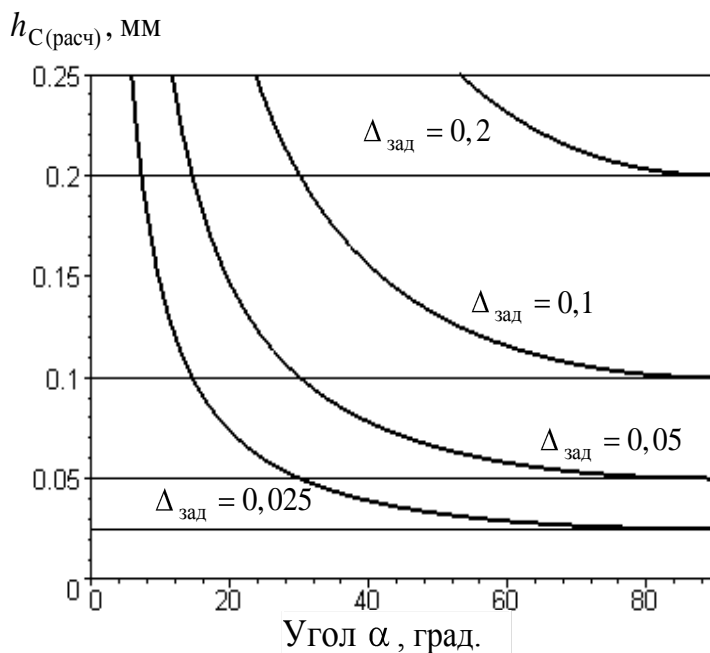


Рисунок 3.42 – Влияние угла  $\alpha$  на допустимые расчетные значения толщины наращиваемого слоя  $h_{C(\text{расч})}$  для заданных значений погрешности формообразования  $\Delta_{\text{зад}}$

На рис. 3.43 представлена трехмерная визуализация соотношений (3.17).

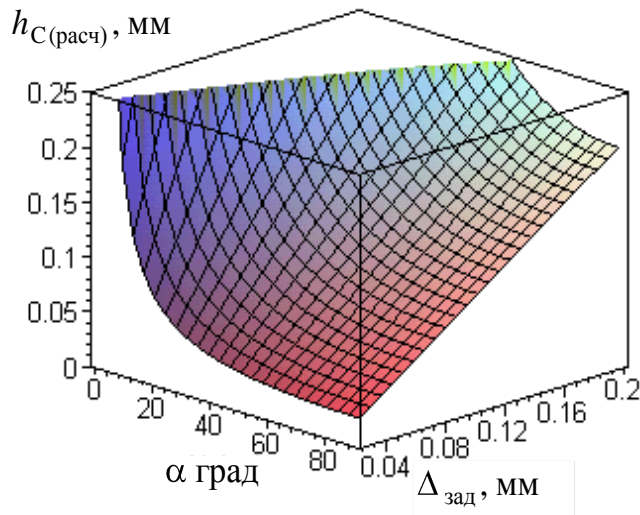


Рисунок. 3.43 – Влияние угла  $\alpha$  и заданного значения погрешности формообразования  $\Delta_{\text{зад}}$  на допустимые расчетные значения толщины наращиваемого слоя  $h_{C(\text{расч})}$

При оптимизации значений  $h_C$  по аналитическим моделям возникает необходимость перехода от непрерывных значений  $h_{C(\text{расч})}$  к дискретным. Переход от непрерывных расчетных значений толщины наращиваемого слоя к дискретным выполняется с использованием ступенчатой функции для рассматриваемого случая, имеющей следующий вид:

$$h_C = \begin{cases} h_{C(\text{min})}, & h_{C(\text{расч})} < h_{C(\text{min})}; \\ h_{C(\text{min})} + \left| \frac{h_{C(\text{расч})} - h_{C(\text{min})}}{h_{C(\text{step})}} \right| h_{C(\text{step})}, & h_{C(\text{min})} \leq h_{C(\text{расч})} \leq h_{C(\text{max})}; \\ h_{C(\text{max})}, & h_{C(\text{расч})} > h_{C(\text{max})}, \end{cases} \quad (3.18)$$

где  $h_{C(\text{min})}$ ,  $h_{C(\text{max})}$  – минимальное и максимальное допустимые значения толщины наращиваемого слоя;  $h_{C(\text{step})}$  – шаг дискретизации.

Визуализация функционального перехода от расчетных значений толщины наращиваемого слоя к дискретным технологическим значениям приведена на рис. 3.44.

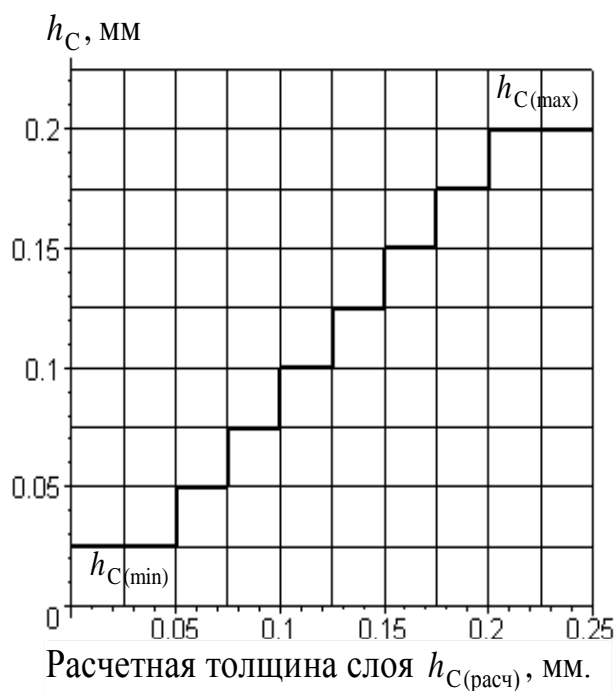


Рисунок 3.44 – Визуализация функционального перехода от расчетных значений толщины наращиваемого слоя к дискретным технологическим значениям

В общем случае оптимизация толщин слоев с ограничением по заданной погрешности формообразования производится по (3.17) с переходом к дискретным технологическим значениям по (3.18).

Зависимость допустимых расчетных  $h_{C(расч)}$  и дискретных значений толщины наращиваемого слоя  $h_C$  для заданных значений погрешности формообразования  $\Delta_{зад}$  при создании тестовой полусферы единичного радиуса представлена на рис. 3.45.

Анализ результатов расчетов показывает, что в зависимости от заданных значений погрешности формообразования  $\Delta_{зад}$  и интервала изменения угла  $\alpha$  можно существенно до  $h_{C(max)}/h_{C(min)} = 0,2/0,025 = 8$  раз увеличить значения толщины наращиваемого слоя  $h_C$  без потери точности. В свою очередь *увеличение значений толщины наращиваемого слоя  $h_C$  приводит к монотонному уменьшению технологического времени с относительным показателем степени влияния  $\cong -1,5$  (для способа лазерной стереолитографии)*. Тогда максимально возможное снижение технологического времени может доходить до  $h_{C(max)}/h_{C(min)}^{1,5} \cong 22$  раз.

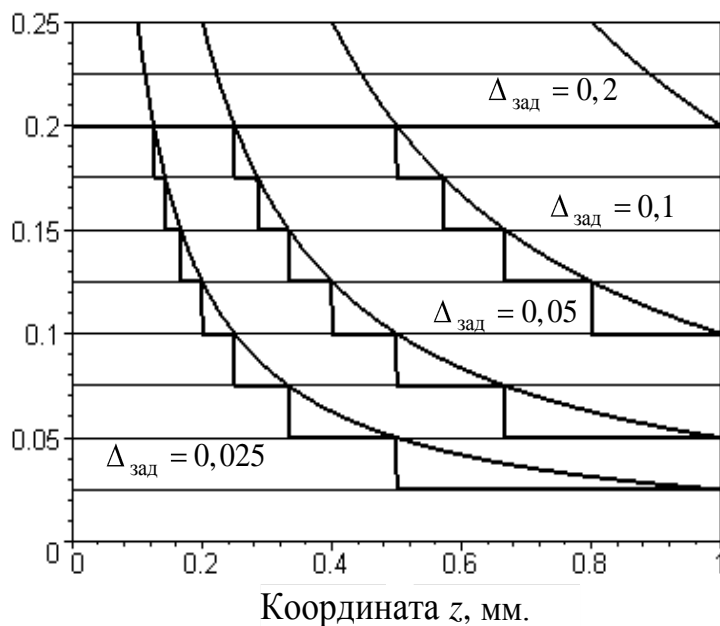


Рисунок 3.45 – Зависимость допустимых расчетных  $h_{C(расч)}$  и дискретных значений толщины наращиваемого слоя  $h_C$  для заданных значений погрешности формообразования  $\Delta_{зад}$  при создании тестовой полусферы единичного радиуса

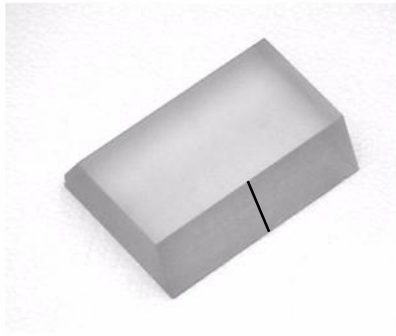
Одной из главных отличительных особенностей использования изменения толщин слоев является возможность регулирования точности по поверхности отдельных деталей и изделия в целом:

- обеспечение погрешности формообразования на заданном уровне, однородном по поверхности изделия;
- обеспечение различного уровня погрешности в заданных областях деталей или изделия в зависимости от их функционального назначения.

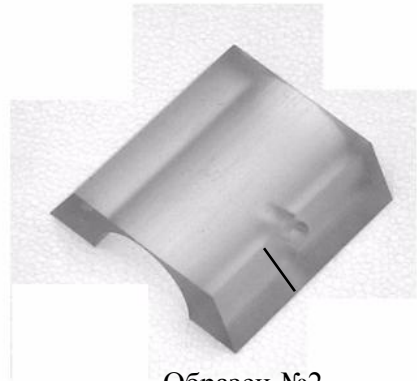
### 3.12.6 Сравнительная оценка качества поверхности изделий, изготовленных по генеративным технологиям

Качество поверхности исследовалось на деталях из фотомономера RPC Cure 300, представленных на рис. 3.46, с использованием прибора Surtronic 3+. Одновременно фиксировались следующие параметры шероховатости:  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_q$ ,  $R_{max}$ ,  $t_p$ ,  $S_m$ .

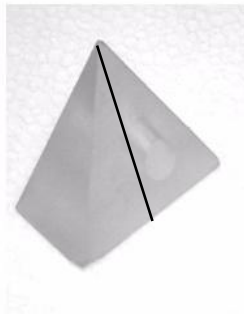




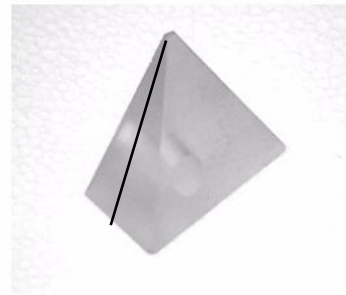
Образец №1



Образец №2



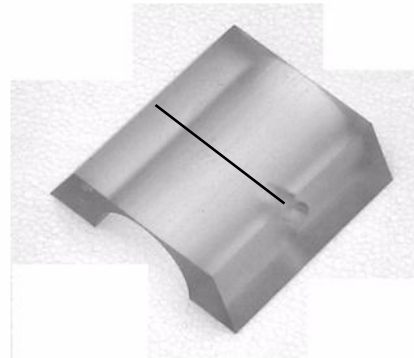
Образец №3



Образец №4



Образец №5



Образец №6



Образец №7

— Трасса замера шероховатости

Рисунок 3.46 – Тестовые детали для измерения шероховатости

Типичные профилограммы представлены на рис. 3.47 (численные средние арифметические значения параметров шероховатости определялись по пяти замерам). Измерения производились для следующих направлений движения иглы: перпендикулярно слоям – образцы № 1÷5, параллельно слоям – образцы № 6, 7. Для сопоставимости профилограмм независимо от направления движения иглы все измерения выполнялись при единых увеличениях по осям.

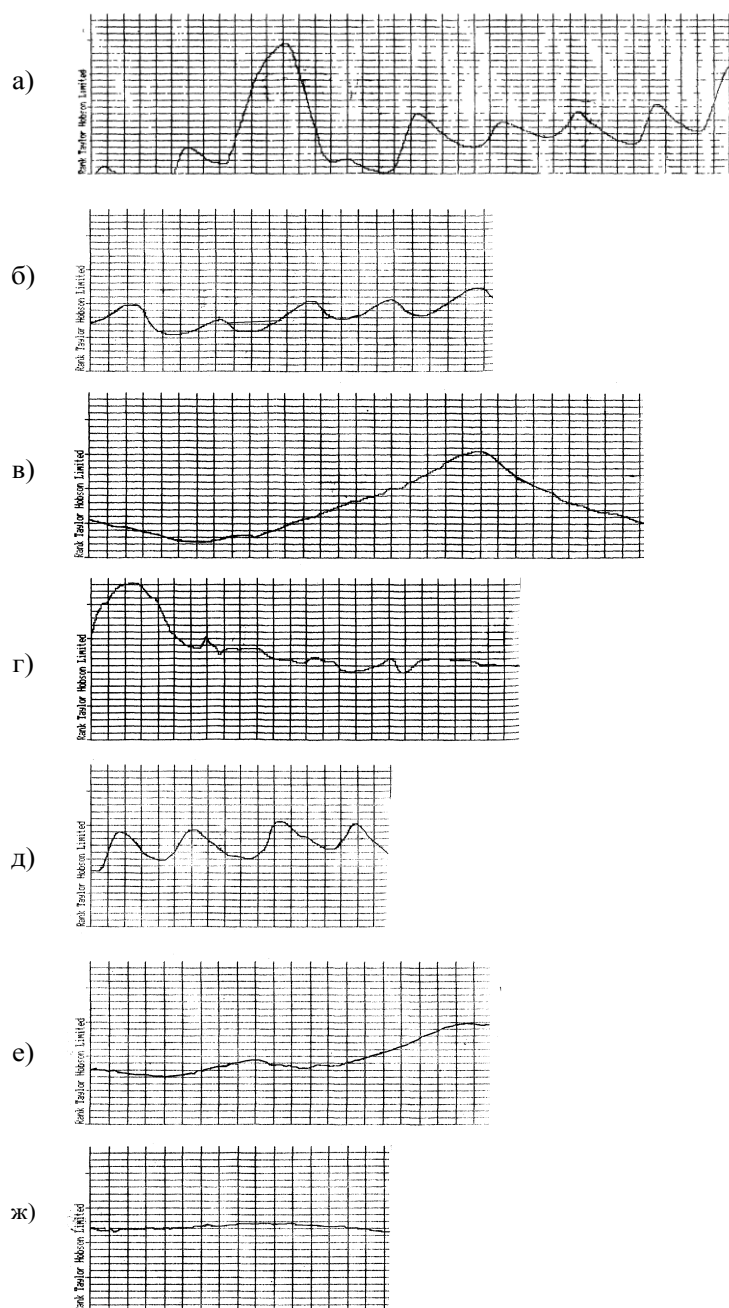


Рисунок 3.47 – Профилограммы поверхностей с образцов №№ 1-7 (рис. 3.46)

Анализ профилограмм образца № 1 (рис. 3.47а) свидетельствует о равномерном характере профиля со сравнительно небольшим разбросом высот микронеровностей. Вершины неровностей имеют округлую форму с достаточно большим радиусом округления. Профилограммы поверхности образца №2 (рис. 3.47б) свидетельствуют о высокой регулярности профиля: микронеровности мало отличаются друг от друга и по высоте и по расстоянию между их вершинами. Форма гребешков – округлая (не треугольная), выпуклая, что косвенно свидетельствует о достаточно высоком значении относительной опорной длины профиля во всех сечениях по его высоте.

На увеличенном изображении выступа высотой 60 мкм при шаге 40 мкм на его сторонах видны микронеровности высотой  $1 \div 2$  мкм образец № 3 (рис. 3.47в). На профилограмме поверхности образца № 4 (рис. 3.47г) равномерность профиля, наблюдавшаяся на образцах № 1 и № 2, отсутствует – сравнительно невысокие выступы чередуются с высокими.

Микрорельеф поверхности образца № 5 (рис. 3.47д) сформирован несимметричными векторами, ориентированными в одном направлении. Профиль регулярный с равномерным шагом 100 мкм, соответствующим шагу наращивания слоев. При контроле поверхности по схеме образцов № 6, 7 (рис. 3.48е, ж) направление движения щупа было перпендикулярно вектору наращивания, т. е. вдоль слоя. Регулярность профиля наружной поверхности отсутствует. Поверхность гладкая, профилограмма трансформируется почти в прямую линию, что свидетельствует о высоком качестве поверхности в направлении, перпендикулярном вектору наращивания генерируемых слоев.

По результатам проведенных исследований шероховатости поверхностей можно констатировать следующее. Шероховатость боковых поверхностей на всех образцах (рис. 3.47а-д) зависит от шага наращивания и находится в пределах  $R_a = 6 \div 13$  мкм и  $R_z = 38 \div 72$  мкм. Шероховатость в направлении, перпендикулярном вектору наращивания генерируемых слоев, не превышает  $R_a = 3,52$  мкм.

Следует отметить, что колебания высот микронеровностей в пределах базовых длин сравнительно невелики. Так, соотношение  $R_{\max} / R_z \approx 1,5 \div 2$ , что свидетельствует об отсутствии глубоких впадин или высоких выступов на исследованных поверхностях.

Независимо от того, является РРТМ изделие конечным продуктом или промежуточным (модель, прототип), вопросы точности и качества поверхности имеют важное значение для потребителя. Объективное

сравнение этих характеристик изделий, изготовленных по различным способам RP (SL, SLS, LOM, FDM и др.), затруднено, поскольку фирмы-производители мало в этом заинтересованы.

Естественно за базу сравнения принимают изделия, получаемые традиционными методами, например, фрезерованием, точением, шлифованием и т. д.

На рис. 3.48 приведены результаты измерения шероховатости поверхности по критерию  $R_a$  и  $R_z$  для способов SL, LOM, FDM. Поверхность полимерных изделий, полученных способом стереолитографии, имеет существенно более низкую шероховатость, чем после LOM и FDM, где она примерно одинакова. Важно, что SL поверхность по критерию  $R_z$  приближается, а по критерию  $R_a$  практически совпадает со значениями шероховатости после фрезерования и даже шлифования. Исходное состояние поверхности SL-модели  $R_a = 3,97$  мкм и  $R_z = 21,03$  мкм после доводки улучшается до  $R_a = 0,64$  мкм и  $R_z = 4,19$  мкм.

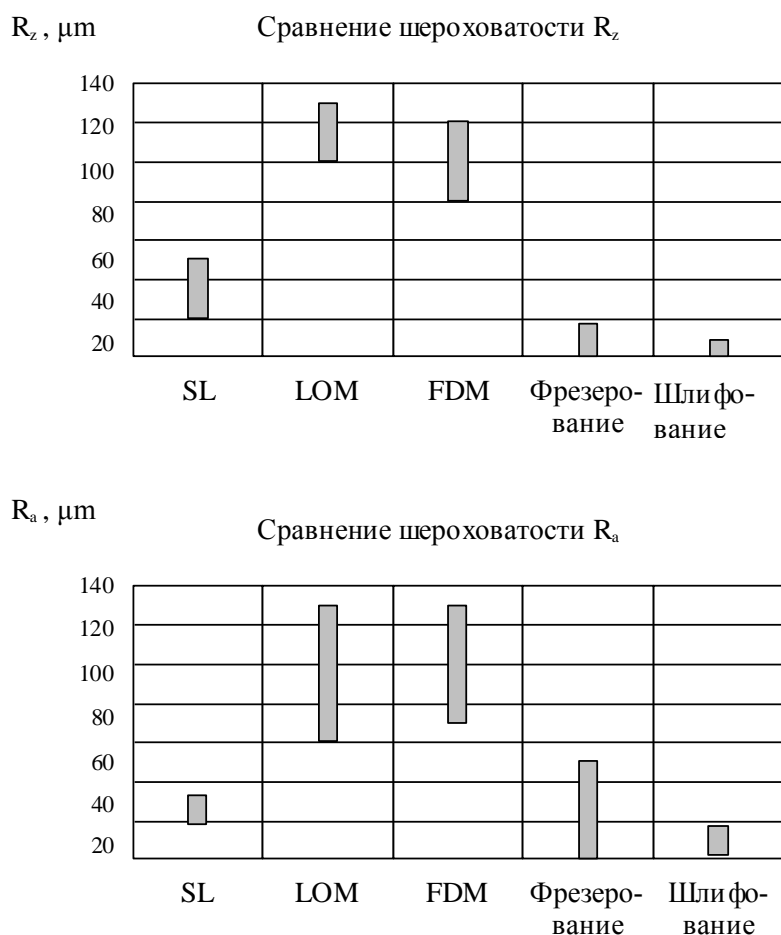


Рисунок 3.48 – Шероховатость поверхности после различных способов RP и обработки резанием

Свойства и структура эпоксидной смолы обуславливают технологичность пескоструйной обработки, полирования и окраски SL моделей, что обеспечивает их преимущество перед другими RP моделями при оценке дизайна, формы и сборки. Функциональные их свойства часто не позволяют выполнять тестирование, например, термостойкость не превышает 220°C, хотя доработкой и облагораживанием покрытиями износостойкость можно повысить в 3-5 раз, придать свойства электропроводности и др.

Хотя при использовании SLS и FDM показатели шероховатости существенно хуже, однако прочность, износостойкость, твердость и др. их качества позволяют производить функциональное тестирование и сборку, т. к. при SLS часто применяют полиамид, полистирол, металлы.

Для способа SLS в случае, когда размеры порошка составляют около 50 мкм, можно ожидать впадины глубиной до 25 мкм, что по критерию  $R_z$  соответствует 55 мкм. В действительности шероховатость таких поверхностей составляет  $R_z > 50$  мкм. По некоторым данным, способы формообразования по возрастанию шероховатости можно расположить в следующем ряду в диапазоне до  $\approx 100$  мкм:

$$R_{ZSLA-\Phi} \Rightarrow R_{ZSLA-C} \Rightarrow R_{ZMO} \Rightarrow R_{ZЭРО} \Rightarrow R_{ZSLS} \Rightarrow R_{ZFDM}, \quad (3.19)$$

где  $R_{ZSLA-\Phi}$  – шероховатость после стереолитографии с финишной доработкой;  $R_{ZSLA-C}$  – шероховатость после стереолитографии со стандартной обработкой;  $R_{ZMO}$  – шероховатость после механической обработки;  $R_{ZЭРО}$  – шероховатость поверхности после электроэрозионной обработки;  $R_{ZSLS}$  – шероховатость поверхности после селективного лазерного спекания;  $R_{ZFDM}$  – шероховатость поверхности после моделирования оплавлением.

Убедительное сравнение способов проведено в высшей школе специалистов Мангейма (ФРГ) К.Ю. Пешгесом (табл. 3.8) по таким показателям, как стоимость, качество, время изготовления, пригодность для точных изделий.

На основании имеющихся данных сегодня можно заключить, что способ стереолитографии среди большого разнообразия появившихся RP технологий обеспечивает наиболее высокую точность изделий и наименьшую шероховатость поверхностей.

Таблица 3.8 – Сравнение способов RP

Способы RP	Применение	Низкая стоимость	Наличие	Качество (размеры/ поверхность)	Время	Пригодность для точных пластиковых изделий	Пригодность для точных резиновых изделий	Общая оценка
Быстрое твердотельное литье (QSM)	RT	●	•	○	•	●	•	годны
3D Keltool	RT	○	•	•	○	●	•	годны
Селективное лазерное спекание (SLS)	RP RT	•	•	•	●	•	○	годны
Стереолитография (SL)	RP	•	●	○	●	●	●	годны
Вакуумное литье	RP (RT)	●	●	●	●	○	-	частично годны
Инжекционное литье металла (ИЕК)	RT	•	•	•	○	○	-	частично годны
Многоструйное моделирование (MJM)	RP	●	•	-	●	-	-	не годны
Производство ламинированного объекта (LOM)	RP	●	•	-	•	-	-	не годны
Моделирование плавкой – охлаждением (FDM)	RP	●	•	-	•	-	-	не годны

Примечание: ● очень хорошо; • хорошо; ○ удовлетворительно; - плохо.

### 3.13 Доработка изделий после послойного выращивания (постпроцессы)

После выращивания на установках SLA стереолитографическую модель и платформу помещают в моечную камеру с растворителем. Очистение от остаточной смолы и промывку специальным раствором необходимо проводить с предосторожностью во избежание внесения дефектов в твердотельную модель (изделие). Для ускорения сушки используется обдувка воздухом.

После ответственной операции – снятия выращенной модели с платформы – она помещается в камеру PCA 500 для окончательного отверждения.

«Невызревшая» модель (незавершенный процесс полимеризации в рабочем пространстве установки SLA 5000) помещается в среду равномерного ультрафиолетового освещения. Оптимальный режим (однородное отверждение по объему) обеспечивает минимизацию влияния полимеризации на точность созданного объекта. В зависимости от объема и конфигурации изделия окончательное отверждение обычно достигается за 1÷2 часа, для крупных – до 10 час.

В зависимости от решаемой задачи, например, для визуализации и концептуальной оценки, удаляются опоры, для снижения шероховатости поверхностей выполняется шлифование и полирование.

При выращивании прототипа избирательным лазерным спеканием (SLS) в зависимости от применяемого порошка используются различные способы завершающей обработки.

Для спеченных порошков из полиамидов применяется очистка изделия от порошка в вакуумной станции отрыва BOS, а затем обработка в пескоструйной камере для сглаживания неровностей на поверхности сложнопрофильных изделий. Дальнейшая дообработка сложных поверхностей осуществляется с помощью ручного электроинструмента.

Для композитного материала ST-100 (нержавеющая сталь-бронза) эффективной является пескоструйная обработка с последующим полированием.

Эти процедуры выполняются в том случае, когда того требуют результаты верификации моделей.

### **3.14 Верификация твердотельных изделий, их прототипов и моделей**

Возможность быстрого получения прототипа по генеративной технологии Rapid Prototyping позволяет на раннем этапе произвести верификацию модели, например, на этапе геометрического прототипа можно проверить его соответствие заданным параметрам. Эта процедура выполняется в следующей последовательности:

- создание 3D CAD модели - электронного образа прототипа;
- построение твердотельного прототипа по идеологии RPM на установке SLA или SLS;
- контроль RPM изделия (прототипа) на предмет выявления ошибок;
- корректировка ошибок в 3D CAD модели;

- повторение изготовления прототипа по исправленному электронному образу - 3D CAD откорректированной модели;

- проверка исправленной твердотельной RPM модели (прототипа) на соответствие требованиям к ее геометрическим параметрам.

Функциональное тестирование на этой стадии не проводится.

Верификация 3D CAD и RPM моделей производится с использованием измерительной системы на базе Imetric Iscan II путем совмещения полученного сканером изображения с CAD моделью.

После совмещения моделей сканер с помощью цветового указателя на мониторе указывает на характер отклонения, т. е. визуально можно определить степень их соответствия:

- зеленый цвет – означает норму;
- красный цвет «+» означает положительное отклонение;
- синий цвет «-» означает отрицательное отклонение, т. е. «в тело модели».

Возможности измерительной системы позволяют оценить степень совпадения моделей в любой интересующей нас точке и получить оценку отклонения (если оно имеется) в абсолютных величинах.

Порядок верификации принят следующий:

- перед началом работы сканер проверяется путем подачи полос на калибровочную плиту;

- на измеряемый объект наклеиваются светоотражающие мишени (расстояние между мишенями 300÷400 мм). Камера сканера должна фиксировать одновременно на поверхности 4 мишени. Рядом с объектом укладываются 2 линейки с известными размерами (1м или др.). На линейки также наклеиваются мишени);

- производится фотограмметрия – определение форм, размеров и положения объектов по их фотографическим изображениям. Обмер производится передвижной камерой перемещением ее вокруг неподвижного объекта. Камера перемещается так, чтобы в поле зрения попадало не менее 4 мишеней;

- с помощью проектора объект освещается «полосатым светом», при этом камера все время фиксирует его границы (по искривлению граничных линий);

- в соответствии с программным обеспечением данные сканирования соотносятся с координатами реперных точек, итогом чего получают результаты измерений поверхности объекта и отклонения от электронного 3D CAD образа;

- осуществление ручной доработки результатов сканирования (выполняется в случае необходимости для сложных изделий); облако точек



(массив координат) располагается в границах  $\pm 0,02$  мм (доверительная вероятность 95%) относительно аппроксимирующих поверхностей.

### 3.15 Технологическое время изготовления изделий послойным выращиванием (на примере SLA)

Технологический процесс изготовления изделий послойным выращиванием для большинства существующих способов можно представить в виде последовательности следующих операций:

- подготовительные операции (монтаж рабочей платформы, дозаправка рабочей емкости исходными материалами);
- послойное построение технологических опор (поддержек);
- послойное изготовление изделия;
- заключительные операции (демонтаж изделия с рабочей платформы, удаление технологических опор, промывка изделия, постобработка и пр.).

Практический опыт использования способа лазерной стереолитографии показал, что суммарное время на подготовительно-заключительные операции находится в интервале  $1\div 5\%$  от общего технологического времени построения изделия, поэтому в первом приближении эту составляющую можно не рассматривать.

Технологическое время создания изделия  $T_{И}$  послойным выращиванием в общем случае (рис. 3.48) представляет собой сумму времен создания деталей  $T_{Д(\delta)}$  и опор  $T_{О(\omega)}$ :

$$T_{И} = \sum_{\delta=1}^{N_{Д}} T_{Д(\delta)} + \sum_{\omega=1}^{N_{О}} T_{О(\omega)}, \quad (3.20)$$

где  $N_{Д}$ ,  $N_{О}$  - количество деталей на рабочей платформе и опор.

С точки зрения временной последовательности первоначально создаются опоры, а на них располагаются детали. С позиций задач изготовления - первичным является изделие, поэтому его изготовление будет рассматриваться в первую очередь. В большинстве способов послойного выращивания опоры и/или поддержки не используются. Примером обязательного использования опор (поддержек) является способ лазерной стереолитографии (SLA), при котором используется жидкая исходная рабочая среда – фотомономер.

В рамках концепции послойного выращивания пространственных изделий время создания отдельной детали и сопутствующих ей опор определяется временем создания всех составляющих слоев:

$$T_{Д(\delta)} = \sum_{i=1}^{N_{CD}} T_{CD(i)} ; T_{O(\omega)} = \sum_{j=1}^{N_{CO}} T_{CO(j)} , \quad (3.21)$$

где  $T_{CD(i)}$ ,  $T_{CO(j)}$  - соответственно время создания  $i$ -го и  $j$ -го слоев детали и опор.

В свою очередь времена создания  $i$ -го слоя детали  $T_{CD(i)}$  и  $j$ -го слоя опоры  $T_{CO(j)}$  представляют собой сумму следующих технологических процедур:

$$T_{CD(i)} = T_{ФД(i)} + T_{ПД(i)} + T_{НД(i)} + T_{ВД(i)} ; \quad (3.22)$$

$$T_{CO(j)} = T_{ФО(j)} + T_{ПО(j)} + T_{НО(j)} + T_{ВО(j)} , \quad (3.23)$$

где  $T_{ФД(i)}$ ,  $T_{ФО(j)}$  - время формообразования слоя (SLA - время воздействия лазерного луча на поверхность фотомономерной смолы);  $T_{ПД(i)}$ ,  $T_{ПО(j)}$  - время опускания платформы;  $T_{НД(i)}$ ,  $T_{НО(j)}$  - время работы выравнивающего слоя устройства (для SLA - для опор данная процедура не выполняется);  $T_{ВД(i)}$ ,  $T_{ВО(j)}$  - время выдержки (для SLA - для восстановления плоской формы поверхности фотомономерной смолы).

Тогда обобщенное выражение для технологического времени создания изделия (3.20) с учетом (3.21)÷(3.23) имеет следующий вид:

$$T_{И} = \sum_{\delta=1}^{N_{Д}} \sum_{i=1}^{N_{CD}} T_{ФД(i)} + T_{ПД(i)} + T_{НД(i)} + T_{ВД(i)} + \sum_{\omega=1}^{N_{O}} \sum_{j=1}^{N_{CO}} T_{ФО(j)} + T_{ПО(j)} + T_{НО(j)} + T_{ВО(j)} , \quad (3.24)$$

где обозначения соответствуют (3.20)÷(3.23).

Рассмотрим составляющие технологического времени послойного выращивания изделий на базе способа лазерной стереолитографии.

### 3.15.1 Модель технологического времени создания изделия

При разработке параметрической модели времени создания изделия использовалось аналитическое моделирование. Аналитическое моделирование предполагает использование математической модели реального объекта в форме уравнений, связывающих выходные переменные (характеристики процесса) с входными (параметрами процесса), дополненных системой ограничений. При этом предполагается

наличие однозначной вычислительной процедуры получения точного решения уравнений.

В табл. 3.9 приведены 18 основных параметров процесса формообразования изделий способом лазерной стереолитографии.

Таблица 3.9 – Параметры процесса изготовления изделий способом лазерной стереолитографии

№ п/п	Обозн.	Наименование	Значения параметров		
			min	баз.	max
1	$D_L$	диаметр пятна лазерн. луча, мм	0,230	0,255	0,280
2	$V_L$	скорость луча лазера, мм/с	3000	4000	5000
3*	$S_D$	площадь рабочей области, занимаемой деталями, мм <sup>2</sup>	$1 \cdot 10^4$	$4 \cdot 10^4$	$1,6 \cdot 10^5$
4*	$K_{ЗД}$	коэффициент заполнения рабочей области деталями	0,1	0,5	0,9
5*	$K_\Phi$	коэффициент формы рабочей области по оси Y	0,5	1,0	2,0
6*	$h_C$	толщина фотополимеризуемого слоя, мм	0,025	0,1	0,2
7	$K_{ПД}$	коэффициент проходов луча при построении детали	3	4	11
8	$K_{ПО}$	коэффициент проходов луча при построении опор	2	4	6
9*	$L_{ПП}$	длина подвода и перебега выравнивающего ножа, мм	5	10	15
10*	$V_H$	скорость движения выравнивающего ножа, мм/с	4	13	22
11*	$K_{ПН}$	коэффициент числа проходов выравнивающего ножа	1	2	3
12	$V_{П}$	скорость опускания рабочей платформы, мм/с	1	2	3
13*	$T_{БД}$	базовое время выдержки, с	5	15	30
14*	$H_I$	исходная высота изделия, мм	10	200	400
15*	$K_{ЗО}$	коэффициент заполнения опор	0,2	0,5	0,9
16	$H_O$	высота опор, мм	9	12	15
17	$H_{ПО}$	глубина погружения платформы при построении опор, мм	6,25	10	15
18*	$T_{ВО}$	время выдержки при построении опор, с	3	10	22

Примечание. Знаком \* отмечены параметры, регулируемые оператором.

Для каждого параметра определена область допустимых значений  $X_{i(\min)} \leq X_i \leq X_{i(\max)}$  и базовое значение  $X_{i(\text{баз})}$ . Знаком\* отмечены параметры, регулируемые оператором. Выявление основных технологических параметров производилось по технической документации к установке для лазерной стереолитографии, опыту практической работы и экспериментальным исследованиям. Технологический смысл параметров будет рассматриваться по мере их использования.

### 3.15.2 Время послойного построения изделия

Время построения детали при послойном выращивании способом лазерной стереолитографии представляет собой сумму времен построения отдельных слоев и определяется ранее полученным уравнением (3.21). Для получения аналитического выражения для времени построения детали необходимо выявить зависимости его составляющих от технологических параметров процесса.

*Время формообразования  $i$ -го слоя детали.* Рассмотрим исходную схему формообразования способом лазерной стереолитографии. Луч лазера проходит через оптическую систему и, отражаясь от поверхности управляющего зеркала, попадает на поверхность жидкого фотомономера (диаметр пятна лазерного луча  $D_{\text{л}}$ ). Время, требуемое для полимеризации, зависит от спектральных характеристик фотомономера, характеристик лазерного луча (длина волны, мощность, диаметр пятна лазерного луча) и скорости его перемещения по поверхности фотомономера (скорость луча лазера  $V_{\text{л}}$ ). Процесс отверждения фотомономера зависит от количества полученной оптической энергии в области фокусирования лазерного луча. С учетом полупрозрачности фотомономера лазерный луч проникает на определенную глубину (большую, чем заданная толщина фотополимеризуемого слоя  $h_{\text{с}}$ ). Перемещаясь со скоростью  $V_{\text{л}}$  по поверхности фотомономера, лазерный луч должен обеспечивать требуемую экспозицию, вызывающую отверждение фотомономера, т. е. его полимеризацию.

Требуемая экспозиция поддерживается параметрами траектории лазерного луча и ее взаимным перекрытием с учетом аддитивности суммарной энергии полимеризации, полученной отдельными элементарными участками формируемого  $i$ -го слоя детали.

Технологическим параметром, регулирующим этот процесс, является коэффициент проходов луча  $K_{\text{ПД}}$ .

Формируемый  $i$ -й слой представляет собой плоское сечение пространственной детали. Для описания технологических параметров формируемого слоя целесообразно использовать площадь рабочей области, занимаемой деталями  $S_{\text{Д}}$  (площадь поверхности в сечении  $i$ -го слоя, ограниченная замкнутой контурной линией по внешним границам элементов детали или деталей). Для учета несплошности (внутренних пустот) необходимо ввести коэффициент заполнения рабочей области деталями  $K_{3\text{Д}}$ .

С учетом вышесказанного время формообразования  $i$ -го слоя можно представить в виде аналитической зависимости от пяти технологических параметров:

$$T_{\text{ФД}(i)} = \frac{S_{\text{Д}} K_{3\text{Д}} K_{\text{ПД}}}{D_{\text{Л}} V_{\text{Л}}}, \quad (3.25)$$

где  $S_{\text{Д}}$  - площадь рабочей области, занимаемой деталями,  $\text{мм}^2$ ;  $K_{3\text{Д}}$  - коэффициент заполнения рабочей области деталями;  $K_{\text{ПД}}$  - коэффициент проходов луча при построении детали;  $D_{\text{Л}}$  - диаметр пятна лазерного луча,  $\text{мм}$ ;  $V_{\text{Л}}$  - скорость луча лазера,  $\text{мм/с}$ .

*Время опускания платформы для  $i$ -го слоя детали.* При создании слоя детали платформа со скоростью  $V_{\text{П}}$  опускается на глубину слоя  $h_{\text{С}}$  и дополнительную величину  $h_{\text{С}(\text{min})} = 0,025$   $\text{мм}$ . Тогда получим выражение от двух технологических параметров:

$$T_{\text{ПД}(i)} = \frac{h_{\text{С}} + 0,025}{V_{\text{П}}}. \quad (3.26)$$

*Время работы выравнивающего ножа для  $i$ -го слоя детали.* После формирования каждого слоя и опускания платформы происходит выравнивание поверхности фотомономера за один или несколько проходов выравнивающего ножа (технологический параметр  $K_{\text{ПН}}$ ), перемещающегося вдоль оси  $Y$  со скоростью  $V_{\text{Н}}$ . Перемещение выравнивающего ножа равно сумме линейного размера рабочей области по оси  $Y$  и длине подвода и перебега  $L_{\text{ПП}}$ . Для учета формы рабочей области при определении ее размера по оси  $Y$  введем коэффициент  $K_{\text{Ф}} = S_{\text{Д}Y} / S_{\text{Д}X}$  как отношение размеров рабочей области по осям  $Y$  и  $X$ . С учетом коэффициента  $K_{\text{Ф}}$  размер рабочей области по оси  $Y$  будет определяться как  $\sqrt{S_{\text{Д}} K_{\text{Ф}}}$ . Такой подход для

прямоугольной рабочей области обеспечивает точное решение, а для области произвольной формы - приближенное.

С учетом рассмотренных допущений время работы выравнивающего ножа для  $i$ -го слоя детали можно представить в виде аналитической зависимости от пяти технологических параметров:

$$T_{НД(i)} = \frac{K_{ПН}}{V_H} \sqrt{S_D K_\Phi} + L_{ПП} , \quad (3.27)$$

где  $K_{ПН}$  - коэффициент числа проходов выравнивающего ножа;  $V_H$  - скорость движения выравнивающего ножа, мм/с;  $S_D$  - площадь рабочей области, занимаемой деталями, мм<sup>2</sup>;  $K_\Phi$  - коэффициент формы рабочей области по оси  $Y$ ;  $L_{ПП}$  - длина подвода и перебега выравнивающего ножа, мм.

*Время выдержки для  $i$ -го слоя детали.* После опускания платформы на заданную глубину и выполнения проходов выравнивающего ножа производится остановка процесса (выдержка) для возврата поверхности жидкой смолы в плоское исходное состояние. Как показали проведенные исследования, необходимое время выдержки может быть описано следующей степенной зависимостью:

$$T_{ВД(i)} = T_{БД} \left( \frac{S_D}{S_{Д(баз)}} \right)^{m_s} \left( \frac{h_{С(баз)}}{h_C} \right)^{m_h} , \quad (3.28)$$

где  $T_{БД}$  - базовое время выдержки, с;  $S_D$  - площадь рабочей области, занимаемой деталями, мм<sup>2</sup>;  $S_{Д(баз)}$  - базовая площадь рабочей области, занимаемой деталями, мм<sup>2</sup>;  $m_s$  - показатель степени влияния площади рабочей области, занимаемой деталями, на продолжительность выдержки;  $h_C$  - толщина фотополимеризуемого слоя, мм;  $h_{С(баз)}$  - базовая толщина фотополимеризуемого слоя, мм;  $m_h$  - показатель степени влияния толщины фотополимеризуемого слоя на продолжительность выдержки.

С учетом базовых значений  $S_{Д(баз)} = 1 \cdot 10^4$  мм<sup>2</sup>,  $h_{С(баз)} = 0,125$  мм и показателей степени влияния  $m_s = 0,3$ ,  $m_h = 1,5$  окончательно имеем:

$$T_{ВД(i)} = T_{БД} \left( \frac{S_D}{1 \cdot 10^4} \right)^{0,3} \left( \frac{0,125}{h_C} \right)^{1,5} = 2,79 \cdot 10^{-3} T_{БД} \frac{S_D^{0,3}}{h_C^{1,5}} . \quad (3.29)$$

*Модель времени построения  $i$ -го слоя детали.* Время построения слоя детали получим подстановкой в (3.22) функциональных слагаемых: время формообразования (3.25), время опускания платформы (3.26),

работы выравнивающего ножа (3.27) и выдержки (3.28). Окончательно получим аналитическое выражение от 12-и технологических параметров:

$$T_{CД(i)} = \frac{S_{Д} K_{3Д} K_{ПД}}{D_{Л} V_{Л}} + \frac{h_{С} + 0,025}{V_{П}} + \frac{K_{ПН}}{V_{Н}} \sqrt{S_{Д} K_{Ф}} + L_{ПП} + 2,79 \cdot 10^{-3} T_{БД} \frac{S_{Д}^{0,3}}{h_{С}^{1,5}}, \quad (3.30)$$

где обозначения соответствуют табл. 3.10.

*Модель времени построения деталей.* В общем случае время создания деталей определяется суммой времен формирования слоев  $1 \leq i \leq N_{Д}$ . С учетом (3.21), (3.30) можно записать аналитическое выражение для времени построения деталей:

$$T_{Д} = \sum_{i=1}^{N_{Д}} \left[ \frac{S_{Д} K_{3Д} K_{ПД}}{D_{Л} V_{Л}} + \frac{h_{С} + 0,025}{V_{П}} + \frac{K_{ПН}}{V_{Н}} \sqrt{S_{Д} K_{Ф}} + L_{ПП} + 2,79 \cdot 10^{-3} T_{БД} \frac{S_{Д}^{0,3}}{h_{С}^{1,5}} \right]_{(i)}, \quad (3.31)$$

где под знаком суммы параметры, значения которых в общем случае могут изменяться для каждого  $i$ -го слоя.

Количество слоев, составляющих детали,  $N_{Д}$  будет зависеть от высоты изделия  $H_{И}$  и толщин фотополимеризуемого слоя  $h_{С(i)}$  и определяться уравнением:

$$H_{И} = \sum_{i=1}^{N_{Д}} h_{С(i)}. \quad (3.32)$$

Для случая постоянства толщин фотополимеризуемого слоя и прочих параметров время создания изделия определяется следующей зависимостью:

$$T_{Д} = \frac{H_{И}}{h_{С}} \left[ \frac{S_{Д} K_{3Д} K_{ПД}}{D_{Л} V_{Л}} + \frac{h_{С} + 0,025}{V_{П}} + \frac{K_{ПН}}{V_{Н}} \sqrt{S_{Д} K_{Ф}} + L_{ПП} + 2,79 \cdot 10^{-3} T_{БД} \frac{S_{Д}^{0,3}}{h_{С}^{1,5}} \right]. \quad (3.33)$$

Таблица 3.10 – Показатели степени влияния параметров процесса формообразования изделия на технологическое время

№ п/п	Обознач.	Наименование	Степень влияния параметра			↑ ↓
			$T_{И}$	$T_{Д}$	$T_{О}$	
6*	$h_{С}$	толщина фотополимеризуемого слоя, мм	-1,51	-1,53	-0,99	↓
14*	$H_{И}$	исходная высота изделия, мм	0,85	0,99	—	↑
3*	$S_{Д}$	площадь рабочей области, занимаемой деталями, мм <sup>2</sup>	0,73	0,72	0,81	↑
7	$K_{ПД}$	коэффициент проходов луча при построении детали	0,61	0,63	—	↑
2	$V_{Л}$	скорость луча лазера, мм/с	-0,57	-0,56	-0,84	↓
1	$D_{Л}$	диаметр пятна лазерного луча, мм	-0,56	-0,55	-0,84	↓
4*	$K_{ЗД}$	коэффициент заполнения рабочей области деталями	0,41	0,43	—	↑
10*	$V_{Н}$	скорость движения выравнивающего ножа, мм/с	-0,29	-0,30	—	↓
11*	$K_{ПН}$	коэффициент числа проходов выравнивающего ножа	0,20	0,21	—	↑
13	$T_{БД}$	базовое время выдержки, с	0,20	0,20	—	↑
5*	$K_{Ф}$	коэффициент формы рабочей области по оси Y	0,11	0,11	—	↑
16	$H_{О}$	высота опор, мм	0,037	—	0,99	↑
15*	$K_{ЗО}$	коэффициент заполнения опор	0,029	—	0,81	↑
8	$K_{ПО}$	коэффициент проходов луча при построении опор	0,029	—	0,81	↑
9*	$L_{ПП}$	длина подвода и перебега выравнивающего ножа, мм	0,0100	0,0100	—	↑
18*	$T_{ВО}$	время выдержки при построении опор, с	0,0035	—	0,099	↑
12	$V_{П}$	скорость опускания рабочей платформы, мм/с	-0,0027	-0,0001	-0,0644	↓
17	$H_{ПО}$	глубина погружения платформы при построении опор, мм	0,0011	—	0,053	↑

Примечание. Знаком \* отмечены параметры, регулируемые оператором.



### 3.15.3 Время построения технологических опор

Время построения опор определяется аналогично времени построения детали с учетом особенностей, присущих данному процессу (3.21). Рассмотрим зависимости его составляющих от технологических параметров процесса.

*Время формообразования  $j$ -го слоя опор.*

$$T_{FO(j)} = \frac{S_D K_{3O} K_{ПО}}{D_L V_L}, \quad (3.34)$$

где  $S_D$  - площадь рабочей области, занимаемой деталями,  $\text{мм}^2$ ;  $K_{3O}$  - коэффициент заполнения опор;  $K_{ПО}$  - коэффициент проходов луча при построении опор;  $D_L$  - диаметр пятна лазерного луча,  $\text{мм}$ ;  $V_L$  - скорость луча лазера,  $\text{мм/с}$ .

*Время опускания платформы для  $j$ -го слоя опор.* При создании слоя опор платформа со скоростью  $V_{П}$  опускается на глубину слоя  $h_C$  и дополнительную величину  $H_{ПО}$ :

$$T_{ПО(j)} = \frac{h_C + H_{ПО}}{V_{П}}. \quad (3.35)$$

*Время создания  $j$ -го слоя опор.* Время создания слоя опор получим подстановкой в (3.23) функциональных слагаемых: время формообразования (3.34), опускания платформы (3.35) и выдержки  $T_{ВО}$ .

$$T_{O(j)} = \frac{S_D K_{3O} K_{ПО}}{D_L V_L} + \frac{h_C + H_{ПО}}{V_{П}} + T_{ВО}. \quad (3.36)$$

*Модель времени построения опор.* В общем случае время формирования опор определяется суммой времен формирования слоев  $1 \leq j \leq N_O$ . С учетом (3.21), (3.36) можно записать аналитическое выражение для времени построения опор.

$$T_O = \sum_{j=1}^{N_O} T_{CO(j)} = \sum_{j=1}^{N_O} \left( \frac{S_D K_{3O} K_{ПО}}{D_L V_L} + \frac{h_C + H_{ПО}}{V_{П}} + T_{ВО} \right)_{(j)}, \quad (3.37)$$

где под знаком суммы параметры, значения которых в общем случае могут изменяться для каждого  $j$ -го слоя.

Количество слоев, составляющих опоры,  $N_O$  будет зависеть от высоты опор  $H_O$  и толщин фотополимеризуемого слоя  $h_{C(j)}$  и определяться уравнением:

$$H_O = \sum_{j=1}^{N_O} h_{C(j)}. \quad (3.38)$$

Для случая постоянства толщин фотополимеризуемого слоя и прочих параметров время формирования опор определяется следующей зависимостью:

$$T_O = \frac{H_O}{h_C} \left( \frac{S_D K_{3O} K_{ПО}}{D_L V_L} + \frac{h_C + H_{ПО}}{V_{П}} + T_{ВО} \right). \quad (3.39)$$

### 3.15.4 Конечная модель времени послойного создания изделия

Аналитическую модель зависимости времени создания изделия от 18-и технологических параметров получим, объединив (3.31) и (3.39):

$$T_{И} = \frac{H_{И}}{h_C} \left[ \frac{S_D K_{3Д} K_{ПД}}{D_L V_L} + \frac{h_C + 0,025}{V_{П}} + \frac{K_{ПН}}{V_{Н}} \sqrt{S_D K_{Ф}} + L_{ПН} + 2,79 \cdot 10^{-3} T_{БД} \frac{S_D^{0,3}}{h_C^{1,5}} \right] + \frac{H_O}{h_C} \left( \frac{S_D K_{3O} K_{ПО}}{D_L V_L} + \frac{h_C + H_{ПО}}{V_{П}} + T_{ВО} \right), \quad (3.40)$$

где параметры в качестве примера соответствуют приведенным в табл. 3.10.

Верификация полученной модели в производственных условиях показала, что ее использование при расчете времени построения изделия способом лазерной стереолитографии обеспечивает относительную ошибку в пределах 5÷10%. Такая точность является достаточной для прогнозирования себестоимости изготовления изделий по приведенной стоимости часа работы установки лазерной стереолитографии.

Таблица 3.11 – Параметры при прогнозировании полного цикла изготовления панели инструментов стоматологической установки (SLA)

Параметр	Типы и значения параметров
$T_{3Dmod}$	время создания электронных 3D моделей изделий – стохастический нечеткий параметр Par1: распределение $TrapezRight(x, X_{min} = 1.600 E1, X_{mod} = 1.800 E1, X_{max} = 3.200 E1)$
$T_{PP1}$	продолжительность постпроцесса № 1 – стохастический нечеткий параметр Par3: распределение $TrapezRight(x, X_{min} = 1.000 E0, X_{mod} = 2.000 E0, X_{max} = 5.000 E0)$
$T_{PP2}$	продолжительность постпроцесса № 2 – детерминированный параметр Par4: значение 0.000 E0
$T_{PP3}$	продолжительность постпроцесса № 3 – стохастический нечеткий параметр Par5: распределение $Rand(x, X_{min} = 9.000 E0, X_{max} = 1.600 E1)$
$T_{Home}$	подготовительные операции – стохастический параметр Par6: распределение $Rand(x, X_{min} = 1.000 E1, X_{max} = 0.200 E0)$
$T_{End}$	заключительные операции – стохастический параметр Par7: распределение $Rand(x, X_{min} = 1.000 E1, X_{max} = 0.200 E0)$
$Y_A$	ширина рабочей области, занимаемой изделиями по оси $Y$ – детерминированный параметр Par8: значение 3.600 E2
$H_W$	высота рабочей области, занимаемой изделиями по оси $Z$ – детерминированный параметр Par9: значение 6.000 E1
$S_A$	площадь рабочей области, занимаемой изделиями – детерминированный параметр Par10: значение 1.296 E5
$K_S$	вероятностный коэффициент заполнения рабочей области изделиями – стохастический параметр Par11: распределение $Rand(x, X_{min} = 0.500 E1, X_{max} = 1.000 E1)$
$K_Y$	вероятностный коэффициент размера сечения по оси $Y$ – стохастический параметр Par12: распределение $Rand(x, X_{min} = 0.200 E0, X_{max} = 0.300 E0)$
$D_L$	диаметр пятна лазерного луча – стохастический параметр Par13: распределение $Rand(x, X_{min} = 0.230 E0, X_{max} = 0.270 E0)$
$V_L$	скорость луча лазера – стохастический параметр Par14: распределение $Rand(x, X_{min} = 3.000 E3, X_{max} = 5.000 E3)$
$h_C$	толщина формируемого единичного слоя – детерминированный параметр Par15: значение 0.150 E0
$K_{WR}$	коэффициент проходов луча при построении изделий – стохастический параметр Par16: распределение $Rand(x, X_{min} = 7.000 E0, X_{max} = 9.000 E0)$
$H_A$	высота (по координате $Z$ ) дополнительных технологических элементов – стохастический параметр Par17: распределение $Rand(x, X_{min} = 8.000 E0, X_{max} = 9.000 E0)$

$K_{AB}$	коэффициент заполнения дополнительных технологических элементов – стохастический параметр Par18: распределение $Rand(x, X_{min} = 0.300 \text{ E0}, X_{max} = 0.500 \text{ E0})$
$K_{AR}$	коэффициент проходов луча при построении дополнительных технологических элементов – детерминированный параметр Par19: значение 1.000 E0
$h_{WP}$	глубина дополнительного опускания платформы при построении изделий – стохастический нечеткий параметр Par20: распределение $Triang(x, X_{min} = 1.000 \text{ E2}, X_{mod} = 0.150 \text{ E0}, X_{max} = 0.200 \text{ E0})$
$h_{AP}$	глубина дополнительного опускания при построении технологических элементов – стохастический параметр Par21: распределение $Rand(x, X_{min} = 8.000 \text{ E0}, X_{max} = 1.000 \text{ E1})$
$V_P$	скорость опускания рабочей платформы – стохастический нечеткий параметр Par22: распределение $Triang(x, X_{min} = 1.000 \text{ E0}, X_{mod} = 2.000 \text{ E0}, X_{max} = 3.000 \text{ E0})$
$L_C$	подвода-перебега выравнивающего элемента установки – стохастический нечеткий параметр Par23: распределение $TriangRight(x, X_{min} = 5.000 \text{ E0}, X_{max} = 7.000 \text{ E0})$
$V_C$	скорость перемещения выравнивающего элемента установки – стохастический нечеткий параметр Par24: распределение $TriangLeft(x, X_{min} = 1.200 \text{ E1}, X_{max} = 1.500 \text{ E1})$
$K_{WC}$	коэффициент числа проходов выравнивающего элемента установки при построении изделий – стохастический нечеткий параметр Par25: распределение $TriangLeft(x, X_{min} = 1.000 \text{ E0}, X_{max} = 2.000 \text{ E0})$
$T_{WD}$	время выдержки при построении изделий – стохастический нечеткий параметр Par26: распределение $Triang(x, X_{min} = 1.000 \text{ E1}, X_{mod} = 1.200 \text{ E1}, X_{max} = 1.800 \text{ E1})$
$T_{AD}$	время выдержки при построении технологических элементов – стохастический нечеткий параметр Par27: распределение $Triang(x, X_{min} = 6.000 \text{ E0}, X_{mod} = 7.000 \text{ E0}, X_{max} = 1.000 \text{ E1})$

### 3.15.5 Анализ модели технологического времени

Для анализа полученной модели технологического времени (3.40), зависящей от 18 параметров, пойдём по пути степенной аппроксимации, традиционно применяющейся в технологии машиностроения. Степенная аппроксимация позволяет оценить степень влияния каждого технологического параметра на время обработки изделий. Такой подход возможен в связи с выявленной монотонностью зависимости технологического времени от параметров.

Столбogramмы показателей степени влияния технологических параметров на время построения изделия  $T_{И}$ , время создания деталей  $T_{Д}$  и

время создания опор  $T_O$  приведены на рис. 3.49-3.51. Числовые значения рассчитаны для данных табл. 3.10 и сведены в табл. 3.12. Параметры в табл. 3.12 отсортированы по абсолютным значениям показателей степени влияния технологических параметров на время построения изделия  $T_{И}$ . Номера технологических параметров в табл. 3.12 соответствуют приведенным в табл. 3.10.

Степенная модель, аппроксимирующая аналитическую модель времени создания изделия, имеет следующий вид:

$$T_{И} = \frac{3,62}{10^4} \frac{H_{И}^{0,85} S_{Д}^{0,72} K_{ПД}^{0,61} K_{ЗД}^{0,41} K_{ПН}^{0,20} T_{БД}^{0,19} K_{Ф}^{0,10}}{h_{С}^{1,51} V_{Л}^{0,57} D_{Л}^{0,56} V_{Н}^{0,29} V_{П}^{0,003}} \times \quad (3.41)$$

$$\times H_{О}^{0,04} K_{ЗО}^{0,03} K_{ПО}^{0,03} L_{ПП}^{0,01} T_{ВО}^{0,004} H_{ПО}^{0,001}$$

где обозначения технологических параметров соответствуют приведенным в табл. 3.12.

Анализ степени влияния технологических параметров на время изготовления изделия показал, что *наиболее значимыми из них являются: исходная высота изделия  $H_{И}$ , площадь рабочей области, занимаемой деталями,  $S_{Д}$  и толщина фотополимеризуемого слоя  $h_{С}$* . Это косвенно подтверждает ранее рассмотренное положение о необходимости использования принципа обратимой структурной декомпозиции изделия для расширения технологических возможностей ускоренного формообразования способом стереолитографии.

Для оценки возможности структурной декомпозиции изделий для оптимизации процесса их создания необходимо рассмотреть вопрос разделения изделия на части.

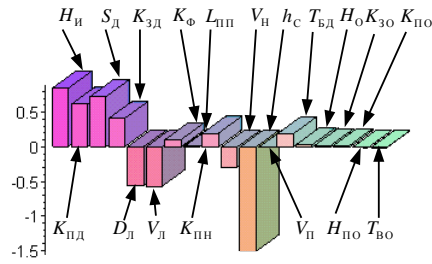


Рисунок 3.49 – Столбogramма показателей степени влияния технологических параметров на время построения изделия  $T_n$

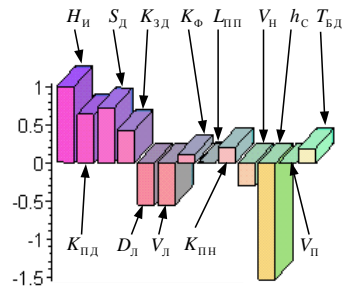


Рисунок 3.50 – Столбogramма показателей степени влияния технологических параметров на время создания деталей  $T_d$

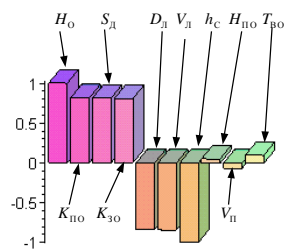


Рисунок 3.51 – Столбogramма показателей степени влияния технологических параметров на время создания опор  $T_o$

### 3.15.6 Время изготовления изделия, разделенного на части

Применительно к предметной области лазерной стереолитографии введем понятие разделения изделия на части. Исходное изделие общей высотой  $H_{И}$  и площадью рабочей области  $S_{Д}$  разделим на некоторое число частей  $N$  (в общем случае неравных между собой). С учетом постоянства объема результат разделения на части будет соответствовать следующему тождеству:

$$S_{Д} H_{И} = \sum_{i=1}^N S_{Д(i)} H_{И(i)}, \quad (3.42)$$

где  $S_{Д(i)}$ ,  $H_{И(i)}$  - составные элементы изделия, полученные в результате декомпозиции.

Для того чтобы аналитически описать результат декомпозиции, будем рассматривать только изменение площади и высоты изделия. Введем понятие коэффициента разделения изделия на части  $K_{РИ}$  и преобразуем (3.42) к следующему виду:

$$S_{Д} H_{И} = S_{Д} K_{РИ} \frac{H_{И}}{K_{РИ}} = S_{ДР} H_{ИР}, \quad (3.43)$$

где  $K_{РИ}$ ,  $S_{ДР}$  и  $H_{ИР}$  отображают комплексный результат многообразия возможных реальных ситуаций декомпозиции изделия и позволяют перейти от дискретных величин к непрерывным.

В математическом смысле область определения коэффициента разбиения на части соответствует интервалу  $1 \leq K_{РИ} < \infty$ .

В общем случае составные части технологического времени, зависящие от  $H_{И}$  и  $S_{Д}$ , можно представить заменой по тождеству (3.43):

$$T_{(i)P} = f(X_j, H_{И}, S_{Д}) = f\left(X_j, \frac{H_{И}}{K_{РИ}}, S_{Д} K_{РИ}\right), \quad (3.44)$$

где  $X_j$  - прочие технологические параметры, влияющие на  $T_{(i)P}$  составляющую технологического времени.

С учетом технологических ограничений максимальное значение коэффициента разделения изделия на части  $K_{РИ}$  зависит от рабочей площади платформы  $S_3$  установки лазерной стереолитографии и определяется неравенствами:

$$1 \leq K_{\text{РИ}} \leq \frac{S_3}{S_{\text{Д}}}, \quad (3.45)$$

где  $S_3$  - максимальная площадь изделий, размещаемых на платформе (для установки SLA 5000  $S_3 = 495 \times 495 = 245025 \text{ мм}^2$ ).

Причем, это ограничение должно распространяться на все составляющие уравнения, определяющего время создания изделия. Такой подход соответствует случаю однократной загрузки установки для лазерной стереолитографии.

Ограничение по площади деталей на рабочей платформе можно снять, если использовать возможность многократной загрузки установки для лазерной стереолитографии при создании изделия. Такой подход снимает технологическое ограничение на максимально допустимое значение количества его разбиений (3.45).

Для создания реалистической модели с учетом многократной загрузки установки необходимо учитывать, что зависимости для ряда параметров (времени выдержки при формировании слоя детали и др.) адекватно описывают только область значений  $S_{\text{Д}(\text{min})} \leq S_{\text{Д}} \leq S_{\text{Д}(\text{max})}$ , где предельные значения соответствуют приведенным в табл. 3.9.

Введем понятие количества загрузок установки для лазерной стереолитографии  $N_3$ , равное отношению произведения  $S_{\text{Д}} K_{\text{РИ}}$  к  $S_3$ :

$$N_3 = \frac{S_{\text{Д}} K_{\text{РИ}}}{S_3}. \quad (3.46)$$

В общем случае значение  $N_3$  представляет собой сумму целой и дробной частей  $N_3 = |N_3| + N_3$ , где  $|N_3|$ ,  $N_3$  - соответственно целая и дробная части количества загрузок ( $|N_3|$  представляет собой предшествующие полные загрузки, а  $N_3$  - текущую неполную загрузку).

В обобщенном виде составные части технологического времени, зависящие от  $H_{\text{И}}$  и  $S_{\text{Д}}$ , можно представить как сумму времен предшествующих загрузок и текущей:

$$\begin{aligned} T_{(i)\text{РЗ}} &= f(X_j, H_{\text{И}}, S_{\text{Д}}) = \\ &= f\left(X_j, \frac{H_{\text{И}}}{K_{\text{РИ}}}, S_3\right) |N_3| + f\left(X_j, \frac{H_{\text{И}}}{K_{\text{РИ}}}, S_3, N_3\right), \end{aligned} \quad (3.47)$$

где  $X_j$  - прочие технологические параметры, влияющие на  $T_{(i)\text{РЗ}}$  составляющую технологического времени.



Обозначение элементов технологического времени при разделении изделия на части будем производить добавлением символов в нижний индекс:  $T_{(i)P}$  - без учета загрузок (3.44),  $T_{(i)PЗ}$  - с учетом загрузок установки .

Влияние коэффициента разделения изделия  $K_{PI}$  на время создания изделия для базовых значений технологических параметров (табл. 3.10) представлено на рис. 3.52.

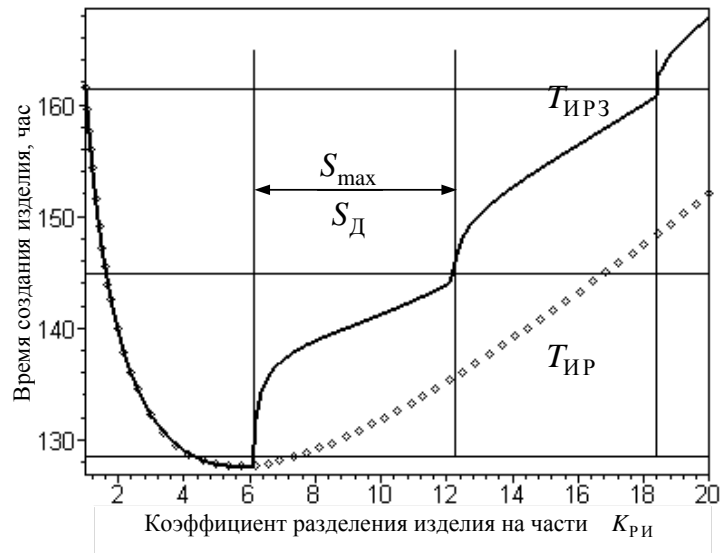


Рисунок 3.52 – Влияние коэффициента разделения изделия на части  $K_{PI}$  на время создания изделия, час.:  $T_{ИР}$ ,  $T_{ИРЗ}$  - без учета и с учетом количества загрузок установки для базовых значений технологических параметров

Разработанная модель технологического времени с учетом разделения изделия на части позволяет произвести оценку эффективности предложенного подхода.

Поиск значений коэффициента разделения изделия на части  $K_{PI}$ , соответствующего минимуму целевой функции (технологическому времени), производился в среде математического пакета Maple. Дополнительно к  $K_{PI}$  определялся коэффициент относительного технологического времени при разбиении изделия на части  $K_{Тотн}$ , соответствующий отношению времени изготовления с разделением  $K_{PI} > 1$  к времени без разбиения  $K_{PI} = 1$ :

$$K_{Тотн} = T_{И} K_{PI} = K_{PI(оптимальный)} / T_{И} K_{PI} = 1 . \quad (3.48)$$

В общем случае для всех 18 технологических параметров задачу решить не удастся. Пришлось ограничиться группами параметров с задаваемыми дискретными значениями.

Оптимальные значения коэффициента разделения изделия на части  $K_{РИ}$  (а) и коэффициента относительного технологического времени создания изделия  $K_{Тотн}$  (б) в зависимости от исходных значений площади деталей  $S_{Д}$  и высоты изделия  $H_{И}$  для базовых значений технологических параметров (табл. 3.9) приведены на рис. 3.53. Расчеты показали, что для базовых значений технологических параметров технологическое время можно уменьшить до 40%.

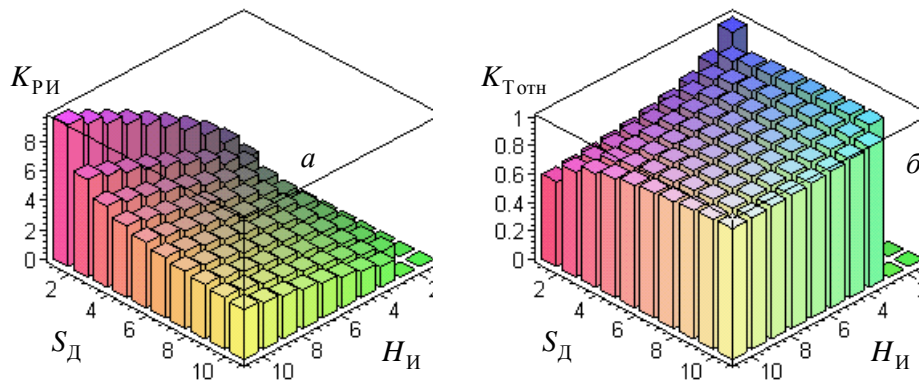


Рисунок 3.53 – Оптимальные значения коэффициента разделения изделия на части  $K_{РИ}$  (а), коэффициента относительного времени создания изделия  $K_{Тотн}$  (б) в зависимости от исходных значений площади деталей  $S_{Д}$  и высоты изделия  $H_{И}$  (без учета загрузок установки) для базовых значений технологических параметров.

Оптимальные значения коэффициента разделения изделия на части  $K_{РИ}$  для случая учета загрузок – аналитическая модель технологического времени изготовления изделия – рассчитать не удалось. Это связано с использованием в модели операндов выделения целой и дробной частей коэффициента разделения изделия  $K_{РИ}$ . Тогда для дальнейшего анализа был выбран вариант расчета и визуализации значений коэффициента относительного времени создания изделия  $K_{Тотн}$  при дискретных значениях коэффициента разделения  $K_{РИ}$  в интервале  $K_{РИ} = 1 \div 20$ . Значение  $K_{РИ} = 1$  соответствует отсутствию разбиения, поэтому для этого случая рассчитывалось время создания изделия, являющееся абсолютной базой сравнения.

На рис. 3.53 представлена визуализация зависимости времени создания изделия  $T_{ИРЗ}$  и коэффициента относительного времени создания изделия  $K_{Тотн}$  от коэффициента разделения изделия на части  $K_{РИ}$  для различных от исходных значений площади деталей и высоты изделия с учетом загрузок установки для

следующих значений технологических параметров:  $h_{C(\min)}$ ,  $K_{3D(\min)}$ ,  $V_{H(\min)}$ ,  $K_{ПН(\max)}$ ,  $K_{Ф(\max)}$ ,  $K_{3O(\min)}$ ,  $L_{ПП(\max)}$ ,  $T_{ВО(\min)}$ , прочие - базовые (табл. 3.10).

При создании трехмерных графиков область визуализации коэффициента относительного времени создания изделия  $K_{\text{Тотн}}$  ограничивалась его значениями, меньшими единицы. Это позволило визуализировать область рациональных значений сочетания параметров. Приведенная визуализация (рис. 3.54) выявляет механизм воздействия разделения изделия на части  $K_{\text{Ри}}$  на эффективность его обратимой декомпозиции, характеризуемой коэффициентом относительного времени создания изделия  $K_{\text{Тотн}}$ .

Проведенные исследования показали, что коэффициент относительного времени создания изделия  $K_{\text{Тотн}}$  может достигать значений  $K_{\text{Тотн}} = 0,25$ . Эти результаты подтверждают эффективность использования обратимой декомпозиции изделия применительно к способу лазерной стереографии, т. к. уменьшение технологического времени изготовления изделия, а, следовательно, и себестоимости изготовления до четырех раз открывает новые возможности его практического использования.

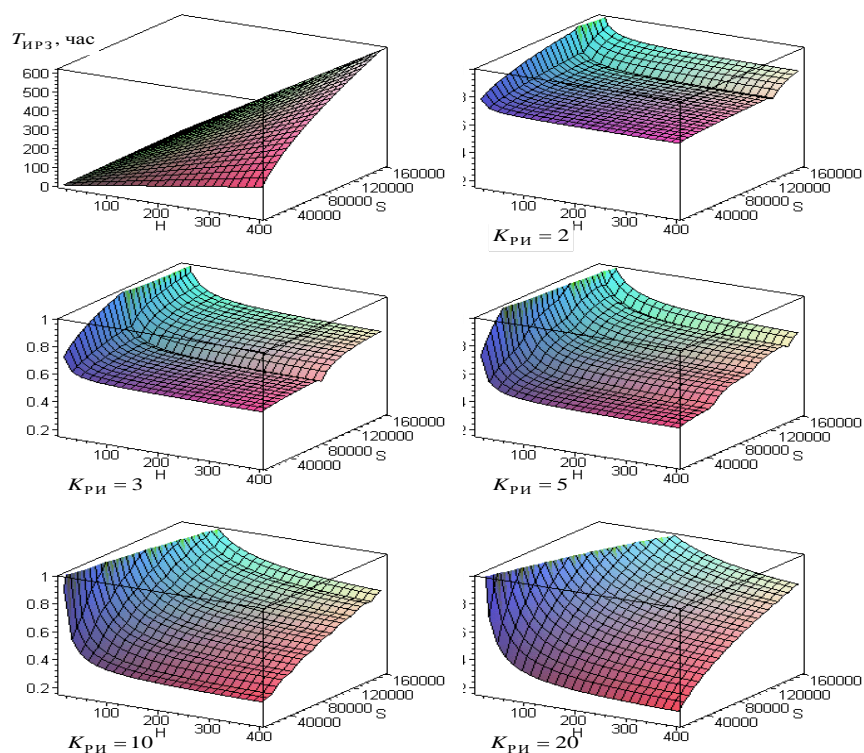


Рисунок 3.54 - Зависимости времени создания изделия  $T_{\text{ИРЗ}}$  и коэффициента относительного времени создания изделия  $K_{\text{Тотн}}$  от коэффициента разделения изделия на части  $K_{\text{Ри}}$  для различных исходных значений площади деталей и высоты изделия с учетом загрузок установки для следующих значений технологических параметров:  $h_{C(\min)}$ ,  $K_{3D(\min)}$ ,  $V_{H(\min)}$ ,  $K_{ПН(\max)}$ ,  $K_{Ф(\max)}$ ,  $K_{3O(\min)}$ ,  $L_{ПП(\max)}$ ,  $T_{ВО(\min)}$ , прочие - базовые.

### 3.16 Обобщенная модель времени полного цикла изготовления изделий генеративными технологиями макроуровня

Цикл создания изделий  $T_{\Sigma}$  генеративными технологиями макроуровня можно представить в виде линейной последовательности периодов:

$$T_{\Sigma} = T_{3Dmod} + T_{Form} + T_{PP1} + T_{PP2} + T_{PP3}, \quad (3.49)$$

где  $T_{3Dmod}$  - время создания электронных 3D моделей изделий;  $T_{Form}$  - время формообразования изделий (непосредственно на установке послойного выращивания);  $T_{PP1}$ ,  $T_{PP2}$ ,  $T_{PP3}$  - времена различных этапов постобработки.

Применительно к технологиям лазерной стереолитографии (SLA) и избирательного лазерного спекания (SLS) могут использоваться следующие постпроцессы:

$T_{PP1}$  - постпроцесс № 1: SLA - окончательная фотополимеризация изделия в специальной ультрафиолетовой камере мод. PCA 500; SLS - очистка изделий от остаточного порошка;

$T_{PP2}$  - постпроцесс № 2: SLA - выдержка изделия в специальном низкотемпературном термошкафу (для повышения температуры плавления полимера); SLS - выжигание полимера, спекание основного материала и инфильтрация оловянистой бронзы при использовании инкапсулированных в полимер частиц металлических порошков (нержавеющая или углеродистая сталь);

$T_{PP3}$  - постпроцесс № 3 (слесарная шлифовка, полировка, окраска и пр.).

В каждом периоде имеет место процедура эволюции изделия и на каждом ее этапе достигается определенный эволюционный результат:

$T_{3Dmod}$  - файл (или система файлов) триангуляционного описания 3D моделей изделий (в STL-формате);

$T_{Form}$  - послойная материализация 3D моделей, т. е. прямой переход от электронного образа изделия в твердотельное состояние;

$T_{PP1}$ ,  $T_{PP2}$ ,  $T_{PP3}$  - придание изделиям требуемых эксплуатационных свойств и необходимого потребительского качества.

Таким образом, *цикл создания изделий интегрированными генеративными технологиями макроуровня состоит из ряда закономерно расположенных и находящихся во взаимосвязи периодов (звеньев), представляющих временную цепь.* Понятие временных цепей по аналогии с размерными цепями при решении технологических задач введено Б.М. Базровым.

Основные термины, обозначения и определения размерных цепей определяются ГОСТ 16319-80, а методы расчета - ГОСТ 16320-80. При расчете размерных цепей могут решаться прямая или обратная задачи. В первом случае по установленным требованиям к замыкающему звену определяются параметры всех звеньев, составляющих размерную цепь. При решении обратной задачи по параметрам составляющих звеньев определяются характеристики замыкающего звена.

В размерных цепях, в которых должна быть обеспечена полная взаимозаменяемость, допуски рассчитываются методом максимума-минимума. При этом учитываются только предельные отклонения звеньев размерной цепи и самые неблагоприятные их сочетания.

Размерные цепи, для которых экономически оправдан риск возможного выхода за пределы поля допуска замыкающих звеньев у части изделий, рассчитываются вероятностным методом. При этом учитывается рассеяние размеров и вероятность различных сочетаний отклонений звеньев, составляющих размерную цепь.

*На основе аналогии с размерными цепями применительно к временным цепям создания изделий интегрированными генеративными технологиями макроуровня введем следующие определения.*

- *Временная цепь – совокупность периодов времени, в рамках которых непосредственно решается поставленная задача. Они образуют замкнутый контур. Периоды времени, образующие временную цепь, можно определить как звенья временной цепи. Одно звено во временной цепи является замыкающим (исходным), а остальные – составляющими.*

- *Замыкающим (исходным) звеном временной цепи будем называть звено, оказывающееся последним или первым (исходным) при ее построении.*

- *Составляющим звеном временной цепи будем называть звено, функционально связанное с замыкающим звеном. Составляющие звенья, в зависимости от их влияния на замыкающее звено, бывают увеличивающими или уменьшающими.*

- *Увеличивающим звеном временной цепи называется такое, при увеличении которого замыкающее звено увеличивается.*

- *Уменьшающим звеном временной цепи называется такое, при увеличении которого замыкающее звено уменьшается.*

- *Компенсирующее звено временной цепи - звено, за счет изменения величины которого достигаются требуемые временные характеристики замыкающего звена.*

• *Основная временная цепь – цепь, замыкающим звеном которой является общее время выполнения поставленной задачи.*

• *Производная временная цепь – цепь, замыкающим звеном которой является одно из составляющих звеньев основной временной цепи. Построение и расчет производной временной цепи раскрывает вероятностное содержание составляющего звена основной временной цепи.*

Применительно к временным цепям создания изделий интегрированными генеративными технологиями макроуровня имеет смысл ввести определения прямой и обратной задач расчета, отличные от принятых в размерных цепях.

• *Прямая задача – определение времени полного цикла создания изделий генеративными технологиями макроуровня путем суммирования временных периодов всех составляющих звеньев. Структурное расчетное выражение для этого случая соответствует (3.49).*

• *Обратная задача – определение одного из временных периодов составляющих звеньев при известном времени полного цикла создания изделий и прочих составляющих звеньев.*

Решение обратной задачи временных цепей создания изделий интегрированными генеративными технологиями макроуровня распадается на 5 вариантов в соответствии с количеством исходных составляющих звеньев:

$$T_{3Dmod} = T_{\Sigma} - T_{Form} + T_{PP1} + T_{PP2} + T_{PP3} ; \quad (3.50)$$

$$T_{Form} = T_{\Sigma} - T_{3Dmod} + T_{PP1} + T_{PP2} + T_{PP3} ; \quad (3.51)$$

$$T_{PP1} = T_{\Sigma} - T_{3Dmod} + T_{Form} + T_{PP2} + T_{PP3} ; \quad (3.52)$$

$$T_{PP2} = T_{\Sigma} - T_{3Dmod} + T_{Form} + T_{PP1} + T_{PP3} ; \quad (3.53)$$

$$T_{PP3} = T_{\Sigma} - T_{3Dmod} + T_{Form} + T_{PP1} + T_{PP2} , \quad (3.54)$$

где  $T_{\Sigma}$  - время полного цикла создания изделий;  $T_{3Dmod}$  - время создания электронных 3D моделей изделий;  $T_{Form}$  - время формообразования изделий (непосредственно на установке послойного выращивания);  $T_{PP1}$ ,  $T_{PP2}$ ,  $T_{PP3}$  - времена различных этапов постобработки.

Основной особенностью временных цепей создания изделий интегрированными генеративными технологиями макроуровня является высокая степень неопределенности значений составляющих звеньев. Это связано с большим числом факторов, влияние которых практически учесть не представляется возможным. Таким образом, попытки использования

только детерминированного подхода обречены на неудачу. Одним из перспективных современных подходов к решению задач при системной неопределенности исходных данных является использование нечетких экспертных оценок на базе интервальных, треугольных, трапециевидных и др. чисел. К ним относятся следующие законы распределения случайных величин: 1 - треугольное общего вида  $Triang(x, X_{min}, X_{mod}, X_{max})$ ; 2 - прямоугольное левое  $TriangLeft(x, X_{min}, X_{max})$ ; 3 - прямоугольное правое  $TriangRight(x, X_{min}, X_{max})$ ; 4 - трапецеидальное распределение общего вида  $Trapez(x, X_{min}, X_{mod1}, X_{mod2}, X_{max})$ ; 5 - трапецеидальное левое  $TrapezLeft(x, X_{min}, X_{mod}, X_{max})$ ; 6 - трапецеидальное правое  $TrapezRight(x, X_{min}, X_{mod}, X_{max})$ .

Расчет временных цепей целесообразно производить методом статистического прогнозирования. Этот метод объединяет в себе возможности как полной, так и неполной взаимозаменяемости с оценкой доверительной вероятности нахождения значений замыкающего звена в заданном интервале или риска выхода за его границы.

Метод полной взаимозаменяемости (метод максимума-минимума или интервальный метод) учитывает возможность сочетания крайних значений составляющих звеньев, что приводит к завышенным интервальным оценкам замыкающего звена. Считается, что экономически оправданной областью использования метода полной взаимозаменяемости являются малозвенные размерные цепи и размерные цепи с относительно широким полем допуска замыкающего звена. Низкая вероятность сочетания во временной цепи крайних отклонений составляющих звеньев приводит к целесообразности использования статистического метода расчета.

*Сущность статистического метода заключается в том, что требуемая область значений замыкающего звена достигается с некоторым риском выхода за допустимые границы. Однако этот риск позволяет расширить области допустимых значений составляющих звеньев в сравнении с их значениями, установленными методом интервальных оценок. Эта возможность создается малой вероятностью одновременного возникновения крайних отклонений у составляющих звеньев.*

Для реализации рассмотренных подходов необходимо иметь обобщенную модель технологического времени и систему статистического моделирования рабочих процессов интегрированных технологий.

### **3.17 Интеграция генеративных технологий ускоренного изготовления и прототипирования инструмента, технологической оснастки и промышленных изделий**

Идея генеративного изготовления прототипов, как показало время, оказалась исключительно продуктивной. Об этом свидетельствует то большое количество генеративных способов, которое на сегодня предложено рынку технологий. Определяющей тенденцией их развития является стремление интегрировать Rapid Prototyping, Rapid Tooling и Rapid Manufacturing, т. е. максимально использовать все преимущества идеологии генеративного изготовления для скорейшего получения макроизделия – нового прототипа, оснастки и конечного продукта.

Наиболее универсальна лазерная стереолитография, обеспечивающая надежное получение 3D объектов многостороннего назначения:

- конструкторские и дизайнерские прототипы при создании макетов изделий, в том числе в сборе; возможность осуществления принципа дизайна уже на этапе виртуального прототипирования (рис. 3.55), в твердотельном варианте возможна визуализация газо- и гидродинамических потоков внутри моделей, тепловых полей и полей напряжений в деталях и их соединениях;
- формообразующая оснастка при различных видах точного литья, а также оснастка из других материалов по созданным моделям;
- мастер-модели при изготовлении электродов для электроэрозионной обработки;
- реконструирование и воссоздание различных объектов по данным координатно-измерительных машин и других видов зондирования трехмерных объектов, по данным компьютерных томографов для целей архитектуры, машиностроения, археологии, криминалистики, медицины, в частности, создания биосовместимых имплантантов.

Перечисленное указывает на объективную необходимость интеграции ускоренного прототипирования, ускоренного создания инструментального обеспечения и ускоренного изготовления конечного продукта в рамках единой технологии. Но именно SL технология демонстрирует тот факт, что геометрические, физические, механические и др. свойства 3D RP моделей в ряде случаев еще отстают от свойств аналогичных изделий, полученных традиционными методами. Выравнивание этих различий достигается путем последующих доработок – постпроцессов. Именно это обстоятельство объективно обуславливает интеграцию Rapid Prototyping,



Rapid Tooling, Rapid Manufacturing. В то же время именно это обстоятельство требует тщательного анализа при выборе базового способа генеративных технологий и интегрируемых с ним других процессов.

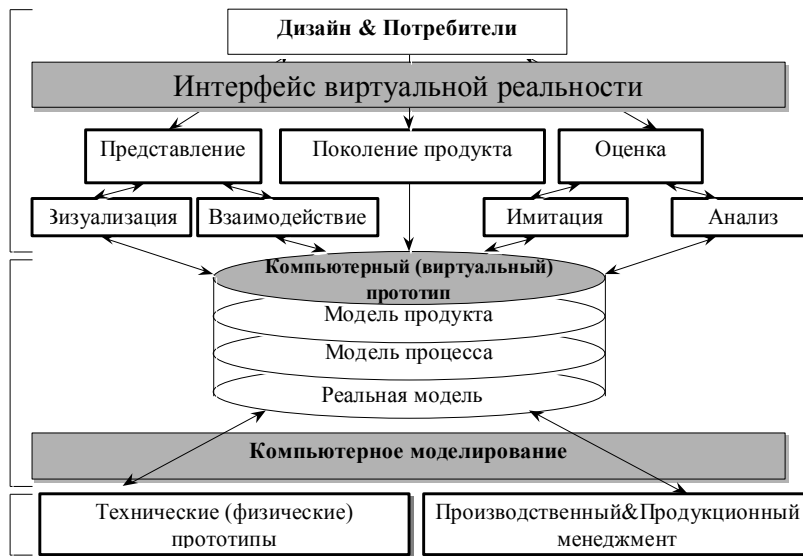


Рисунок 3.55 – Структурная схема дизайна на стадии виртуального прототипирования

Концептуальной отработке идеи продукта способствует создание дизайн-прототипов на виртуальном и реальном уровнях. На этом этапе преимущество отдается таким способам, как многоструйное моделирование, высокоточное моделирование, 3D принтерный способ, 3D восковой печати и др.

На этапе создания геометрических прототипов, когда оценивается форма, размеры, а свойства материалов не имеют значения, более эффективны способы стереолитографии, лазерного селективного спекания, LOM и FDM технологии.

Функциональные прототипы, требующие изготовления из материала конечного продукта, преимущественно изготавливают по способам спекания листовой модели и постпроцессов – вакуумного литья, литья под давлением и др.

Технические прототипы и опытная партия изготавливаются способами, обеспечивающими все функциональные, эстетические и экологические свойства конечного продукта. В этом плане серьезное внимание уделяется генеративным способам, которые напрямую обеспечивают получение конечного продукта с наперед заданными свойствами без последующей обработки. Например, способ Selectiv Laser Powder Remelting (SLPR).

Еще одной важной предпосылкой, своеобразным катализатором создания интегрированных генеративных технологий является 3D CAD моделирование. При этом конечный результат, а, значит, ожидаемая прибыль от применения 3D CAD моделирования принадлежит заказчику.

Изложенное позволяет представить обобщенную структуру высоких интегрированных технологий (рис. 3.56), базирующихся на генеративной технологии ускоренного прототипирования, ускоренного изготовления инструментального обеспечения, ускоренного изготовления конечных изделий (RPTM).

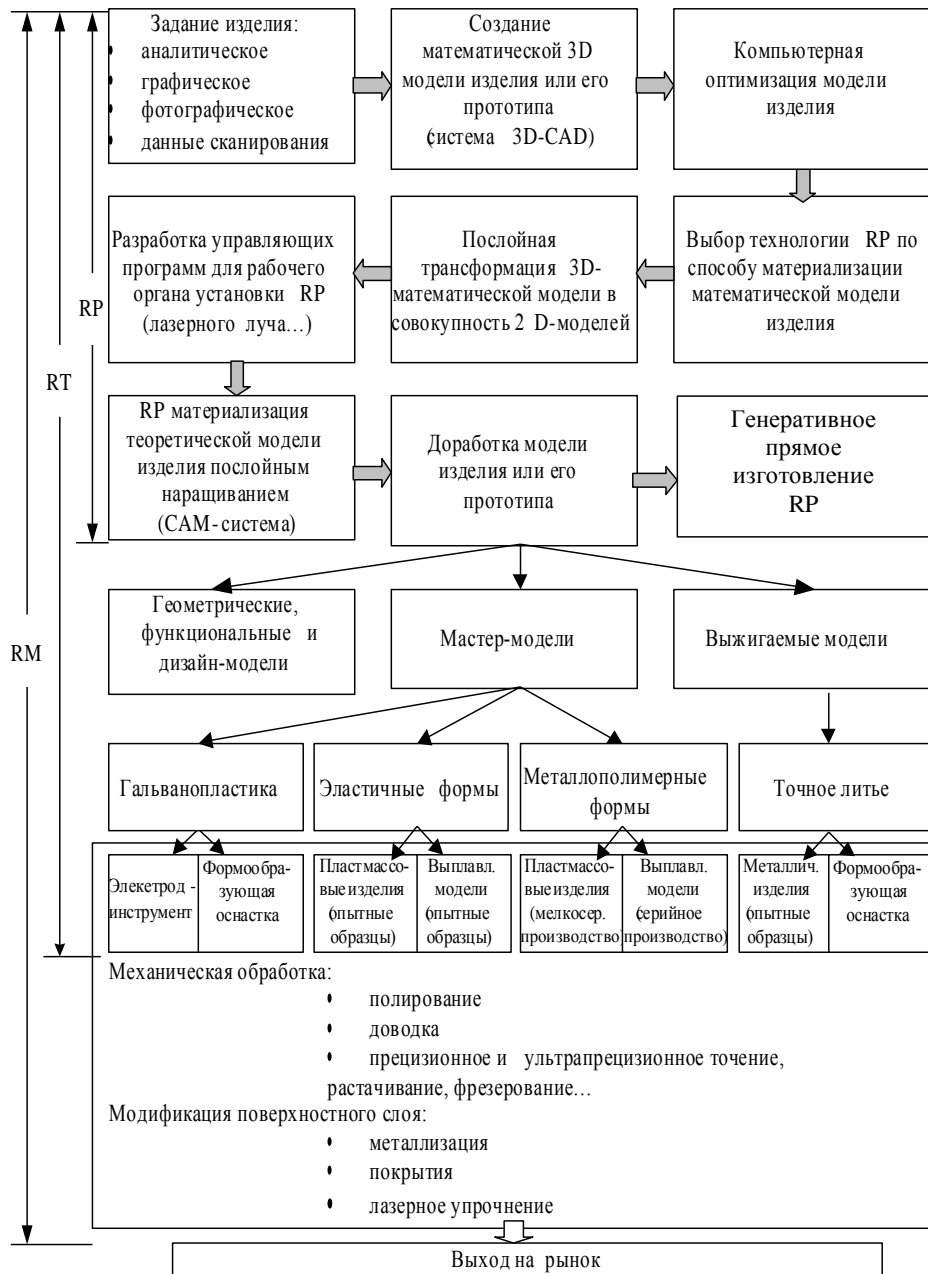


Рисунок 3.56 – Обобщенная структура высоких интегрированных технологий на базе RP, RT, RM

Здесь к рассмотренному выше добавим понятие прямого и непрямого изготовления собственно изделия на этапе материализации 3D CAD модели. Такими генеративными способами, как SLS, FDM, SLPR и др. можно обеспечить изготовление изделий на уровне конечного продукта.

Непрямое изготовление реализуется через мастер-модели и др. по технологии литья, гальванопластики и т. д. На завершающем этапе используются методы модификации материала поверхностного слоя – имплантация, покрытия, металлизация, лазерное упрочнение и т. д., или процессы финишной механической обработки – полирование, доводка, выглаживание, прецизионное и ультрапрецизионное точение, растачивание, фрезерование.

Имеющаяся научно-техническая информация позволяет заключить, что развитие и расширение интегрированных технологий на базе генеративных способов характеризуется высокой динамикой, разработкой все новых стратегий и концепций, новых методов и их комбинаций.

### **3.18 Инструментальное оснащение и производство оснастки и изделий – Rapid Tooling и Rapid Manufacturing**

*В рамках единой концепции интегрированных технологий ускоренного формообразования генеративное изготовление оснастки, инструмента - Rapid Tooling и генеративное производство изделия - Rapid Manufacturing являются важнейшими этапами, во многом определяющими эффективность реализации идеологии послойного выращивания.*

Процессы Rapid Tooling (RT) и Rapid Manufacturing (RM) идентичны Rapid Prototyping и основаны на одних и тех же принципах. Rapid Tooling предлагает получение технологических инструментальных средств посредством формирования их первичными моделями послойного выращивания.

*Под «оснасткой и инструментами» понимают те технологические компоненты, которые будут использоваться как форма для различного вида литья или последующих технологий (гальванопластика, покрытия и др.) получения готовой продукции.*

*Цель технологии Rapid Tooling состоит в компьютерном моделировании элементов оснастки и ее изготовлении, автоматическом использовании свободного процесса наращивания материала, который относится к генеративному типу.*

Непосредственное изготовление элементов оснастки и изделий при помощи генеративных технологий позволяет адаптировать технологии,

основанные преимущественно на работе с полимерами, к работе с металлами (сталь, чугун, цветные сплавы, керамика).

Rapid Tooling является только инверсией создания элементов оснастки. Тем не менее, возникают дополнительные граничные условия для генеративных процессов при проектировании и изготовлении оснастки.

Геометрические параметры литейной формы сильно отличаются от геометрических характеристик отливок. Нужно учитывать убыль, выход отливки, выталкиватели, каналы для входа и выхода воздуха, каналы для охлаждения и т. п. Создавая 3D CAD модель, нужно учитывать особенности технологии Rapid Prototyping, Rapid Tooling и конструкторско-технологические особенности создаваемой оснастки. Это требует соответствующего программного обеспечения, которое обладает, как правило, ноу-хау.

Создаваемая RT металлическая оснастка представляет собой очень сложную композиционную структуру материала, поэтому при создании сложных конструкций требуется специальный расчет тепловых и механических параметров работы изделия. Рациональную сборку такой оснастки целесообразно проводить, используя стандартные элементы.

Основные наработки в области технологии Rapid Tooling относятся к переработке пластмасс. На базе этих работ в последние годы достигнуты значительные успехи по созданию сложной оснастки для изготовления металлических деталей. Однако, путь, пригодный для получения металлических изделий, в любом случае предполагает многоступенчатые процессы – окончательное спекание, инфильтрацию, а также окончательную дорогостоящую прецизионную механическую обработку.

Процессы Rapid Prototyping, использующие металл, когда в прототипе непосредственно реализуются элементы оснастки из металла, находятся на пути дальнейшего совершенствования.

В настоящее время в мире разработано более 20 методов Rapid Tooling. Приблизительно половина из них нашла практическое воплощение, в то время как другие находятся на стадии исследования.

*Все технологии Rapid Tooling делятся на прямые и косвенные (непрямые) методы создания оснастки.*

Прямой подход означает, что RP установка строит фактическую, как правило, металлическую основу формы со всеми вставками и каналами.

Косвенные, непрямые технологии используют RP образцы, модели для создания оснастки.

По мнению специалистов в ближайшие 5-10 лет наибольший коммерческий успех будут иметь прямые методы получения оснастки и деталей. Объясняется это тем, что косвенные методы имеют ряд недостатков:

- требуется окончательная доработка образца для получения металлической оснастки, на которую уходит значительное время;
- требуется достаточно высокая точность при передаче геометрии модели к геометрии детали;
- ограниченный срок работы оснастки для большинства технологических процессов получения оснастки.

В то же время для генеративных процессов, основанных на работе с пластмассами (полимерами), существует целый ряд перспективных технологий, которые довольно эффективно решают вопросы производства элементов металлической оснастки. Доказано, что косвенные методы открывают путь к совершенствованию процесса литейного производства металлов и пластмасс.

Кроме того, необходимо помнить о широком применении генеративных технологий для дизайнерских задач и концептуального моделирования, которые, как правило, решаются с использованием стереолитографии. Получаемая для дизайна или моделирования модель выступает в данном случае готовым изделием.

Одно из направлений концептуального моделирования – это создание с помощью стереолитографического процесса моделей и макетов для аэродинамических испытаний.

Опыт показывает, что по точности, прочности и шероховатости поверхности наиболее эффективны для использования в качестве аэродинамических моделей прототипы, полученные методом стереолитографии.

Получаемые полимерные модели имеют в 30÷40 раз большую прочность, чем модели, изготовленные из древесины. Важным достоинством полимерных моделей перед деревянными является отсутствие расслоения.

Полимерные модели, изготовленные с помощью технологии лазерной стереолитографии, можно испытывать в аэродинамической трубе при высоких скоростях, вплоть до сверхзвуковых.

Экономический анализ показал, что аэродинамические модели, получаемые стереолитографией, по сравнению с типовой моделью позволяют снизить трудоемкость до 20÷60%, стоимость на 25÷75%, а время изготовления на 2÷5 месяцев. При этом точность модели находится в пределах 100 мкм, шероховатость  $R_a = 2\div 5$  мкм.

Представленный пример показывает, что технология стереолитографии при концептуальном моделировании может широко применяться на начальных этапах разработки аэрокосмической техники, двигателей, автомобилей, поездов и других сложных, наукоемких машин.

Стереолитография широко используется для решения вопросов дизайна новых изделий.

Логическим завершением интегрированных технологий на основе Rapid Prototyping и Rapid Tooling является *технология Rapid Manufacturing, которая включает в себя современные процессы механической обработки и модификации поверхностного слоя деталей.*

В постпроцессах находят распространение новейшие технологии, где используется высокоскоростное оборудование, реализующее 5-и координатную обработку, позволяющее обрабатывать «заготовки» с «поднутрением» при постоянстве базы крепления, получать точность до 0,001мм.

### **3.19 Методы прямого изготовления**

*Прямые методы Rapid Tooling дают возможность производить оснастку, увеличив ее работоспособность до десятков тысяч циклов, и представляют собой хорошую альтернативу традиционным методам производства литейных форм. Это делает область применения прямых RT процессов очень широкой, охватывая производство прототипа оснастки, экспериментального и промышленного образцов оснастки и деталей. Прямые процессы RT могут быть разделены на две основные группы.*

Первая группа включает в себя менее дорогостоящие методы с коротким процессом производства, которые соответствуют небольшому сроку службы оснастки. Такая оснастка способна тиражировать малые серии деталей до 200 шт.

Вторая группа основана на RP методах, позволяющих создавать оснастку для среднесерийного промышленного производства. Создатели RP оборудования называют создаваемые технологические методы производством «твердой оснастки». В настоящее время технология производства «твердой оснастки» в большинстве своем основана на спекании порошков металла.

### **3.19.1 Оснастка, изготовленная по способу стереолитографии – инжекционная литейная форма**

Непосредственное, прямое получение оснастки, полученное методом стереолитографии, пока не нашло широкого применения. С помощью специальных приемов на стереолитографической установке изготавливаются элементы литейной оснастки. Как известно, инжекционная система работает на принципе впрыска материала в литейную форму, поэтому в САД модель добавляют вентильные затворы и инжекторные очищающие отверстия. После изготовления на стереолитографической установке и удаления опор оснастка шлифуется. Для повышения теплопроводности формы часть вставок покрывается тонким слоем меди. Данная технология используется при изготовлении изделий малыми сериями (до 200 шт).

### **3.19.2 Оснастка, изготовленная по способу слоистых объектов (LOM)**

LOM оснастка для литейных форм строится из тонких слоев металла или специальной бумаги. Данная технология имеет значительные ограничения по параметрам формообразования и отличается низкой шероховатостью ( $R_a = 20 \div 35$  мкм). Литейные формы, построенные по этому способу, могут использоваться для деталей из термопластов с низкой температурой плавления. Оснастка не может быть использована для вакуумного литья, литья под давлением. В настоящее время разрабатываются специальные материалы, способные значительно повысить адгезионные процессы схватывания между слоями при производстве LOM оснастки.

### 3.19.3 Оснастка, изготовленная по способу селективного лазерного спекания (SLS)

В настоящее время существующие технологические установки для SLS традиционно ориентированы на связующие типа: воск, нейлон, поликарбонат, акрилбутадиенстирол. Выбор перспективных порошковых композиций для SLS, в основном, идет в направлении, дающем возможность реализовать процесс жидкофазного спекания при лазерном воздействии. В таких случаях порошковая композиция представляет собой смесь двух и более порошков с различными температурами плавления. При спекании легкоплавкая фаза растекается по границам зерен тугоплавкой фазы и, кристаллизуясь, выступает в роли связки, которая придает прочность обработанной лазером области спекания. Выращенные в результате послойного синтеза трехмерные объекты – полуфабрикаты, требующие последующей доработки (например, отжига в печи, инфильтрации наполнителем и т. п.). Поэтому наряду с поиском новых перспективных для SLS порошковых систем и расширением функциональных возможностей синтезированных изделий целесообразно идти не только по пути использования новых композиционных материалов, но и совмещения процесса лазерного спекания с другими процессами.

Полученная оснастка, как правило, используется в технологии литья по выплавляемым моделям.

Рассмотрим наиболее известные процессы получения оснастки по технологии селективного лазерного спекания.

*Технология Laser Form.* Технология реализуется при помощи процесса селективного лазерного спекания (SLS), где используется дисперсный порошок из частичек нержавеющей стали, покрытых термопластическим связующим веществом.

Технология Laser Form может быть разделена на две основные стадии.

Во время первой стадии («неотвержденный материал») оснастка строится послойно путем плавления связующего вещества в машине SLS. На второй стадии (цикл отжига) неотвержденная деталь превращается в целиком плотную металлическую деталь путем инфильтрации расплавленной бронзы. Во время отжига в интервале температур 450÷650°C полимер испаряется и при температуре 700°C начинается спекание оставшегося стального порошка. Затем оснастка нагревается до температуры 1070°C, когда происходит инфильтрация (проникновение по капиллярным и субкапиллярным порам и



другим пустотам) бронзы, вызванная капиллярным эффектом. Чтобы избавиться от окисления поверхности стали, вся обработка происходит в среде азота. Элементы оснастки LaserForm состоят на 60% из стали и на 40% из бронзы. Далее используются финишные операции, включающие скоростное фрезерование, шлифование, полирование и гальваническое покрытие поверхности.

*Технология EOS DirectTool.* Этот процесс использует соответствующие металлические порошки, которые селективно спекаются в специально разработанной для этого установке. Спекаемые детали – пористые и они обычно должны подвергаться инфильтрации с помощью эпоксидной смолы для повышения их прочности. После инфильтрации требуется дальнейшая полировка поверхностей детали, чтобы достичь качества, необходимого для инъекционных литейных вставок. Процесс главным образом используется для производства сложных вставок оснастки.

*Технология Самарского филиала Физического института РАН.* Авторами разработки предложены новые порошковые смеси – металлополимерные, биметаллические, склонные к реакции самораспространяющегося высокотемпературного синтеза интерметаллидов, что существенно расширяет возможности SLS. Принципиальная новизна состоит в том, что при лазерном воздействии на порошковые смеси наряду с процессом селективного жидкофазного спекания происходят такие процессы, как лазерная пайка и контролируемая реакция самораспространяющегося высокотемпературного синтеза интерметаллидов. Возможность совмещения технологических процессов и одновременно синтез новых структурно-фазовых соединений в формируемом изделии – это наиболее интересные характеристики, т. к. дают исследователю определенную свободу при модификации физико-механических свойств создаваемых инструментов и оснастки.

В качестве исходных материалов применяются разработанные композиции на основе никеля и бронзы с полимерным связующим (полиамид, поликарбонат), найдены оптимальные характеристики смесей и режимов спекания.

Поскольку предполагается, что синтезируемые объекты можно рекомендовать в качестве моделей для литья малогабаритных изделий сложного профиля, следует ожидать, что при эксплуатации они должны выдерживать как можно большее число циклов изготовления литейной формы, не разрушаясь и не изменяя первоначальных размеров. Таким

образом, испытания на растяжение-сжатие, температурные деформации при нагреве-охлаждении, шероховатость поверхности, наконец, точность воспроизведения при спекании самого трехмерного изделия по его компьютерному образцу следует считать определяющими для изделий.

Дополнительные возможности повышения прочности моделей и снижения шероховатости без потери формы за счет инфильтрации пор каким-либо наполнителем предполагают изучение также пористости и проницаемости синтезируемых объектов.

Сравнение физико-механических свойств полученных моделей и традиционно используемых из акриловых пластмасс показало возможность использования SLS процессов. Так, для разработанных моделей предел прочности на сжатие равен  $50 \div 75$  МПа, модуль Юнга  $250 \div 400$  МПа, относительная деформация  $11 \div 33\%$ . Установлено, что волнистость поверхности не превышает исходной дисперсности порошковой фракции. С учетом возможности создания сложноконтурных изделий преимущества этой технологии становятся более ощутимы.

В табл. 3.12 приведены результаты ускоренного производства оснастки различными прямыми методами Rapid Tooling.

Таблица 3.12 – Показатели производства оснастки прямыми методами Rapid Tooling

Технологический процесс и используемый материал	Точность воспроизведения модели/отливки	Шероховатость, $R_a$ , мкм	Количество литейных циклов
Стереолитография SL (смола SL5170)	0,7/0,7	$3 \div 12,5$	$2 \cdot 10^2$
Селективное лазерное спекание SLS (поликарбонат)	2,1/0,8	$3 \div 12,5$	$10^1 \div 10^5$
Технология оплавлением FDM (воск)	1,8/0,8	$5 \div 12,5$	$1,5 \cdot 10^3$
Технология слоистого объекта LOM (бумага)	1,6/1,7	$5 \div 12,5$	$(2 \div 5) 10^1$

Приведенные результаты показывают, что *технология селективного лазерного спекания металлических порошков позволяет синтезировать объемную оснастку, не уступающую по своим характеристикам моделям, изготовленным из традиционных материалов, и может применяться для серийного производства.*

### **3.19.4 Оснастка, изготовленная по способу трехмерной печати (3DP)**

*Изделие строится с использованием слоев порошка на подложке. Селективное соединение частиц происходит связующим веществом, разбрызгиваемым через сопло специального принтера. После завершения построения лишний порошок, который поддерживал модель, удаляется, оставляя сформированную оснастку.*

Для построения вставок оснастки используют порошок нержавеющей стали, вольфрам, карбид вольфрама. Производство металлической оснастки включает следующую последовательность:

- построение детали путем соединения порошка и связующего вещества с применением процесса 3DP;
- спекание детали в печи для повышения прочности;
- инфильтрация деталей со сплавами при низкой температуре плавления для увеличения плотности модели.

Процесс 3 DP может быть легко адаптирован для различных материалов с последующим получением сложных композиций.

*Технология топографического образования формы (TSF) весьма похожа на процесс 3DP. Детали строятся путем поочередного наложения слоев силикатного порошка и регулируемым разбрызгиванием парафина из сопел, перемещаемых в 3D координатах рабочей области. Воск связывает порошок для образования новых слоев детали, а также частично подвергает размягчению предыдущий слой, чтобы обеспечить хорошую взаимную связь. Как только деталь построена, на нее наносится песок, она покрывается воском и затем используется в качестве литейной формы. Используемые материалы включают цемент, стеклоткань и расширяющуюся пену.*

### **3.20 Методы непрямого изготовления**

*Непрямые методы являются альтернативными по отношению к многочисленным традиционным методам создания оснастки и инструментов. Их главное преимущество – это возможность получения оснастки любой сложности за короткий промежуток времени. При этом заполняется технологическая ниша между RP технологиями и жесткой оснасткой, которая получается прямыми генеративными методами.*

Как правило, оснастка, изготовленная непрямыми методами, способна к непродолжительному циклу производства. Тем не менее,

многие не прямые методы осуществили значительный прогресс в технологии производства оснастки и деталей. Большинство этих решений находится на уровне «ноу-хау».

### 3.20.1 Литье в песчаные формы

В настоящее время одним из основных способов изготовления отливок, как и прежде, остается литье в песчаные формы. Этот процесс отливки часто применяется для производства относительно больших металлических заготовок с низкими требованиями к качеству поверхности.

В Харьковском центре верификационного моделирования разработан оригинальный вид литейной оснастки – модельный модуль, который базируется на процессе стереолитографии. Технология стереолитографии позволяет отойти от традиционного модельного комплекта, который включает в себя:

- модель с подмодельной плитой;
- литниковый куст, который крепится к подмодельной плите;
- стержневой ящик.

Разработанный модельный модуль позволяет эффективно решить проблемы литья в песчаные формы, значительно увеличив качество отливок при ощутимой экономии жидкого металла.

Модельный модуль, изготовленный RP технологией на стереолитографической машине, состоит из:

- единого основного формообразующего элемента;
- дополнительных элементов оснастки.

*Модельный модуль, выполняющий формообразующие функции модели с подмодельной плитой, формирует наружный контур изделия и перпендикулярно расположенные стержни с необходимыми фиксирующими элементами. Это позволяет при сборке оснастки значительно уменьшить несоосность между моделью и стержнями, и таким образом снизить припуски на механическую обработку.*

Дополнительные элементы позволяют выполнить разъем любой степени сложности.

Модельный модуль, выполняющий функции стержневого ящика, состоит из формообразующего элемента заготовки, но с противоположной стороны.

Фиксирующие элементы для перпендикулярно расположенных стержней позволяют собрать модуль с минимальными погрешностями формы и расположения.

Разработанная технология литья в песчаные формы на основе модельных модулей, полученных стереолитографией, позволяет значительно (на 30÷40%) повысить точность отливки, снизить шероховатость, значительно сократить объем механических операций.

Применение литья под низким давлением для модельных модулей обеспечивает экономию жидкого металла до 60÷70% за счет отсутствия литниковой системы.

### **3.20.2 Точное литье по выплавляемым и выжигаемым моделям**

*Литье по выплавляемым моделям является высокотехнологическим промышленным видом производства готовых деталей или заготовок, максимально приближенных к окончательным размерам. Этот вид литья является экологически целесообразным при отливке деталей очень сложной конфигурации, которые требуют многооперационной механической обработки, например, лопатки газовых турбин, детали двигателей, автомобилей и др. Этим способом можно получать отливки с толщиной стенки до 0,3 мм и отверстия в любом направлении до 2 мм, качества точности IT8-IT9.*

Технологический процесс изготовления опытных партий по выплавляемым моделям с использованием стереолитографии следующий:

- создание трехмерной математической модели (3D CAD модели);
- изготовление модели на установке стереолитографии SLA;
- изготовление эластичной силиконовой формы;
- литье восковых моделей на установке литья в вакууме с использованием подогреваемой чашки;
- формирование «оболочки» с использованием гипса или жидких керамических материалов на алюминиево-циркониевой или кремнеземной основе;
- термообработка оболочки с одновременным удалением воска; для удаления воска можно использовать автоклав, на практике рекомендуется также удаление «открытым огнем»;
- заливка расплавленного металла;
- разрушение оболочки механическим способом, водяной струей;
- удаление литниковой системы;

- механическая доработка детали.

Модели обычно изготавливают из легкоплавких материалов – стеарин, парафин, воск.

Использование моделей по технологии Quick Cast снижает стоимость и время изготовления путем исключения производства оснастки, необходимой для отливки восковых моделей. Выжигаемая стереолитографическая модель – замкнутая тонкая (толщиной  $0,5 \div 0,7$  мм) оболочка строится на установке SLA по специальному алгоритму. Такая конструкция модели позволяет обеспечить низкий коэффициент заполнения материалом модели ( $0,15 \div 0,2$ ).

Для уменьшения растрескивания керамических литейных форм при выплавлении модели и снижения количества коксового остатка целесообразно применять пустотелые модели (имеющие меньшую плотность) и обеспечить рациональный режим прокаливания: скорость прокаливания, состав газовой фазы, давление, которые должны изменяться по определенному закону.

Соблюдение всех технологических требований технологии позволяет реализовать процесс точного литья по выжигаемым моделям и обеспечить значительное снижение времени технологического цикла.

### **3.20.3 Литье в эластичные силиконовые формы**

*Литье в вакууме в эластичные формы – это процесс получения опытных образцов и небольших партий пластмассовых и восковых деталей любой сложности и габаритов без изготовления стандартной оснастки.*

*Благодаря использованию широкой гаммы материалов отливаемые копии могут быть эластичными, жесткими, термостойкими, ультрафиолетостойкими, прозрачными или иметь различные цвета.*

Принцип изготовления деталей по технологии литья в эластичные формы заключается в точном копировании стереолитографической модели. Модель удаляется из силиконовой формы после разреза формы по разделительным поверхностям. Заливка литьевой смолы производится в вакуумной камере установки.

Технология литья в эластичные силиконовые формы в вакууме позволяет:

- получить точные копии мастер-модели со стабильными размерами;
- проверить собираемость и работоспособность проектируемых новых изделий;

- отработать дизайн изделия;
- провести испытания до изготовления серийной оснастки;
- изготовить партию опытных образцов в течение нескольких часов после изготовления силиконовой формы;
- получить модели из воска для мелкосерийного литья металлических деталей.

Основные преимущества данной технологии:

- сложные поверхности, мельчайшая конфигурация детали и любые текстуры полностью воспроизводятся эластичной или силиконовой формой;
- готовые опытные образцы деталей могут быть получены уже через несколько дней, для получения копий можно использовать самые различные материалы;
- высокая точность изготовления образцов позволяет реально оценить собираемость и работоспособность сложных изделий и при необходимости быстро осуществить соответствующие доработки.

### **3.20.4 Центробежное литье**

Центробежным литьем в технологии Rapid Tooling является процесс получения отливок путем заливки металла или пластмасс во вращающуюся силиконовую форму (изложницу).

*При центробежном литье жидкий материал, заливаемый во вращающуюся форму, распределяется по внутренней поверхности формы под действием центробежных сил и застывает, образуя заготовку. Этим способом можно получать отливки из цинка, свинца, алюминия и терморезистивных пластмасс.*

Мастер-модель обычно получают методом стереолитографии. Для изготовления литейной формы применяют силиконовые формовочные материалы, вулканизирующиеся под действием тепла. Они обеспечивают большой срок службы форм при литье высокопрочных алюминиевых и цинковых сплавов. При литье терморезистивных пластмасс эти материалы обеспечивают высокую устойчивость форм к нагреву и химическим реакциям, возникающим при полимеризации терморезистивных пластмасс.

Материал для формы выбирают в зависимости от условий ее применения: температуры литья, точности получаемого изделия, сложности формы и срока ее службы.

Центробежное литье в технологии Rapid Tooling – относительно дорогой, но высокопроизводительный процесс получения заготовки.

### 3.20.5 Гальванопластика

В настоящее время отработана экспериментальная технология получения формообразующих вставок пресс-форм с использованием методов гальванопластики и нанесением износостойкого покрытия на основе электролитического железа высокой поверхностной твердости.

Процесс включает несколько этапов:

- создание стереолитографической модели оснастки на установке SLA 5000 (например, матрицы и пуансона пресс-формы);
- используя метод гальванопластики, последовательно наносятся электропроводные слои азотнокислого серебра, меди или декоративный слой никель-кобальта, имеющие достаточные прочностные характеристики и одновременно обладающие хорошими декоративными свойствами;
- нанесение износостойкого покрытия на основе электролитического железа высокой поверхностной твердости при комнатной температуре, что позволяет сохранить форму и размеры стереолитографической модели, повысить ресурс работоспособности; наносимая толщина слоя металла до 2 мм, твердость HRC 58-70, скорость осаждения 0,25 мм/час, шероховатость поверхности соответствует исходной поверхности модели;
- полученную таким образом прочную оболочковую форму заливают композитом на основе эпоксидной смолы и металлического порошка, мелких стальных шариков с полимерным связующим; получается достаточно жесткая работоспособная формообразующая оснастка.

Далее выполняется отделение стереолитографической модели от полученной оснастки путем нагревания и при необходимости осуществляется механическая дообработка.

*Преимущество данной технологии – получение отливок сложной формы при сохранении точности и шероховатости рабочих поверхностей.*

Использование представленной интегрированной технологии позволяет в 5÷6 раз сократить сроки изготовления оснастки и



инструментов по сравнению с традиционными технологическими способами (механическая обработка, электроэрозионная обработка и др.).

### 3.20.6 Процесс 3D Keltool

3D Keltool базируется на снятии слепков с прототипов, полученных при помощи стереолитографии, посредством длительной низкотемпературной агломерации специальной, обычно порошкообразной металлополимерной смеси.

Процесс объединяет в себе преимущества стереолитографии – высокую точность и хорошее качество поверхности с хорошими формовочными характеристиками мягкого силикона. По первичному прототипу создается промежуточная форма высокотемпературного литья силикона. Она заливается специальной keltool-массой из связанного полимером карбида вольфрама и инструментальной стали, не реагирующими с жесткой формой. После применения прототипа для создания первичной или вторичной формы необходим простой или двойной процесс воспроизведения.

Процесс идентичен в этом отношении процессу, при котором получаемая форма состоит из легкоплавкого металлического сплава.

Сырая порошковая смесь сохраняет прочность в процессе отверждения. В технологиях сокращенной длительности с применением водорода (температура около 120<sup>0</sup>С) под давлением удаляется закрепитель и пористая форма спекается. После этого поры заполняются медью. Подробности технологии представляют «ноу-хау».

Относительная погрешность изготовления  $\pm 0,2\%$  для мелких габаритных размеров позволяет достигнуть приемлемой точности. Достигаемая твердость HRC 44 является приемлемой, но остается на уровне, несколько меньшем HRC 50. Полученная оснастка может использоваться в соответствии с классическими методами. Получение оснастки определяется технологическим процессом от подготовки до запуска серии в зависимости от объема партии деталей.

Длительность производства прототипа при помощи стереолитографии с применением 3D Keltool-технологии составляет около 10 дней, что соответствует продолжительности изготовления оснастки с использованием различных технологий агломерации металлов. Это позволяет получать более гладкую поверхность и более точные детали. В зависимости от сложности формы можно отметить существенную

экономии времени, в частности по отношению к электроэрозионным технологиям, которая в некоторых случаях может составить 30%. Производителем указывается экономия времени 25÷40%.

Один из вариантов рассматриваемого технологического процесса позволяет при использовании карбидвольфрамовых сплавов получать электроды для эрозионной обработки с шероховатостью поверхности  $R_a = 0,4$  мкм.

### **3.21 Экономичность интегрированных генеративных технологий**

При всем разнообразии способов материализации 3D CAD моделей в идеологии генеративных технологий ряд критериев для экономической оценки целесообразности их применения одинаково важны для всех:

- изделие должно иметь сложную конструктивную форму;
- время для разработки такого изделия традиционными (конвенциональными) способами должно быть достаточно продолжительным;
- предпочтительным является большое разнообразие вариантов изделия одного функционального назначения;
- необходима максимальная загрузка по времени 3D CAD системы;
- необходима специализированная подготовка персонала и наличие соответствующей мотивации его деятельности;
- необходимо располагать соответствующими исчерпывающими знаниями о сущности, преимуществах и недостатках существующих (доступных) генеративных технологий, а также возможность мобильной передачи такой информации потенциальному потребителю или заказчику.

Исходный вопрос, требующий ответа: какой должна быть экономия времени на создание продукта, чтобы применение генеративной технологии было выгодным и каким образом можно сократить время на создание продукта, используя принцип выращивания изделия «от малого к большому» через моделирование без использования чертежей.

Экономический эффект от использования генеративных технологий вместо традиционных можно оценить, только рассматривая весь процесс в контексте конкурентной стратегии производителя.

Практика свидетельствует о том, что конкурентные стратегии, базирующиеся на факторе времени и финансов, существенно (в 1,75-2,5) эффективнее, чем, например, технология фрезерования.

Отправной точкой является перечень требований, которым должно отвечать изделие: точность, качество поверхности, материал, свойства материала, постпроцессы, изготовление инструмента.

Точность, обеспечиваемая установкой, определяется главными факторами:

- особенностями установки;
- принципом генерирования слоев;
- материалом;
- позиционированием в рабочей камере.

Немаловажную роль играет качество 3D CAD модели, потери качества при передаче данных, структура поддержек, а также человеческий фактор. Последний важен на всех этапах процесса, не взирая на высокую степень автоматизации.

Каждый пользователь установок послойного выращивания изделий должен разрабатывать подробную структуру затрат, имея в виду, например, также расходы постоянные и переменные.

К переменным относят:

- расходы на материал;
- эксплуатационные расходы (энергия, ремонт);
- затраты на переработку.

К постоянным относят:

- инвестиционные затраты основные;
- инвестиционные затраты побочные;
- затраты на техническое обслуживание;
- расходы на аренду;
- расходы на персонал.

Расходы на материал включают расходы на закупку сырья, материалов, на подготовку материалов к технологическому процессу, на погрузочно-разгрузочные работы, кондиционирование воздуха, пескоструйные аппараты, технологические газы, устройства для переработки отходов.

Следует иметь в виду, что все материалы для генеративных технологий дорогие. Расходы на электроэнергию не столь значительны, т.к. потребляемая мощность большинства установок составляет 0,5-6 кВт, за исключением некоторых – LENS, TPUMPF, DMD.

Затраты на потребительские товары и изделия могут быть существенными: связующие вещества, картриджи, печатающие головки, сопла, платформы. Сюда можно присовокупить и лазеры, служба которых составляет 2500-8000 часов в год. Это означает, что один раз в год лазер и лампы необходимо заменить.

Расходы на ремонт относят на такие части установок, как сканеры, датчики, нагревательные элементы, клапаны.

Фиксированные расходы связаны с инвестициями, техническим обслуживанием и ремонтом, занимаемой площадью и оплатой персонала.

Инвестиции идут на приобретение установок и обслуживающих структур – компьютерного оборудования, программного обеспечения, интерфейсов, кондиционирования воздуха. Цены на установки в настоящее время достигают 10000 -1 млн. евро.

Годовые расходы на обслуживание могут составлять до 20% от покупной цены установки.

Помещения (занимаемая площадь) зависят от типа установки – от «настольной» до отдельной комнаты с кондиционированием, а также помещения для специальных систем – фильтров, вытяжек, химических шкафов и др.

Персонал, непосредственно занятый генеративным производством, должен иметь специальную подготовку и навыки – CAD/CAM специалисты, операторы, конструкторы. Производитель установок обязан проводить соответствующее обучение и периодическую переподготовку.

Использование рабочего пространства камеры (SLS, SLA) во многом зависит от заполнения площади платформы (X-Y) и высоты изделия (Z). Правильная ориентация и разделение изделия на примерно равновысокие части позволяет существенно сократить время выращивания, а, значит, и расходы.

Расходы материалов, например, для одних и тех же изделий не одинаковы. Способ LLM (LOM) сопровождается значительными потерями материала в сравнении с SLS или SLA. В тоже время по этому показателю способы LLM Polymer printing имеют преимущества при изготовлении

массивных деталей. Потери материала свойственны всем способам, реализующим генеративный принцип с наличием технологических опор, их удаление вручную с последующей очисткой.

Скорость создания изделия (выращивания) определяется прежде всего скоростью роста по оси Z. Она составляет от 10 до 20 мм/час для различных установок и материалов. При этом различия технологий для разных материалов (нейлон-поликарбонат) могут быть более значительными, чем для неодинаковых систем, например, SLS и SLA (см. табл. 3.13).

Таблица 3.13 – Сравнение рабочих этапов технологий SLA и SLS

п/п	Стереолитография	Селективное лазерное спекание
1	Предварительный нагрев лазера	Пополнение запаса порошка
2	Пополнение запаса смолы	Заложение весовой основы
3	Генерирование детали	Выравнивание порошка
4	Освобождение от смолы	Атмосфера инертного газа
5	Извлечение детали	Обеспечение рабочей температуры
6	Очищение детали	Генерирование детали
7	Удаление опор	Снижение температуры до комнатной
8	Окончательная обработка детали	Извлечение детали из станка
9	Окончательная очистка	Удаление излишков порошка
10	Соединение частей детали	Окончательная обработка детали

К проблеме экономичности имеет отношение и сфера услуг. Например, не предусмотренный простой установок, отсутствие запасных частей. Вызов техников-специалистов занимает много времени и дорого обходится потребителю.

Эффективность использования установок можно оценить, сравнивая собственное производство и закупку готовых изделий у поставщиков.

Достоинства собственного производства:

- готовые детали тотчас реализуются;
- в случае высокой прибыли можно полностью реализовать доход;
- при разработке деталей возможны ноу-хау, важные для конкуренции на рынке.

Преимущества заказа изделия изготовителям:

- заказчик свободен в выборе конкретной генеративной технологии;
- возможен выбор оптимального варианта;
- заказчика интересует лишь конечное время изготовления изделия;
- не требуется специальная подготовка персонала и сам персонал;
- исключается необходимость инвестиций;
- нет необходимости обеспечивать постоянное обслуживание установок;
- нет необходимости специальных помещений для хранения материалов и др.

Таким образом, разовое или не регулярное изготовление сложных изделий экономически целесообразно обеспечивать путем размещения заказов в центрах генеративных технологий.

Решение о приобретении и эксплуатации установок должно приниматься с учетом анализа и оценки всех факторов, влияющих на конечную стоимость, срок изготовления, качество и стоимость.

### **3.22 Потенциал и перспективы развития**

Быстрое освоение генеративных технологий послойного выращивания изделий и расширения областей их использования определяется мощным потенциалом собственно принципа «от малого к большому» и физических основ способов материализации 3D CAD моделей. Объемы работ, выполняемых на установках Rapid Prototyping, быстрыми темпами возрастают в промышленном производстве, в поле визуализации 3D CAD моделей (переход от виртуальных объектов к твердотельным), в медицине (имплантаты и др.), в области дизайна, искусства, архитектуры, археологии.

Изготовление моделей не требует вовсе или очень малого количества данных технической подготовки и в любом случае не требует вовсе или в очень малых объемах ручной обработки. Возможности имеющихся на рынке установок вполне удовлетворяют требованиям моделирования и изготовления. Поэтому будущее развития во многом связано с разработкой материалов для генеративных технологий. Это позволяет оптимизировать не только параметры модели и способы материализации CAD моделей, но и оптимизировать используемые материалы.

Одним из определяющих направлений развития генеративных технологий является изготовление миниатюрных изделий. Миниатюризация заявила о себе уже в конце прошлого века как важная тенденция в создании машин, приборов, операторов, таящая в себе огромный потенциал ресурсосбережения, быстрого действия, расширения эффективного использования различных физических эффектов и т. д.

Интеграция двух потенциалов – генеративных технологий и миниатюризации – сулит трудно предсказуемые масштабы нового производства и услуг. Уже сегодня существуют производства микродеталей с диапазоном размеров от 10 до 100 микрометров. При известных преимуществах лазерной стереолитографии микропроизводство коснулось, прежде всего, синтетических материалов, но все больше и больше появляется сообщений об изготовлении микродеталей из металлов и керамики на базе использования лазерного плавления (SLM), избирательного лазерного спекания и др.

Лазерное плавление SLM-SLS реализует газонепроницаемые порошки металла и керамики размерами ниже 100 мкм.

Развитие генерирующих установок будет идти по пути сокращения ручного труда и уменьшения доводочных работ (постпроцессов). С помощью SLM технологии деталь генеративно строится послойно из порошка (сферических частиц) с диаметром менее 50 мкм.

Условием получения плотной микроструктуры являются однородно наплавленные валики (след лазерного луча), т. е. локальное пятно лазерного луча перемещается в соответствии с параметрами процесса (мощность лазера, диаметр луча, скорость перемещения по заданной траектории), при этом часть энергии поглощается исходным порошком, а часть – расплавляемыми валиками (предшественниками). Под лазерным пятном возникает расплавленная ванна, в которой из-за градиента температур возникает конвективное перемешивание расплава. Эффект напоминает происходящее при лазерной сварке.

Вполне реалистичным сегодня является применение SLM техники для производства микродеталей из керамического порошка, например, порошка оксида алюминия  $Al_2O_3$ . Например, размер гранул порошка – менее 30 мкм, толщина слоя – 30 мкм, применяемые скорости движения луча от 10 до 100 мм/с при мощности лазерного луча от 0,6 до 1,4 мВт/см. Стратегия экспонирования определяется таким образом, что первоначально наплавляется небольшой объем и луч перемещается вдоль

порошкового слоя с пониженным поглощением энергии, иначе расплав перегревается, начинается испарение, процесс становится не стабильным.

Обобщая, можно выявить потенциал генеративных технологий, проведя сравнение их с конвенциональными по критериям: материалы, инструменты, изделия, CAD совместимость, точность, роль ручного труда.

Исходя из учета физико-механических свойств, выбирают материал для конвенциональных технологий, т. е. с ориентацией на продукцию; генеративные технологии используют меньший спектр материалов, ориентированных на процесс.

Для конвенциональных технологий выбирается инструмент, ориентированный на продукт. Генеративные технологии не требуют «инструмента». Условный «инструмент» (луч лазера и др.) в генеративных технологиях ориентирован на процесс.

Изделие (деталь) в конвенциональном процессе часто является одной из составных частей, совокупность которых ориентирована на какой-либо процесс. Отсутствие ограничений по сложности конструкции ориентируют генеративные технологии на обеспечение функции детали.

CAD совместимость определяется в традиционных технологиях возможностью замены CAD информации NC - модулями, т.е речь идет о программировании, ориентированном на станок. Программирование в генеративных технологиях ориентировано на изделие с учетом возможностей RP установки. По точности генеративные технологии существенно уступают конвенциональным.

Генеративные технологии выгодно применять там, где детали конструктивно очень сложны, а изготовление – срочное.

### **3.23 Вопросы для самостоятельного контроля**

1. Раскройте современный смысл понятия «технология»
2. Раскройте смысл понятия «высокие технологии».
3. Приведите примеры высоких технологий.
4. Приведите классификацию интегрированных технологий в машиностроении.
5. Охарактеризуйте направления создания интегрированных технологий.
6. Какова идея генеративных технологий и их место в создании продукта?
7. Опишите концепцию трех уровней генеративных технологий.



8. Приведите классификацию уровней генеративных технологий.
9. Выполните сравнительный анализ областей использования различных уровней генеративных технологий.
10. Сформулируйте основные принципы генеративных технологий макроуровня.
11. Представьте функциональную схему технологий ускоренного формообразования.
12. Каковы основные этапы создания прототипов и изделий генеративными методами ускоренного формообразования?
13. Сформулируйте основные принципы генеративных технологий микроуровня.
14. Каковы особенности выбора технологии микроуровня?
15. Выполните сравнительный анализ групп технологий микроуровня.
16. Сформулируйте основные принципы генеративных технологий наноуровня.
17. Приведите перечень особенностей и свойств нанопокровтий, которые не наблюдаются в макрообъектах.
18. Дайте оценку использования генеративного принципа применительно к нанообласти.
19. Каковы основные тенденции в развитии машиностроительных САПР?
20. Перечислите основные особенности систем: Power Solution, Unigraphics, CATIA, Pro/Engineer.
21. Каковы основные особенности описания 3D образов изделий STL-файлами?
22. Какое место в производстве продукта от идеи до выхода на рынок занимает создание его прототипа, модели?
23. Назовите основные этапы традиционного прототипирования изделий.
24. На чем базируется идеология ускоренного изготовления изделий или их прототипов – RP?
25. Как Вы представляете структуру RP?
26. Каковы общие черты способов генеративной материализации 3D CAD моделей изделий?
27. Перечислите основные способы материализации математических моделей изделий.
28. Каковы основные принципы систематики интегрированных генеративных технологий формообразования?

29. Как группируются способы генеративной материализации по энергетическим признакам?
30. Как группируются способы генеративной материализации по материаловедческим признакам?
31. Как группируются способы генеративной материализации по технологическим признакам?
32. Как группируются способы генеративной материализации по инструментальным признакам?
33. Как группируются способы генеративной материализации по признакам формообразования?
34. Приведите примеры приложения принципов классификации к генеративным технологиям макро- и микроуровня.
35. Объясните отличие базирования от ориентации изделия.
36. Перечислите основные специфические особенности базирования при использовании процессов лазерной стереолитографии и селективного лазерного спекания.
37. Нарисуйте схему изменения величины ступеней при различной кривизне и ориентации поверхностей второго порядка.
38. Опишите общий принцип обратимой структурной декомпозиции и трансформации изделий.
39. Представьте порядок подготовки и реализации процесса построения изделия в соответствии с принципом обратимой структурной декомпозиции.
40. Охарактеризуйте общую зависимость времени полного цикла изготовления изделий генеративными технологиями макроуровня.
41. Раскройте смысл понятия «временная цепь».
42. Каковы пути сокращения времени полного цикла создания изделий генеративными технологиями?
43. Какова роль верификации при материализации 3D моделей?
44. Опишите последовательность процедуры верификации прототипов и изделий.
45. Раскройте смысл понятия «телеинженерия».
46. Какова роль телеинженерии в современных условиях?
47. Дайте обобщенную характеристику достоинств и перспектив применения интегрированного способа ускоренной материализации.
48. Нарисуйте схему обобщенной структуры интегрированных технологий на базе Rapid Prototyping, Rapid Tooling и Rapid Manufacturing.

## РАЗДЕЛ 4

### ИНТЕГРИРОВАННЫЕ ГЕНЕРАТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕХОДНОГО СМ-ММ УРОВНЯ

Объекты послойного наращивания разнообразны по масштабам и сложности формы поверхностей. Толщина слоев колеблется от нанометров до нескольких миллиметров, а покрываемые поверхности – от плоскости до поверхностей высшего порядка. С учетом возможностей способов нанесения слоев технологии послойного наращивания не поддаются четкой идентификации в рамках концепции трех уровней, что понудило рассматривать процессы на переходных уровнях. В данном разделе будут рассмотрены способы наплавки, чьи технологические возможности охватывают процессы переходного уровня.

#### 4.1 Основные понятия

*Наплавка – это нанесение слоя металла на поверхность заготовки или изделия посредством сварки плавлением. В случае применения для этой цели сварки давлением употребляют термин «наварка» (плакирование).*

*Изготовительная наплавка (наварка) служит для получения новых биметаллических (многослойных) изделий. Такие изделия состоят из основы (основной металл), обеспечивающей необходимую конструкционную прочность, и наплавленного рабочего слоя (наплавленный металл) с особыми свойствами (абразивная износостойкость, термостойкость, коррозионная стойкость и т. д.).*

*Восстановительную наплавку (наварку) применяют для восстановления первоначальных размеров изношенных или поврежденных деталей. В этом случае наплавленный металл по составу и свойствам может быть близок к основному (восстановительная размерная наплавка) или отличаться от него (восстановительная износостойкая наплавка).*

Слой металла вследствие перемешивания в процессе наплавки с основным металлом и взаимодействия с атмосферой дуги и шлаком может в той или иной степени отличаться по составу от электродного (присадочного) металла.

Эти методы реализуют принцип послойного наращивания «от малого к большому» и по этому признаку они относятся к генеративным. Их

особенностью является способность наращивать значительные объемы металлов на базовую деталь или на ее основу и по диапазону этих объемов и скорости наращивания они примыкают и к технологиям макроуровня, и к технологиям микроуровня. При всей условности деления технологий на макро-, микро- и наноуровни, методы наплавки можно отнести к переходным уровням.

Доля основного металла в наплавленном слое  $g_0$ , обычно выражаемая в процентах, колеблется в широких пределах и зависит от способа и режима наплавки:

$$g_0 = F_0 / (F_0 + F_m) \cdot 100\% ,$$

где  $F_0$  – площадь сечения слоя расплавленного основного металла,

$F_m$  – площадь сечения наплавленного металла.

Как правило, при наплавке долю основного металла в наплавленном слое стремятся свести к минимуму. Ее можно регулировать, изменяя соотношение скоростей плавления электродного и основного металлов. Величина  $g_0$  уменьшается при увеличении скорости наплавки, при применении для наплавки электродных лент или при колебательных движениях электрода.

Важной характеристикой процесса является производительность наплавки  $P_n$ , которую измеряют массой металла или площадью поверхности, наплавленных в единицу времени (кг/ч, м<sup>2</sup>/ч). Кроме производительности, способ наплавки может характеризовать толщина наплавленного слоя  $d_n$ , наносимого за один проход.

## 4.2 Классификация способов наплавки

Способы наплавки классифицируют по физическим, техническим и технологическим признакам. Наиболее распространенной и удобной является классификация по физическому признаку – по используемым источникам нагрева. По этому признаку основные способы наплавки и наварки можно разделить на три группы (рис. 4.1):

- термические (электродуговая, электрошлаковая, плазменная);
- электроннолучевая, лазерная (световая), индукционная, газовая, печная;
- термомеханические (электроконтактная, прокаткой, экструдированием);
- механические (взрывом, трением).

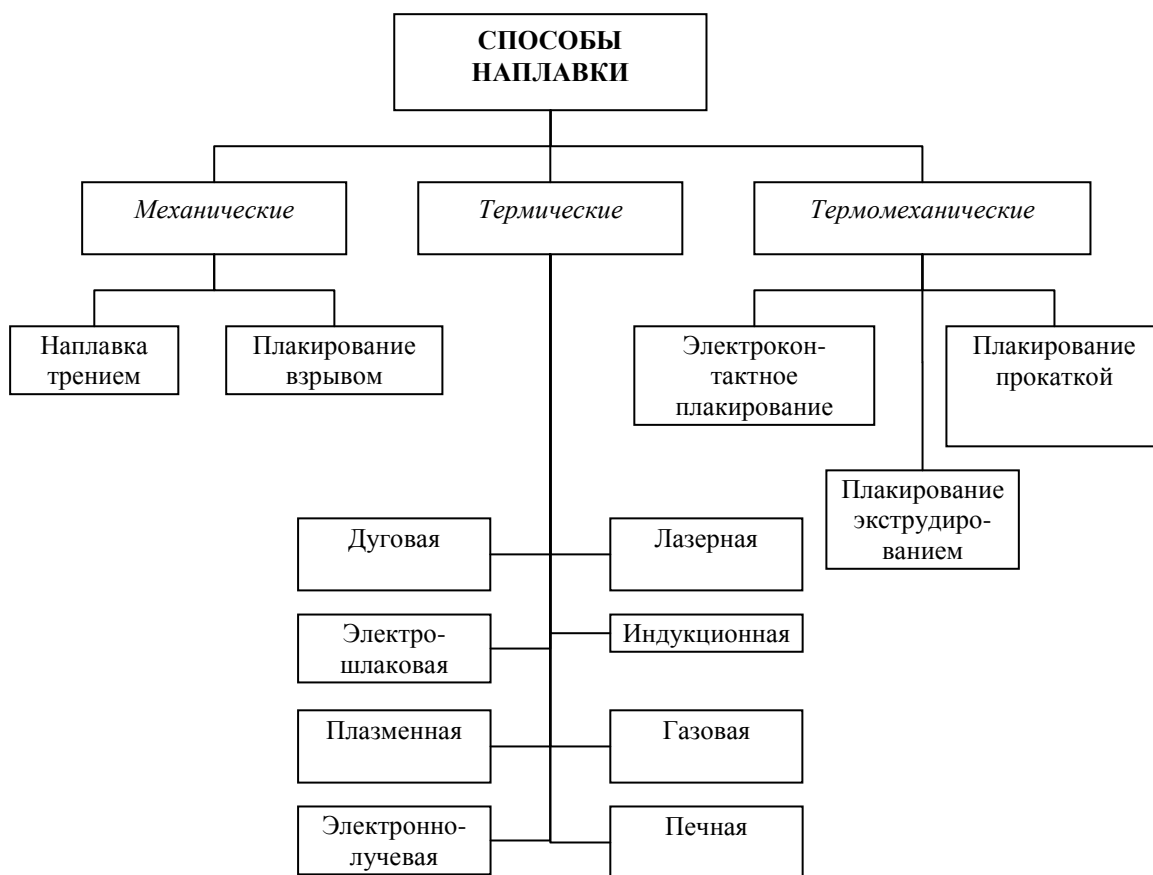


Рисунок 4.1 – Классификация способов наплавки

Большинство из этих способов в свою очередь подразделяют по техническим (способ защиты металла в зоне наплавки, степень механизации процесса, непрерывность процесса наплавки) и технологическим (по роду тока, количеству электродов, наличию внешнего воздействия и т. п.) признакам.

Наиболее широко в практике упрочнения и восстановления послойным наращиванием деталей машин и механизмов в различных областях промышленности используют *электродуговую, электрошлаковую, плазменную, индукционную, газовую и электроконтактную наплавки*, а также плакирование сваркой взрывом.

### 4.3 Электродуговая наплавка

В качестве источника нагрева при электродуговой наплавке используют электрическую дугу. Дуговую наплавку можно выполнять вручную покрытыми и непокрытыми электродами или механизированными способами. К числу основных способов дуговой механизированной наплавки относят следующие: автоматическую *под флюсом* (одно-, двух- и многоэлектродную), сплошной или порошковой проволокой (рис. 4.2), электродной лентой; автоматическую (одно-, двух- и многоэлектродную) и полуавтоматическую *самозащитной порошковой проволокой*; автоматическую *самозащитной порошковой лентой* (одним или двумя электродами), автоматическую и полуавтоматическую *в защитных газах* (табл. 4.1).

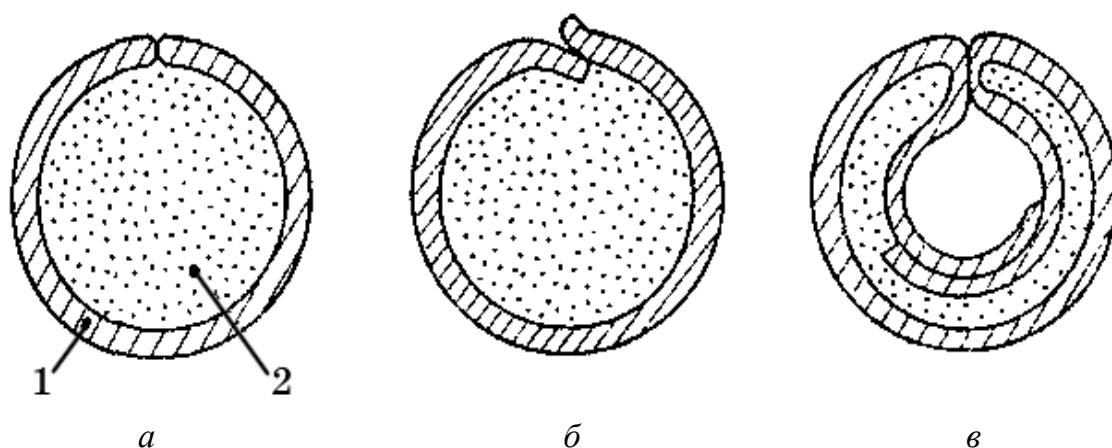


Рисунок 4.2 – Конструкция порошковых проволок:

- 1 – оболочка из мягкой ленты (стальной, никелевой и т.д.);
- 2 – сердечник из порошков легирующих компонентов (ферросплавов, чистых металлов, карбидов, боридов и т.д.)

Рассмотрим основные способы электродуговой наплавки.

Таблица 4.1 – Сравнительные характеристики основных способов механизированной дуговой наплавки

№ п/п	Способ наплавки	Производительность, кг/ч	Доля основного металла в наплавленном, %	Толщина наплавленно го слоя, мм (один проход)
1	Автоматическая <i>под флюсом:</i>			
	одной электродной проволокой	2-5	30-60	0,1-3,0
	многоэлектродной проволокой	5-30	15-30	5,0-8,0
	электродной лентой	5-30	10-20	2,5-5,0
2	Автоматическая и полуавтоматическая <i>в защитном газе</i>	2-8	30-60	3,0-5,0
3	Полуавтоматическая <i>самозащитной порошковой проволокой</i>	2-9	25-50	2,0-5,0
4	Автоматическая <i>самозащитной порошковой проволокой:</i>			
	одним электродом	2-9	25-50	2,5-5,0
	двумя электродами	5-20	25-60	6,5-7,0
5	Автоматическая <i>самозащитной порошковой лентой:</i>			
	одним электродом	10-20	15-40	2,5-5,0
	двумя электродами	20-40	10-60	6,0-8,0
6	Трехмерная наплавка дуговой сваркой	-	-	0,001-1,0

#### 4.3.1 Ручная дуговая наплавка

Ручную дуговую наплавку (рис. 4.3) экономично применять при незначительном объеме наплавочных работ, а также при выполнении наплавки в различных пространственных положениях. *Качество наплавочных работ в значительной степени зависит от состояния наплавляемой поверхности, поэтому все детали должны быть*

предварительно очищены. После очистки поверхности детали определяют величину и характер износа, наличие трещин, вмятин и т. п.

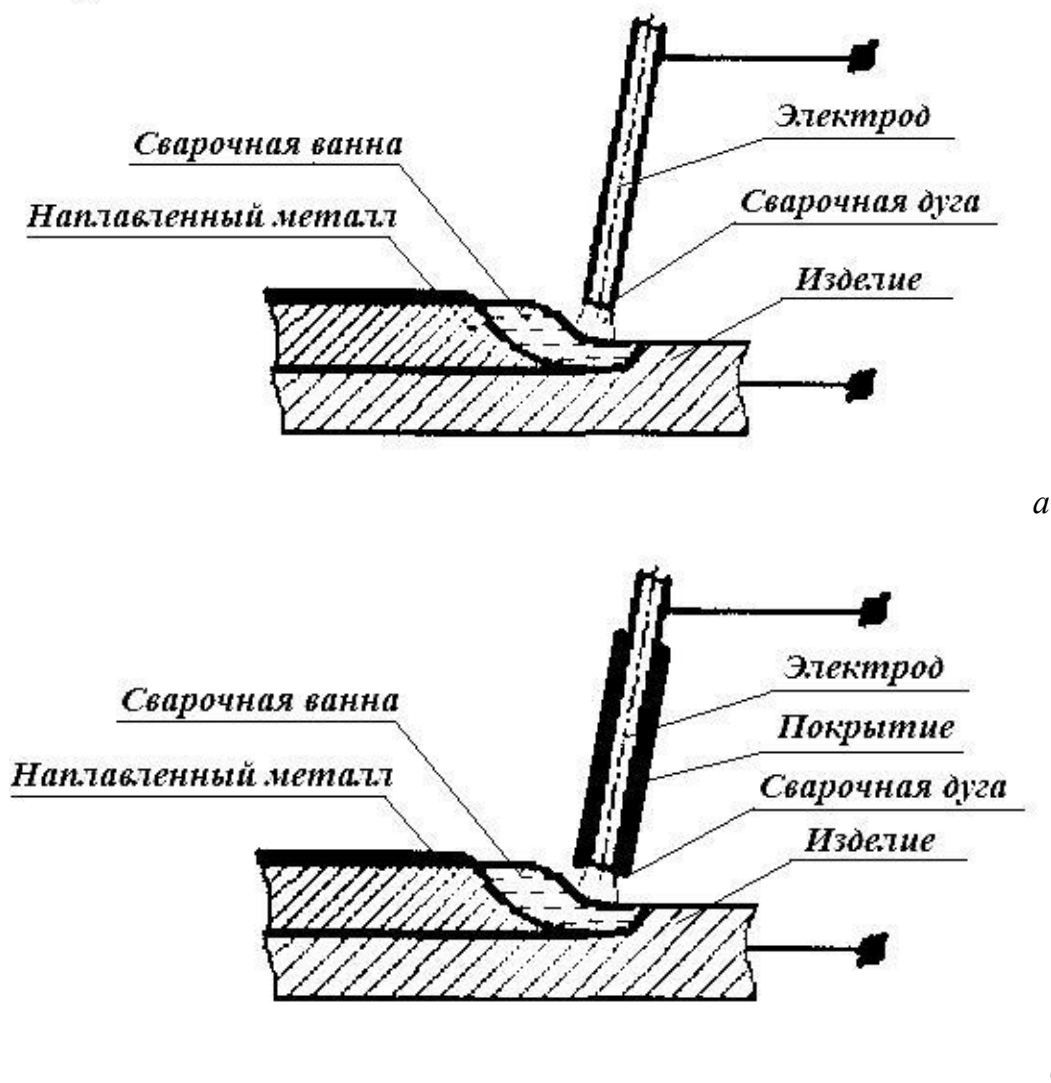


Рисунок 4.3 – Схема ручной дуговой наплавки:

- а) непокрытым (голым) электродом (медь и ее сплавы);
- б) покрытым электродом

*Твердость и износостойкость наплавленного металла зависят от марки наплавочных электродов, химического состава основного металла, режима наплавки и количества наплавливаемых слоев.*

Недостатками ручной дуговой наплавки является ее относительно малая производительность, тяжелые условия труда, не стабильное качество наплавленного слоя. Повышения производительности при ручной



дуговой наплавке можно добиться применением электродов больших диаметров, присадочного прутка, пучка электродов

#### 4.3.2 Дуговая наплавка в защитном газе плавящимся электродом

Наплавка в защитных газах характеризуется универсальностью процесса: возможность наплавки во всех пространственных положениях, на объекты сложной геометрической формы без применения каких либо специальных приспособлений в зависимости от условий наплавки (рис. 4.4).

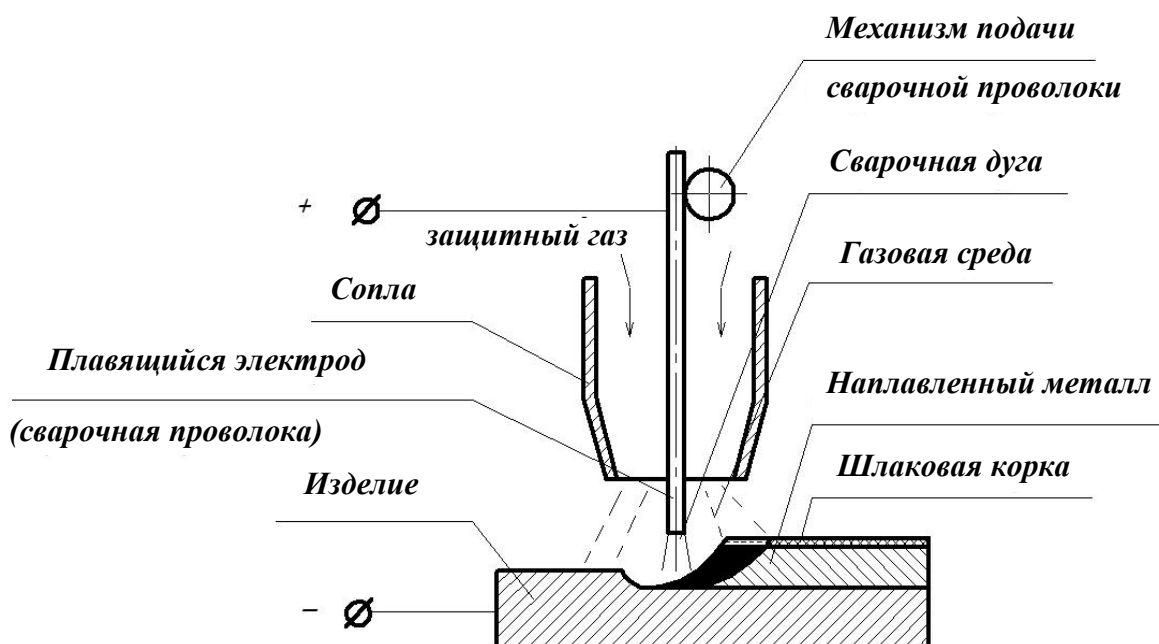


Рисунок 4.4 – Схема наплавки в защитном газе плавящимся электродом

Наплавка в защитных газах целесообразна в тех случаях, когда невозможна или затруднена наплавка под флюсом.

При наплавке плавящимся электродом в защитных газах сварочная ванна защищена от воздуха. Количество газа, которое необходимо подавать для оттеснения воздуха от сварочной ванны, зависит от ряда факторов: теплофизических свойств защитного газа, параметров наплавки (силы сварочного тока, напряжения на дуге, скорости наплавки и т. д.) и конструкции газоэлектрической горелки.

В качестве защитных газов при наплавке цветных металлов и сплавов применяют аргон, гелий или смесь инертных газов. При наплавке

меди и ее сплавов можно применить азот. Для повышения стабильности горения дуги и отвода кислорода в защитный газ добавляют водород в количестве от 2 до 5 %.

Наплавку в защитных газах проводят обычно на постоянном токе обратной полярности. Это обеспечивает лучшую устойчивость горения дуги, мелкокапельный перенос металла, меньшее разбрызгивание.

При наплавке в защитных газах необходим мелкокапельный перенос электродного материала, при котором повышается стабильность горения дуги, уменьшается разбрызгивание, улучшается формирование шва. На характер электродного материала оказывает влияние совокупность следующих факторов: воздействие на металл электрических и магнитных сил, сил тяжести, поверхностного натяжения металла, давления выделяющихся из металла паров и газов. Степень влияния каждого из перечисленных факторов зависит от рода и полярности тока, режимов наплавки, материала электрода, состава дуговой атмосферы и т. д.

Увеличение производительности наплавки ограничивается диапазоном сварочного тока; увеличение тока приводит к повышению разбрызгивания наплавляемого металла, ухудшается формирование наплавляемого валика, в целом процесс наплавки начинает протекать нестабильно.

### **4.3.3 Дуговая наплавка под флюсом**

*По сравнению с наплавкой в защитных газах наплавка под флюсом характеризуется высокой производительностью, минимальным (0,5-3%) коэффициентом потерь электродного металла (рис. 4.5). Кроме того, закрытая дуга позволяет избежать применения каких-либо дополнительных средств защиты от ее теплового и светового излучения, брызг и возможных выплесков металла из сварочной ванны.*

В общем случае при наплавке под флюсом дуга горит между электродом и изделием, к которому подведен ток, и образует на поверхности изделия ванночку расплавленного металла. Наплавляемый участок покрывает толстый слой сыпучего флюса. Дуга частично расплавляет флюс и горит внутри полости с эластичной оболочкой из расплавленного флюса - шлака. Расплавленный шлак надежно изолирует жидкий и перегретый металл от газов воздуха, предупреждает разбрызгивание и способствует сохранению тепла дуги. После

затвердевания металла образуется наплавленный валик, покрытый шлаковой коркой и нерасплавившимся флюсом.

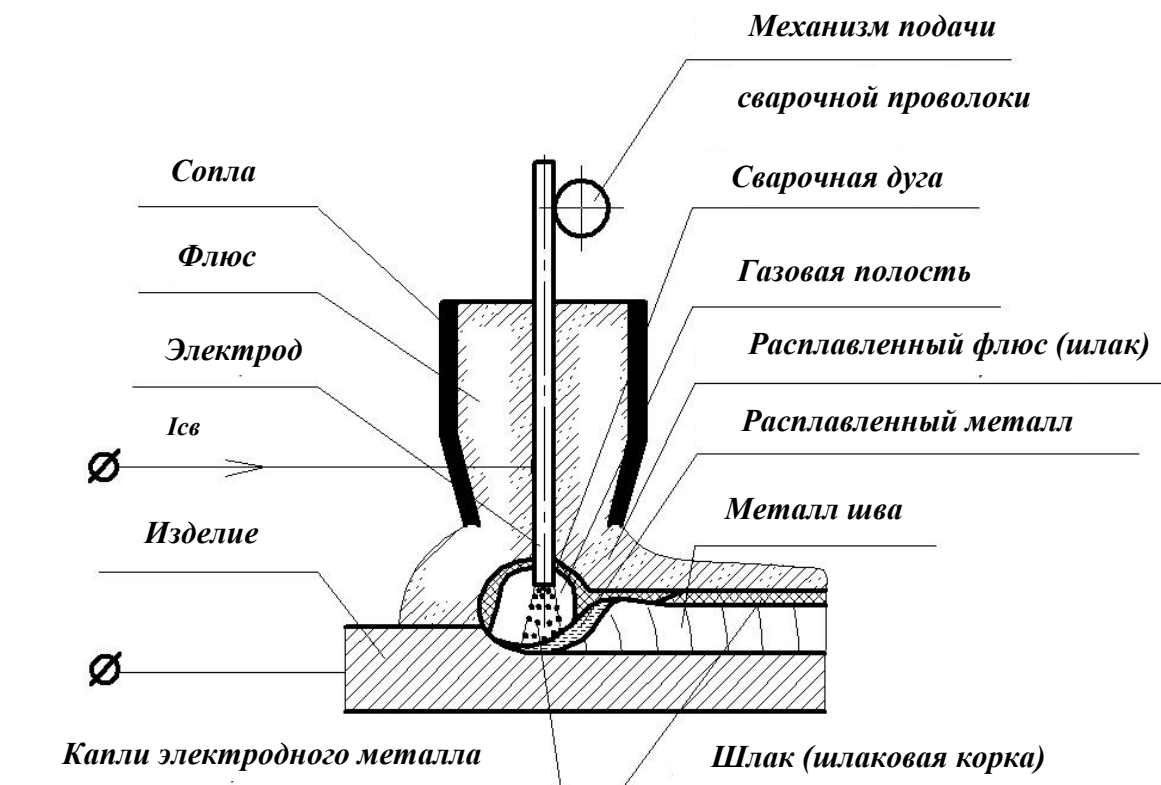


Рисунок 4.5 – Схема наплавки под флюсом

#### 4.3.4 Вибродуговая наплавка

Сущность способа состоит в том, что между деталью 1 и электродной проволокой 6, включенными в цепь источника 5, периодически возбуждается дуга. Периодичность возбуждения достигается за счет продольной вибрации электродной проволоки с большой частотой (до 100 Гц) (рис. 4.6).

В зону дуги подают охлаждающую жидкость (водные растворы соды или глицерина), которая обеспечивает возможность наплавки деталей небольшого диаметра. Выполняют вибродуговую наплавку под флюсом, в среде углекислого газа, водяного пара, в потоке воздуха.

Вибрация электродной проволоки с амплитудой 0,5-4,0 мм обеспечивает чередование электрических разрядов: дуга – короткое замыкание – холостой ход. Напряжение источника питания составляет

14-24 В, диаметр электродной проволоки 1,6-2,5 мм, сила сварочного тока 100-250 А.

Вибродуговая наплавка позволяет получать слои от десятых долей миллиметра до 3 мм за один проход и характеризуется малой зоной термического влияния. Толщина наплавляемого слоя в основном зависит от диаметра электродной проволоки.

Вибродуговой послойной наплавкой восстанавливают детали путем нанесения тонкого слоя металла при минимальной их деформации и нежестких требованиях к качеству наплавленного металла.

Преимущества вибродуговой наплавки – незначительные нагрев и деформация детали в процессе наплавки, возможность упрочнения наплавляемого слоя, простота оборудования и его обслуживания.

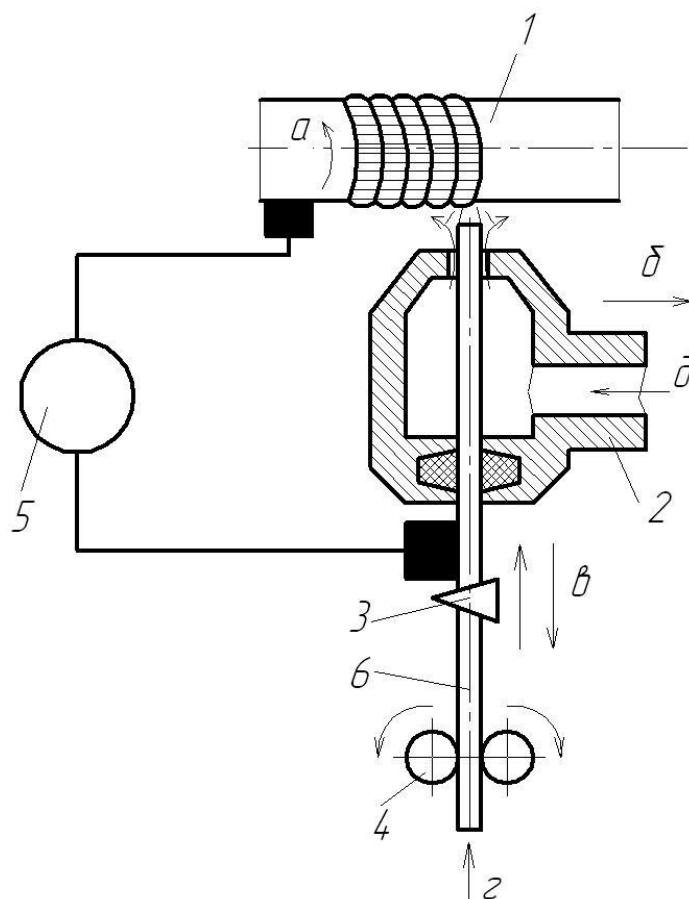


Рисунок 4.6 – Схема вибродуговой наплавки:

1 – деталь; 2 – вибродуговая головка; 3 – вибратор; 4 – подающие ролики;  
 5 – источник питания; 6 – электродная проволока с направлением: а – вращения изделия; б – перемещения головки; в – вибрации электрода; г – подачи электрода;  
 д – подачи охлаждающей жидкости

### 4.3.5 Вакуумно-дуговая наплавка

Экспериментальные исследования дугового разряда в вакууме применительно к сварочной технике относятся к 30-м годам; практическое его применение началось в конце 60-х годов, когда были разработаны способы наплавки в вакууме с использованием дугового разряда с плавящимся электродом, испаряющимся катодом и с полым катодом (рис.4.7). Эти виды дуговых разрядов в вакууме отличаются способом создания материальной среды в дуговом промежутке, характером процессов на катоде и распределением тепла, выделяемого в анодном пятне.

Сочетание высокой стабильности дуги с возможностью широкого варьирования удельного теплового потока на изделие обеспечивает схема процесса с многоканальным полым катодом. Его выполняют в виде тонкостенной трубки из тугоплавкого металла (обычно тантала), через которую для поддержания дугового разряда подается рабочий газ (аргон или гелий). При горении дуги катод нагревается и термоэмиссия электронов стабилизирует дуговой разряд.

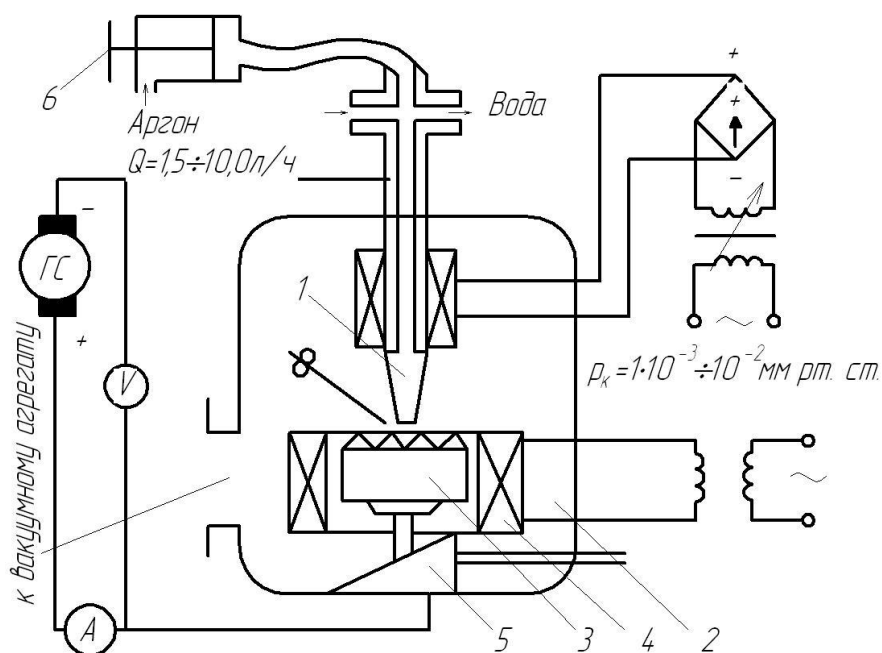


Рисунок 4.7 – Схема вакуумно-дуговой наплавки с многоканальным полым катодом:

- 1 – сварочная горелка; 2 – вакуумная камера; 3 – изделие;  
4 – индуктор; 5 – микронатекатель

Эффективное регулирование подачи тепла в изделие путем изменения длины дуги, которая в вакууме может достигать 150 мм, позволяет вести вакуумно-дуговую наплавку практически без расплавления основного металла. Это особенно важно, например, при наплавке кобальтового стеллита, свойства которого снижаются с увеличением содержания в нем железа более 5 %.

Кроме того, вакуумная обработка повышает качество наплавляемого сплава благодаря химическим реакциям, протекающим с образованием газообразных продуктов и зависящим от внешнего давления (например, взаимодействие углерода с находящимися в расплаве окислами); дегазации и испарению летучих примесей; диссоциации некоторых химических соединений.

Применение способа вакуумно-дуговой наплавки наиболее целесообразно при обработке мелкосерийных ответственных деталей небольшой массы.

#### **4.3.6 Технология и техника электродуговой наплавки**

*Технология и техника наплавки должны при максимальной производительности обеспечить хорошее формирование наплавленного слоя с целью уменьшения припусков на последующую механическую обработку.*

*Производительность наплавки, качество формирования наплавленного слоя, его химический состав и структура в значительной степени зависят от режима наплавки.*

Основные показатели режима наплавки: **сила тока, напряжение дуги, скорость наплавки, вылет электрода, шаг наплавки.**

**Сила тока** определяет производительность наплавки. Чем больше сила тока, тем выше производительность.

**Напряжение дуги** при данной силе тока в значительной степени определяет форму наплавленного валика. При слишком малом напряжении получается узкий и высокий наплавленный валик, повышение напряжения увеличивает ширину и уменьшает высоту валика.

Напряжение дуги должно быть согласовано с силой тока: для выбора напряжения в зависимости от силы тока можно руководствоваться данными графика (рис.4.8), на котором оптимальный режим показан штриховкой.

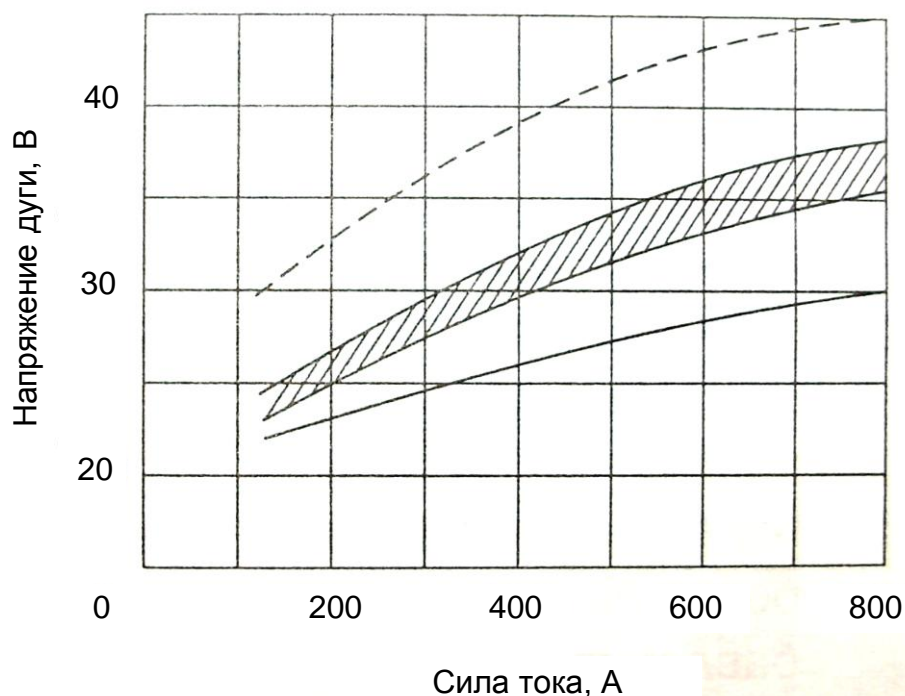


Рисунок 4.8 – Зависимость напряжения дуги от силы тока при наплавке под флюсом

(заштрихован оптимальный диапазон, пунктиром показаны пределы напряжения, применяемого в отдельных случаях)

**Скорость наплавки** (перемещение дуги) влияет на разделение металла по наплавляемой поверхности (рис. 4.9). При малых скоростях наплавки (10-16 м/ч) уменьшение скорости приводит к уменьшению глубины проплавления. При скорости 40 м/ч наблюдается максимальная глубина провара. Дальнейшее увеличение скорости (до 100 м/ч) ведет к одновременному уменьшению глубины проплавления и ширины наплавленного валика.

**Производительность наплавки и форма сварочной ванны** зависят также от числа электродов. Многоэлектродную наплавку и электродную ленту используют при обработке протяженных поверхностей.

**Оптимальная величина вылета электрода** зависит от физических свойств проволоки или ленты, от их диаметра или толщины. Чем больше электрическое сопротивление и чем меньше диаметр проволоки, тем меньше должен быть вылет.

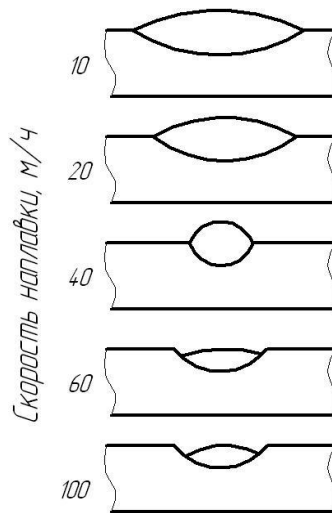


Рисунок 4.9 – Влияние скорости наплавки на форму поперечного сечения наплавленного валика

**Шаг наплавки**, т. е. поперечное перемещение электрода при наплавке очередного валика, определяет гладкость наплавленной поверхности и долю основного металла в наплавленном. Слишком большой шаг наплавки может вызвать неровности и чрезмерное разбавление основным металлом, слишком малый шаг – дефекты в виде подворотов и непроваров. Для получения качественного слоя шаг наплавки должен составлять примерно от 0,4 до 0,75 ширины наплавленного валика (рис. 4.10).

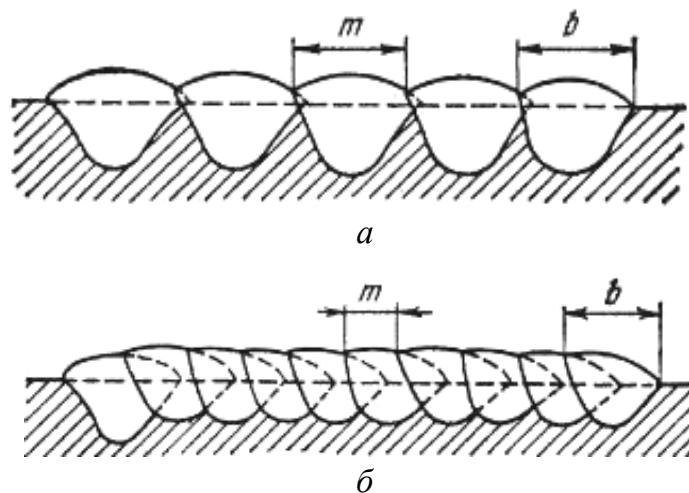


Рисунок 4.10 – Влияние шага наплавки на долю основного металла в составе наплавленного слоя:

*a* – шаг наплавки  $m$  близок к ширине валика  $b$ , доля основного металла  $g_0 = 0,65$  ;

*b* – шаг наплавки  $m = 0,46b$  ,  $g_0 = 0,45$



Автоматическую наплавку тел вращения, как правило, производят по винтовой линии или кольцевыми валиками с периодическим смещением на шаг (рис. 4.11). В первом случае деталь вращается, а электрод медленно движется параллельно оси вращения, во втором – электрод в конце каждого оборота детали перемещается на заданную величину шага наплавки. Преимущества этих способов: непрерывность процесса, обеспечивающая высокую производительность; хорошее формирование наплавленного слоя, что позволяет свести к минимуму припуск на обработку; симметричность остаточных напряжений по отношению к оси изделия, что уменьшает или совсем устраняет коробление; снижение до минимума доли основного металла в наплавленном путем уменьшения шага.

Весьма эффективно применение широкослойной наплавки (рис. 4.11, в). При среднем диаметре изделий (100-300 мм) целесообразно применять поперечные колебания электрода, а при большем (>300 мм) – использовать многоэлектродную наплавку или наплавку лентами. Эти способы увеличивают производительность наплавки и в значительной степени снижают проплавление основного металла.

Электродуговая наплавка эффективно применяется для многократного восстановления контактной поверхности и реборды подкранового колеса, плунжеров гидропрессов, роликов машин непрерывного литья заготовок, валков горячей прокатки, валков обжимных станков, валков листопркатных станков, деталей загрузочных устройств доменных печей, била молотковых дробилок, штампового и прессового инструмента, ножей горячей резки проката и др.

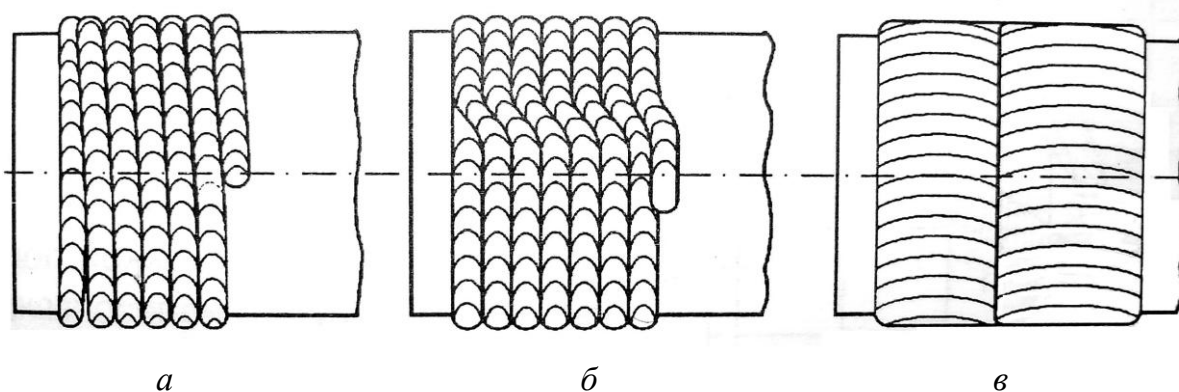


Рисунок 4.11 – Техника наплавки тел вращения:

*а* – по винтовой линии; *б* – кольцевыми валиками с периодическим смещением на шаг;  
*в* – широкослойными валиками

#### 4.4 Электрошлаковая наплавка (ЭШН)

*В основе электрошлаковых технологий лежит процесс выделения теплоты в расплавленном шлаке при пропускании через него электрического тока. Электрошлаковая сварка была разработана в начале 1950-х годов в Институте электросварки им. Е.О.Патона НАН Украины. Практически сразу процесс начали применять для наплавки.*

Наиболее общая классификация способов электрошлаковой наплавки приведена на рис 4.12.

*По технико-технологическим признакам различают ЭШН со свободным или принудительным формированием; с жидким или твердым стартом; одно- или многоэлектродную; с подвижными или неподвижными электродами; с горизонтальным, наклонным или вертикальным расположением наплавляемой поверхности; с питанием постоянным или переменным током.*

При ЭШН возможно свободное или принудительное формирование наплавленного металла. В случае принудительного формирования используют как стационарные, так и подвижные формирующие устройства – ползуны и кристаллизаторы. Ползуны имеют простую геометрическую форму, чаще всего в виде прямоугольных водоохлаждаемых пластин. К кристаллизаторам относят формирующие устройства развитой формы, как правило, замкнутого сечения.

ЭШН начинают с "твердого" или "жидкого" стартов. При твердом старте электрод закорачивается на изделие или на стартовую затравку, в некоторых случаях применяют флюсометаллические смеси или электропроводные флюсы в твердом состоянии.

*ЭШН классифицируют по виду электродных и присадочных материалов.* К электродам, которые могут быть плавящимися или неплавящимися, подводят напряжение от источника питания. Первые подают в шлаковую ванну, где они расплавляются, вторые являются нерасходуемыми и служат для поддержания электрошлакового процесса.

Плавящиеся электроды могут быть подвижными и неподвижными, их изготавливают в виде проволок и лент сплошного сечения или порошковых пластин, прутков, труб и т. д.

Неплавящиеся электроды, как правило, изготавливают из меди, графита, вольфрама либо используются различные комбинированные конструкции.

К присадочным материалам напряжение не подводят, они служат лишь для формирования наплавленного слоя. Присадочные материалы могут иметь ту же форму, что и плавящиеся электродные материалы, быть зернистыми или жидкими. В некоторых случаях применяют различные их комбинации.

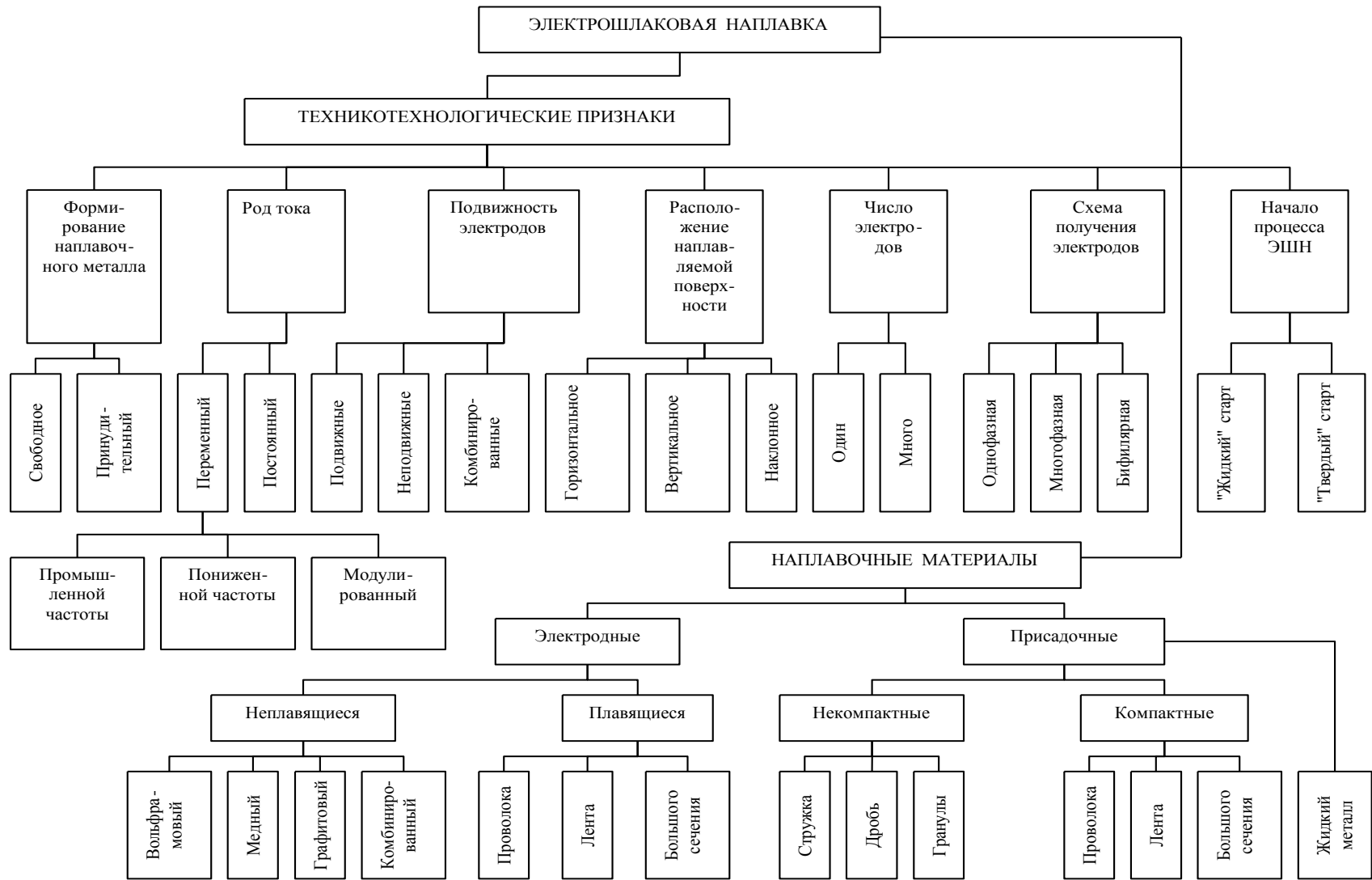


Рисунок 4.12 – Классификация способов электрошлаковой наплавки

#### 4.4.1 ЭШН электродными проволоками

Электрошлаковым способом электродными проволоками можно послойно наплавлять плоские поверхности и тела вращения при вертикальном или горизонтальном расположении наплавляемой поверхности. На рис. 4.13 показана схема процесса ЭШН проволоками в вертикальном положении с помощью трех составных ползунов (вместо ползунов можно использовать подвижный кристаллизатор).

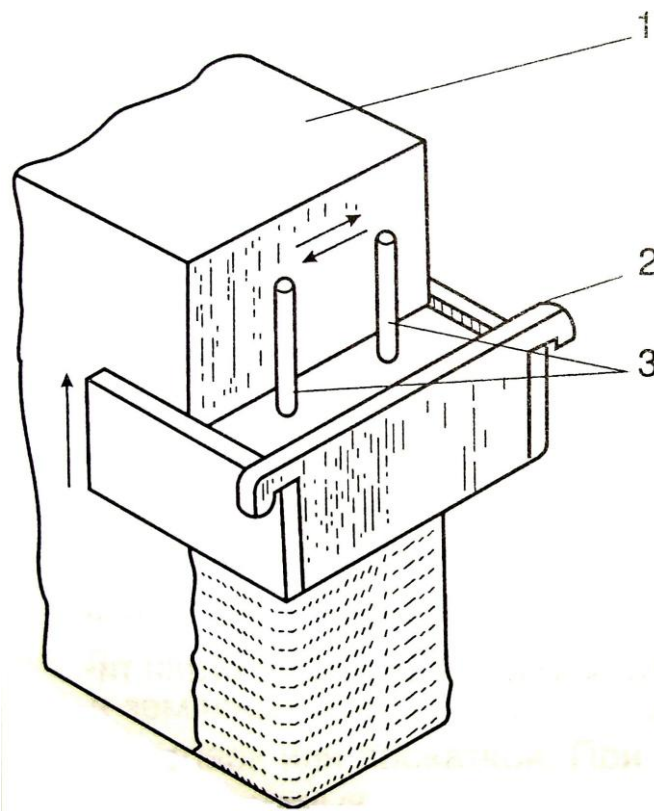


Рисунок 4.13 – ЭШН плоской поверхности в вертикальном положении с помощью составных ползунов:

1 – наплавляемая заготовка; 2 – составной ползун; 3 – электроды

Наплавку производят в зазор, образуемый наплавляемой поверхностью заготовки и ползунами. Электроды при наплавке могут совершать возвратно-поступательное движение вдоль зазора. Скорость поперечных колебаний электрода должна быть такой, чтобы шлак не успевал затвердеть до момента возвращения электрода в исходное положение. Процесс начинают на подкладке или в специальном кристаллизаторе. Режимы наплавки (количество электродов, ток, напряжение, скорость поперечного перемещения электродов,

глубина ванны и т. д.) устанавливают в зависимости от размеров наплавляемого слоя.

Электрошлаковую наплавку цилиндрической заготовки большой длины можно производить, используя подвижный кристаллизатор, неподвижную заготовку и электроды, которые вместе с мундштуками совершают колебательные движения по окружности заготовки (рис. 4.14). Такую технологию и технику наплавки применяли при восстановлении и упрочнении прокатных валков.

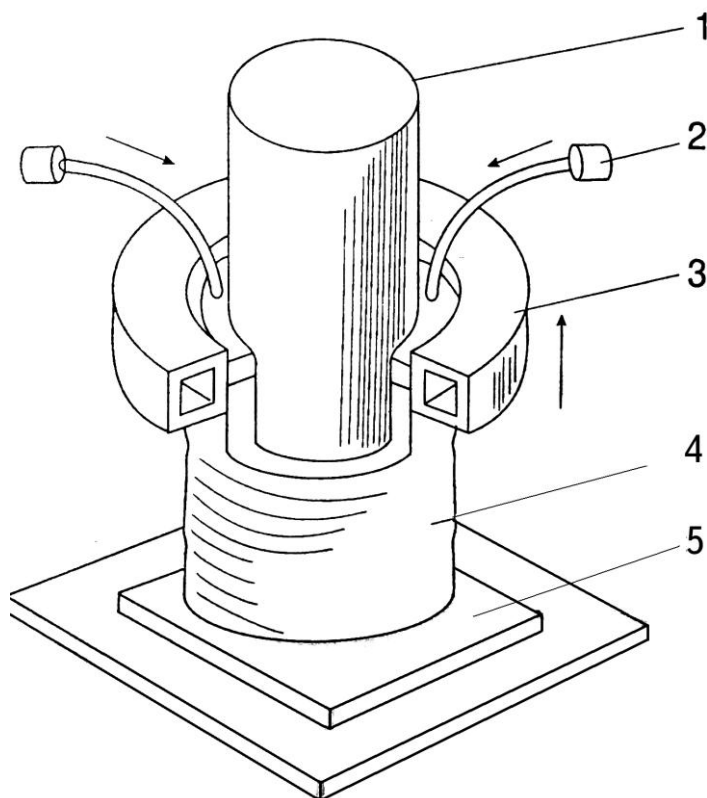


Рисунок 4.14 – ЭШН цилиндрической наружной поверхности при большой длине образующей:

- 1 – наплавляемая заготовка; 2 – электродная проволока; 3 – кристаллизатор;  
4 – наплавленный слой; 5 – стартовая подкладка

Схема ЭШН внутренней цилиндрической поверхности показана на рис. 4.15. В процессе наплавки стержень-кристаллизатор и заготовка синхронно вращаются, а мундштуки, подающие проволоку, только поднимаются вверх по мере наплавки.

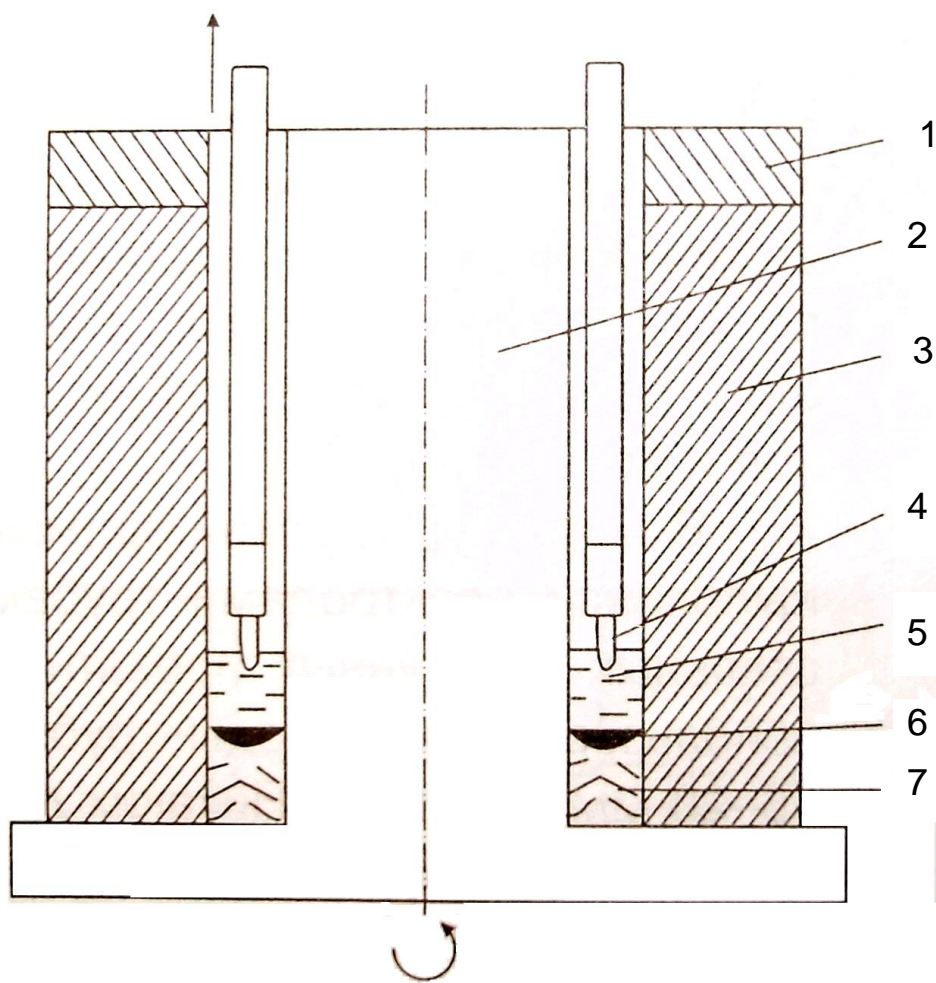


Рисунок 4.15 – Схема ЭШН внутренней цилиндрической поверхности:

1 – выводная втулка; 2 – медный охлаждаемый стержень; 3 – заготовка;  
4 – электрод; 5 – шлаковая ванна; 6 – металлическая ванна; 7 – наплавленный слой

#### 4.4.2 ЭШН электродными лентами (ЭШНЛ)

Электрошлаковая наплавка одной или двумя электродными лентами при горизонтальном расположении наплавляемых поверхностей и свободном формировании наплавляемого металла была разработана в 1970-х гг. Схема процесса ЭШН одной лентой приведена на рис. 4.16. Флюс подают только с одной стороны – перед лентой, в направлении наплавки. Процесс, начинающийся как дуговой, быстро переходит в электрошлаковый. За лентой остается сварочная ванна, которая

защищена слоем расплавленного шлака, и закристаллизовавшийся наплавленный металл, покрытый шлаковой коркой.

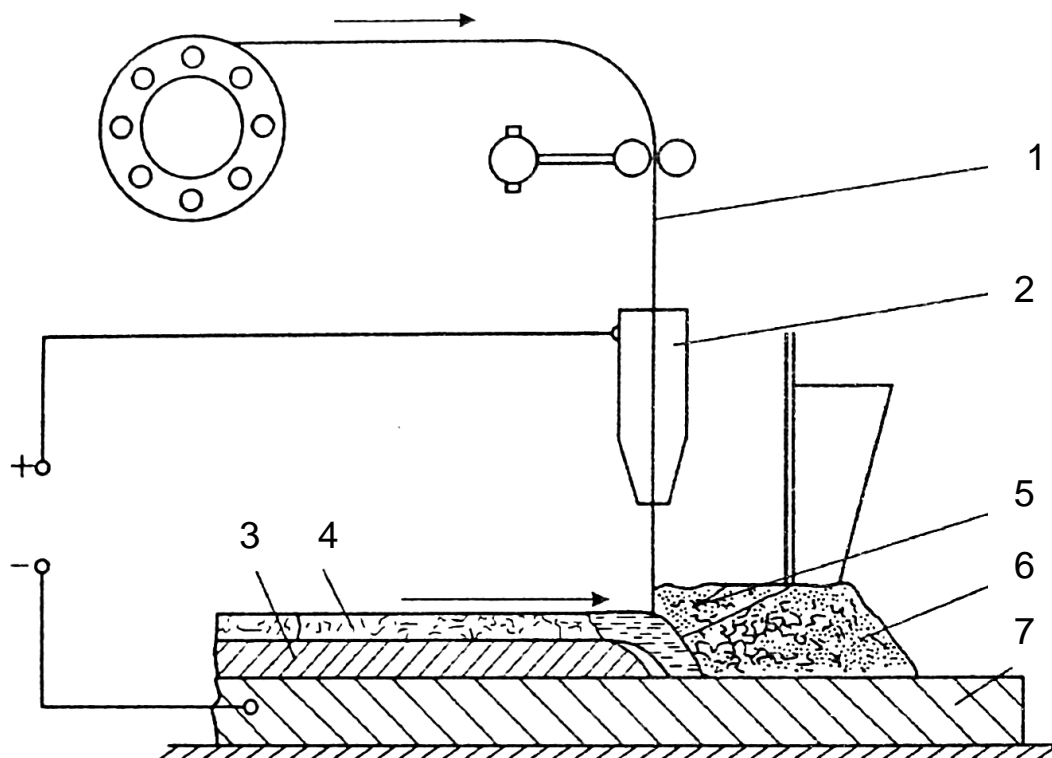


Рисунок 4.16 – Схема ЭШН одной электродной лентой:

1 – электродная лента; 2 – токопровод; 3 – наплавленный металл;  
4 – затвердевший металл; 5 – жидкий металл; 6 – флюс; 7 – основной металл

Основные преимущества ЭШНЛ – высокая производительность (22 кг/ч для ленты размерами 60x0,5 мм) при малом проплавлении основного металла (5-10%). С использованием ЭШНЛ разработаны технологические процессы изготовления коррозионно-стойких биметаллических листов общей толщиной 12-30 мм; слябов для последующей прокатки в биметаллические листы; корпусных деталей и узлов для атомного и химического машиностроения; прокатных валков, ножей горячей резки металла, роликов моталок и т. д.

#### 4.4.3 ЭШН электродами большого сечения

Наиболее эффективна в тех случаях, когда необходимо наплавить за относительно короткое время большие массы металла слоями

значительной толщины. Именно по этой причине получила распространение ЭШН электродами большого сечения в виде труб; квадратных, круглых, прямоугольных прутков и др.

В металлургической промышленности наплавку прокатных валков выполняли электродами-трубами (рис. 4.17). Например, для наплавки стальных и чугунных прокатных валков горячей прокатки стана 300 использовали электроды-трубы диаметром 370 мм с толщиной стенки 15-20 мм из чугуна. Отсутствие трещин при наплавке малопластичных материалов (чугунов) связано с особенностями кольцевой ЭШН, позволяющей существенно уменьшить остаточные растягивающие напряжения, а в ряде случаев получать даже сжимающие напряжения в наплавленном слое.

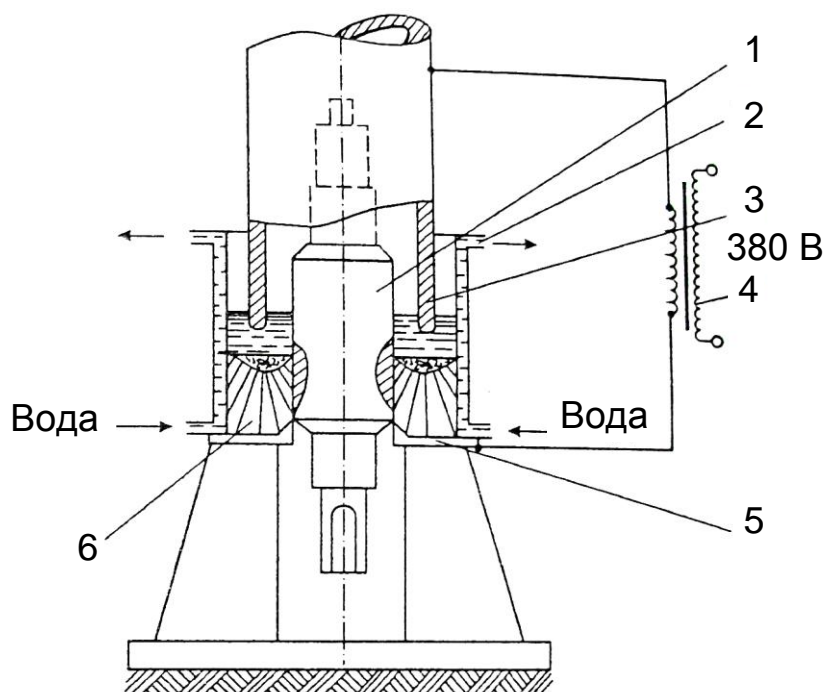


Рисунок 4.17 – Схема наплавки прокатных валков электродом-трубой:

- 1 – наплавляемый прокатный валок; 2 – кристаллизатор; 3 – электрод-труба;  
4 – трансформатор; 5 – стартовое кольцо; 6 – наплавленный слой

Электродами большого сечения наплавляли заготовки для прокатки сортового и листового биметалла. При изготовлении некоторых быстро изнашивающихся деталей (лемехи плугов и культиваторов, рабочие органы строительных и дорожных машин и т. д.) эффективно производить наплавку не в конце цикла изготовления, а в



начале, т. е. наплавлять заготовки, из которых прокатывают соответствующие профили.

Схема процесса наплавки выглядит следующим образом (рис.4.18). В наплавляемой заготовке (блюдце) предварительно протрагивают или выфрезеровывают соответствующей формы паз. Затем этот паз заправляют электрошлаковым способом, используя электроды квадратного, прямоугольного или круглого сечений. При наплавке электрод подают вертикально вниз; ползун, ограничивающий шлаковую и металлическую ванны, остается неподвижным, а блюдце, расположенный под углом  $15-35^\circ$  к горизонтали, перемещают вдоль оси наклона. После прокатки такой заготовки получают соответствующей формы профиль, из которого изготавливают биметаллические детали с расположением износостойкого плакирующего слоя в местах наибольшего изнашивания.

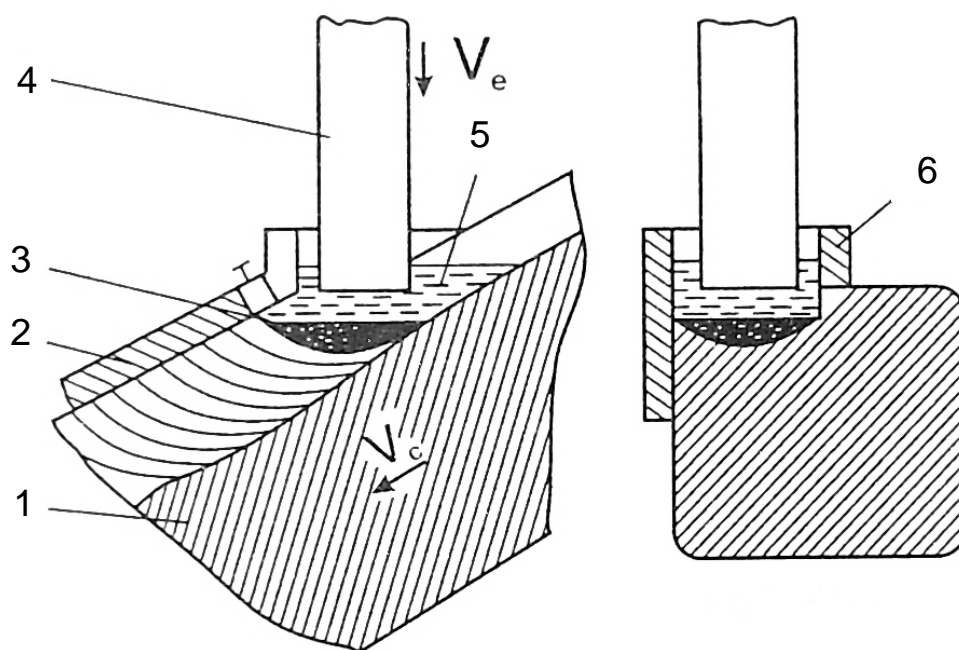


Рисунок 4.18 – ЭШН заготовок под прокатку сортового биметалла с наклонным расположением наплавляемой поверхности:

- 1 – наплавляемая деталь; 2 – формирующая пластина; 3 – датчик уровня;  
4 – электрод; 5 – шлаковая ванна; 6 – ползун

По аналогичной технологии с использованием нескольких электродов, расположенных в ряд, наплавляют с одной или с двух сторон заготовки (слябы) для последующей прокатки на двух- или трехслойные коррозионно-стойкие листы.

Способами ЭШН электродами большого сечения можно восстанавливать и упрочнять зубья ковшей экскаваторов, била дробилок различных типов, шарошки для роторного бурения шахтных стволов и т. п.

#### 4.4.4 ЭШН зернистым присадочным материалом

Схема электрошлаковой наплавки (дробью) в токоподводящем кристаллизаторе показана на рис. 4.19. Электрическая цепь проходит от токоподводящей секции кристаллизатора через шлаковую ванну к наплавляемой заготовке. Металлическая ванна образуется при расплавлении подаваемой в шлак дробы (стружки). Дробь можно подавать одним или несколькими стационарными дозаторами, совершающими возвратно-вращательное движение по периметру кристаллизатора.

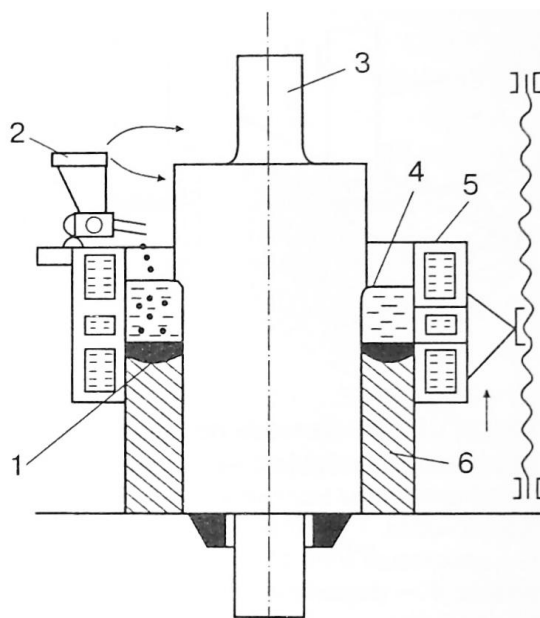


Рисунок 4.19 – ЭШН прокатных валков в токоподводящем кристаллизаторе дробью:

- 1 – металлическая ванна; 2 – дозатор с дробью; 3 – прокатный валок;  
4 – шлаковая ванна; 5 – токоподводящий кристаллизатор; 6 – наплавленный слой

*В процессе наплавки металлическая ванна постепенно кристаллизуется, формируя наплавленный слой. При этом заготовка валка остается неподвижной, а кристаллизатор поднимается вверх*

(возможен вариант, когда кристаллизатор неподвижен, а заготовка вытягивается из него).

Производительность наплавки при использовании этого способа составляет от десятков до сотен килограммов наплавленного металла в час. Наиболее успешно этим способом наплавливали прокатные валки с гладкой бочкой.

#### 4.4.5 ЭШН жидким присадочным металлом

*Использование при ЭШН жидкого присадочного металла рационально по нескольким причинам: исключаются технологические операции по превращению жидкого металла в различного вида твердые присадки; можно наплавливать металл практически любого состава; благодаря отсутствию этапа плавления в шлаковой ванне твердой присадки значительно повышается скорость наплавки.*

На рис. 4.20 показана одна из схем электрошлакового процесса получения биметаллических заготовок путем заливки жидкого металла на твердую подложку. Заготовку 1 устанавливают в кристаллизатор 2. Шлаком 4, находящимся в ковше 3, заливают поверхность заготовки 1, и начинают электрошлаковый процесс нерасходуемыми электродами 5, питающимися от трансформатора 6. После нагрева поверхности заготовки до требуемой температуры на нее наливают металл 8 второго слоя из сталеразливочного ковша 7 и кристаллизуют его с применением электрошлакового процесса, получая двухслойную заготовку 9. По этой технологии можно также восстанавливать изношенные по высоте штампы.

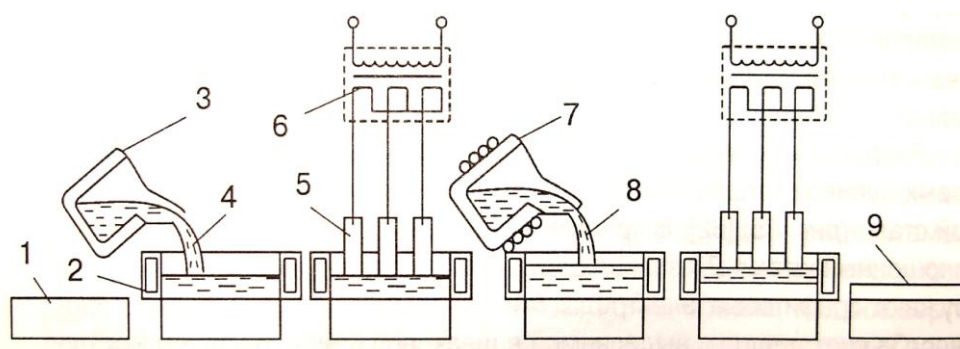


Рисунок 4.20 – Схема получения многослойных заготовок ЭШН заливкой жидкого металла на твердую подложку:

- 1 – заготовка (металл первого слоя); 2 – кристаллизатор; 3 – ковш;
- 4 – расплавленный шлак; 5 – нерасходуемый электрод; 6 – трансформатор;
- 7 – сталеразливочный ковш; 8 – расплавленный металл;
- 9 – двухслойная заготовка

Значительные преимущества имеет ЭШН жидким присадочным металлом в токоподводящем кристаллизаторе. При этом способе наплавки в шлаковую ванну порционно или постоянно подают жидкий присадочный металл.

Схема наплавки жидким присадочным металлом показана на рис. 4.21.

Технология ЭШН жидким присадочным металлом позволяет наплавлять наружные поверхности цилиндрических заготовок при толщине наплавленного слоя 20-100 мм и более. Технология обеспечивает высокую производительность, которая в зависимости от размеров наплавляемых деталей и применяемых материалов составляет от десятков до сотен килограммов наплавленного металла в час.

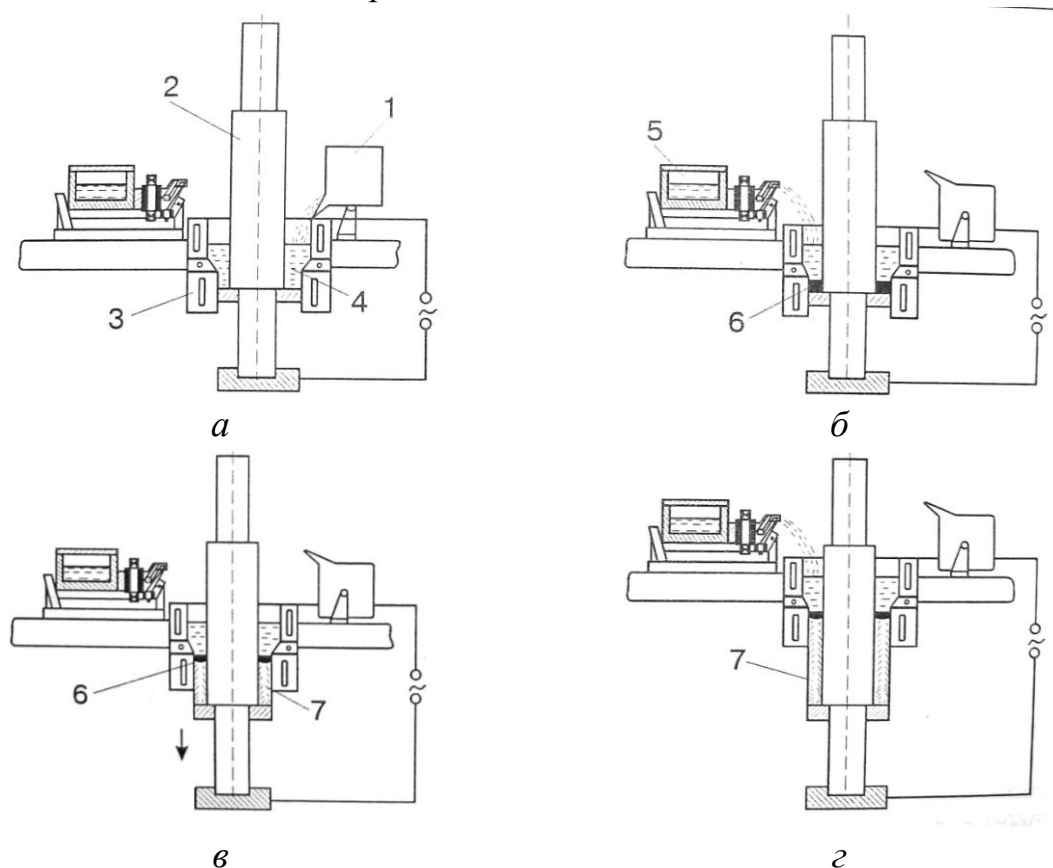


Рисунок 4.21 – ЭШН жидким присадочным металлом  
в токоподводящем кристаллизаторе:

*а* – заливка жидкого шлака; *б* – заливка порции жидкого металла;

*в* – вытягивание наплавляемой заготовки;

*г* – заливка очередной порции жидкого металла

1 – емкость для жидкого шлака; 2 – наплавляемая заготовка; 3 – кристаллизатор;

4 – жидкий шлак; 5 – емкость для жидкого металла; 6 – металлическая ванна;

7 – наплавленный слой

## 4.5 Плазменная наплавка

*Плазменная наплавка – это процесс, при котором источником теплоты служит плазменная дуга, а присадочными или электродными материалами – сплошная или порошковая проволока, неподвижная присадка в виде литых или спеченных колец, гранулированные порошки. Благодаря возможности регулирования в широком диапазоне соотношения между тепловой мощностью дуги и подачей присадочного (электродного) материала, большинство способов плазменной наплавки обеспечивают достаточную производительность (до 10 кг наплавленного металла в час) при минимальном проплавлении основного металла.*

Важным преимуществом плазменной наплавки является отличное формирование наплавленных валиков, стабильность и воспроизводимость их размеров: статистически установлено, что у 95% наплавленных деталей отклонение толщины наплавленного слоя от номинального размера не превышает 0,5 мм. В результате существенно сокращается расход наплавочных материалов, время наплавки, а также благодаря малым припускам затраты на механическую обработку наплавленных деталей.

*Плазменная наплавка обеспечивает высокую работоспособность деталей за счет отличного качества наплавленного металла, его однородности, а также благоприятной структуры, определяемой специфическими условиями кристаллизации металла сварочной ванны.*

В большинстве случаев плазменную наплавку выполняют на постоянном токе прямой, значительно реже обратной полярности. Когда наплавляемое изделие включено в сварочную цепь – это наплавка плазменной дугой. Если же наплавляемое изделие не включено в сварочную цепь – это наплавка плазменной струей.

Разработано несколько способов плазменной наплавки с присадочной или электродной проволокой (рис. 4.22). В том и другом случае обеспечивается минимальное проплавление основного металла (доля основного металла в первом наплавленном слое составляет 0,5-2,5%).

Из существующих способов наибольшее распространение в промышленности получила плазменно-порошковая наплавка, которая является наиболее универсальным среди других способов.

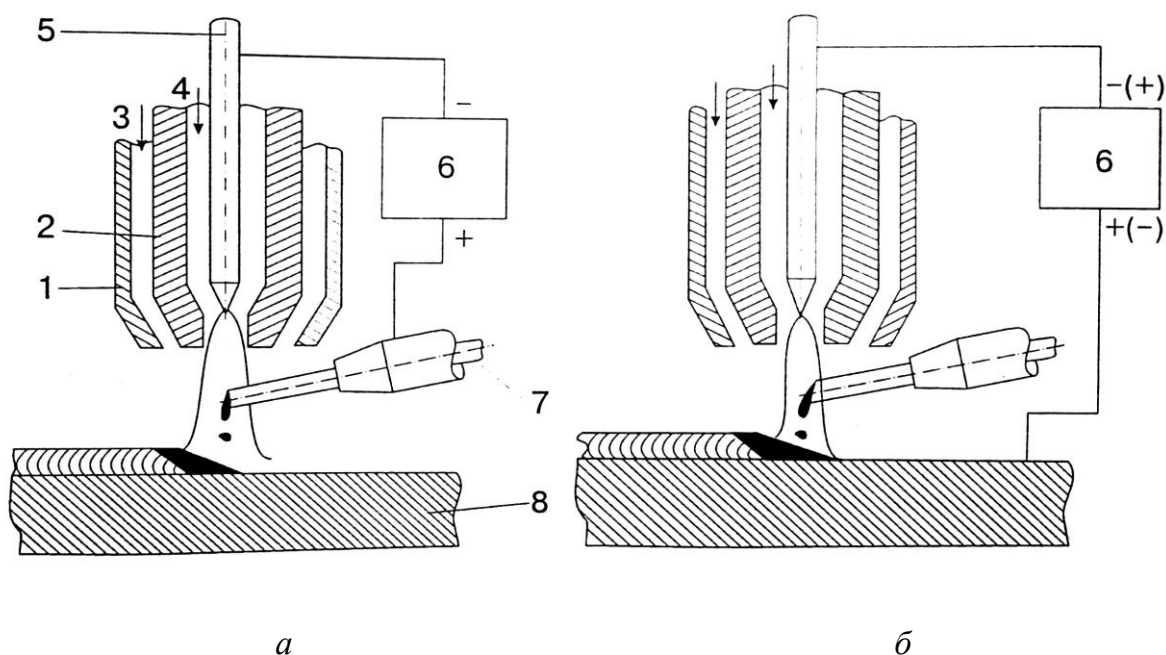


Рисунок 4.22 – Принципиальные схемы плазменной наплавки с использованием одной электродной (а) или присадочной (б) проволоки:

- 1 – защитное сопло; 2 – плазмообразующее сопло; 3 – защитный газ;  
 4 – плазмообразующий газ; 5 – электрод; 6 – источник питания;  
 7 – проволока; 8 – наплавляемое изделие

Благодаря характерному для плазменной наплавки малому проплавлению основного металла требуемую твердость и заданный химический состав наплавленного металла обеспечивают уже на расстоянии 0,3-0,5 мм от поверхности сплавления, что позволяет ограничиться однослойной наплавкой там, где электродуговым способом необходимо наплавить 3-4 слоя.

При плазменно-порошковой наплавке присадкой служат гранулированные металлические порошки (80-200 мкм), которые подаются в плазматрон транспортирующим газом (аргоном) с помощью специального питателя. В настоящее время для наплавочных плазматронов разработано три схемы ввода порошка в дугу (рис. 4.23):

- распределение через кольцевую щель между соплами;
- локальный боковой через канал (каналы) в торце сопла;

- аксиальный через полый электрод.

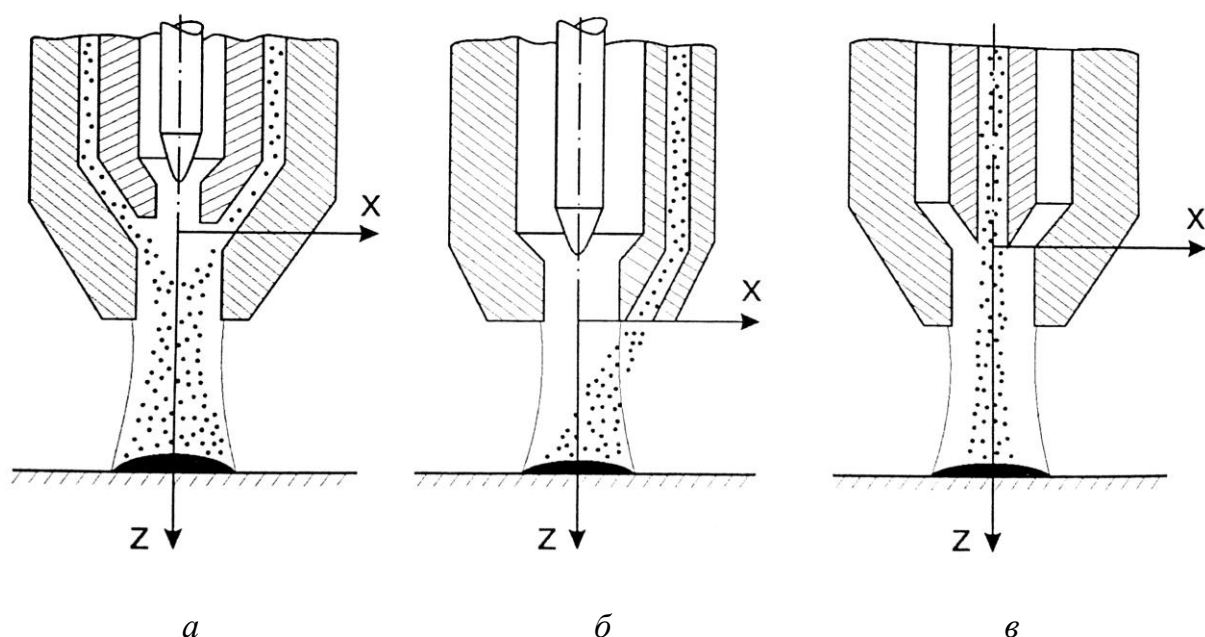


Рисунок 4.23 – Схемы ввода порошка в дугу при плазменно-порошковой наплавке:

- a* – распределенный через кольцевую щель между соплами;  
*б* – локальный боковой через канал (каналы) в торце сопла;  
*в* – аксиальный через полый электрод

Для плазменной наплавки применяют порошки сплавов на основе никеля, кобальта, железа и меди [8]. Порошок является универсальным наплавочным материалом, так как может быть получен практически из любого наплавочного сплава, независимо от прочности, твердости и других свойств последнего.

Следует отметить, что многие составы порошков, разработанных и рекомендованных для газопорошковой наплавки и плазменного напыления, можно успешно использовать и для плазменной наплавки.

Сплавы на основе никеля применяют для наплавки дисков, клиньев, золотников и седел запорной арматуры различного назначения; валов, защитных втулок, уплотнительных колец и опорных дисков центробежных насосов; распределительных валов, клапанов и седел двигателей внутреннего сгорания; деталей металлургического оборудования и др. Металл, наплавленный самофлюсующимися никелевыми сплавами, обладает хорошей износостойкостью при

комнатной и повышенных температурах, особенно в условиях трения металла по металлу, жаропрочностью и жаростойкостью.

Он также стоек против коррозии в растворах некоторых кислот (уксусной, муравьиной, лимонной и т. п.), в каустической соде и других агрессивных средах.

Порошки сплавов на основе кобальта (стеллиты) предназначены для наплавки деталей арматуры, клапанов и седел ДВС, инструмента для горячего деформирования металла, ножей для резки целлюлозы, втулок насосов и других деталей. Наплавленный металл отличается высокой износостойкостью при нормальной и повышенной температурах, жаропрочностью, окислительной стойкостью, коррозионной стойкостью во многих агрессивных средах.

#### **4.6 Индукционная наплавка**

Сущность индукционной наплавки заключается в следующем. Наплавляемую деталь помещают в электромагнитное поле индуктора, который питается переменным током высокой частоты (ТВЧ). В массе металла детали или компактной присадки индуцируются вторичные переменные токи той же частоты, распределяющиеся в поверхностном слое металла и нагревающие этот слой. Чем выше частота тока, тем тоньше нагреваемый слой металла. Для стальных деталей преимущественный нагрев ТВЧ поверхностных слоев металла сохраняется вплоть до точки Кюри (768 °С). После того, как металл нагреется выше точки Кюри, глубина проникновения индуцированных токов увеличивается в 10-20 раз (в зависимости от частоты), благодаря чему распределение температуры в нагреваемом металле становится более равномерным. Металл детали или компактной присадки нагревается до плавления и соединяется между собой. Для предохранения от окисления и улучшения сплавления основного и наплавленного металлов применяют флюсы.

В наиболее распространенных способах индукционной наплавки в качестве присадочного материала применяют не компактные материалы, а шихту, состоящую из металлических порошков и флюсовых добавок. Металлические гранулы изолированы друг от друга частицами флюса, вследствие чего электропроводность порошкового слоя и выделение в нем



энергии малы. По этой причине нагрев и расплавление порошковой шихты идет, в основном, за счет теплопередачи от нагреваемого ТВЧ основного металла.

Индукционный нагрев ТВЧ в настоящее время применяют в следующих основных вариантах наплавки.

#### 4.6.1 Погружение подогретой детали в форму-тигель с расплавленным металлом

По этому способу (рис. 4.24) подогретую в индукторе 1 деталь 2 погружают в керамическую форму 3 с расплавленным металлом 4. Керамическая форма 3 повторяет контуры упрочняемой поверхности. Для раскисления расплава, предохранения от угара легирующих элементов и улучшения сплавления с основным металлом на поверхности ванны может находиться жидкий шлак. Присадочный материал расплавляет индуктор 5. В этом случае не имеет значения соотношение температур плавления основного и присадочного металлов. Способ нашел ограниченное применение, несмотря на внешнюю простоту.

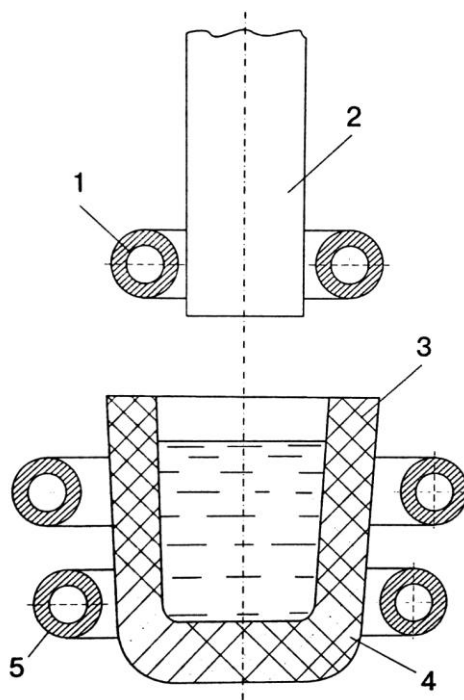


Рисунок 4.24 – Наплавка погружением подогретой детали в форму-тигель с расплавленным металлом:

1 – индуктор для подогрева детали; 2 – деталь; 3 – керамическая форма;  
4 – расплавленный металл; 5 – индуктор для расплавления присадочного материала

#### 4.6.2 Центробежная наплавка деталей цилиндрической формы

Получила наибольшее распространение при изготовлении различных биметаллических втулок. Известны два варианта реализации этого способа послойной наплавки (рис. 4.25), отличающиеся применяемым присадочным материалом. Можно использовать присадочный материал в твердом состоянии в виде металлических порошков, стружки и т. п. В этом случае плавление присадки идет за счет теплопередачи от нагреваемого ТВЧ основного металла. По второму варианту присадочный металл плавят в отдельной емкости и заливают внутрь вращающегося наплавляемого цилиндра.

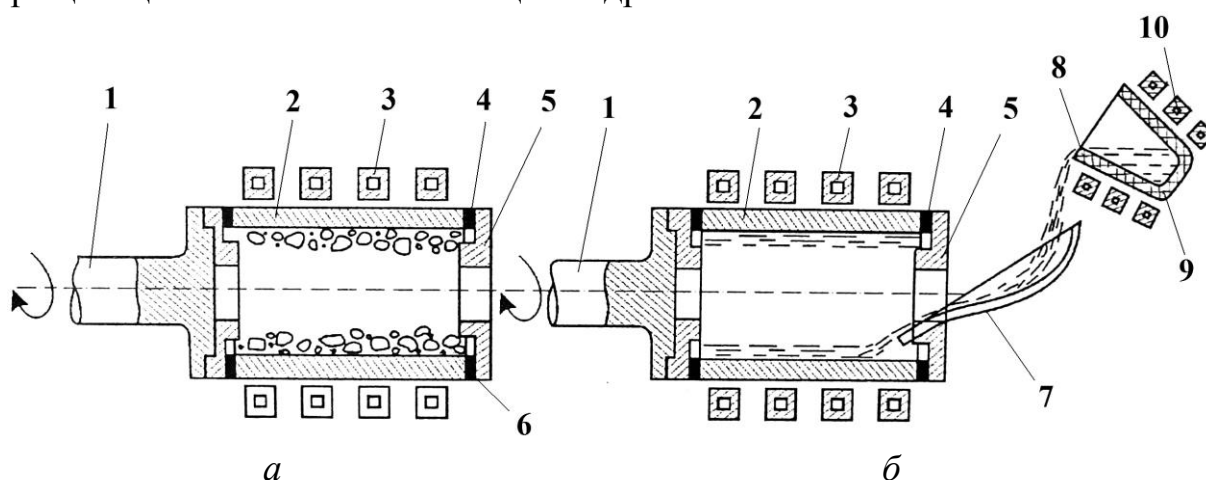


Рисунок 4.25 – Принципиальные схемы индукционной центробежной наплавки с использованием твердого (а) и расплавленного (б) присадочного материала:

- 1 – шпиндель центробежной машины; 2 – наплавляемая деталь; 3 – индуктор;
- 4 – прокладка; 5 – крышка; 6 – шихта; 7 – керамический желоб;
- 8 – расплавленный металл; 9 – тигель; 10 – индуктор плавильного агрегата

Особенностью способа является формирование слоя наплавленного металла под действием центробежных сил, которые, с одной стороны, способствуют более равномерному распределению расплава на основном металле и удалению вредных примесей, а с другой – усугубляют ликвационные явления. Поэтому при наплавке сильно ликвирующих сплавов необходимо применять специальные технологические меры – регламентировать количество заливаемого металла, температуру и продолжительность нагрева, число оборотов

центробежной машины, скорость охлаждения металла и др. Примерами реализации этого способа является центробежная наплавка гильз автомобильных двигателей, гильз гидроцилиндров и червячных передач.

#### 4.6.3 Расплавление порошковой шихты, нанесенной на наплавляемую поверхность детали

Способ основан на использовании ТВЧ для нагрева основного металла и расплавления расположенной на нем порошковой шихты (рис. 4.26).

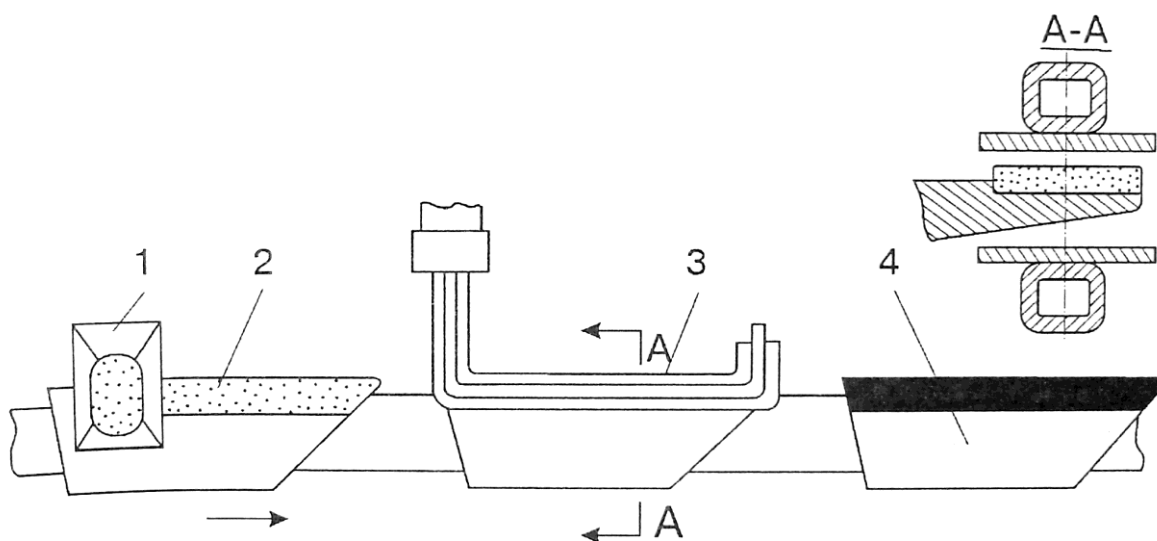


Рисунок 4.26 – Схема индукционной наплавки лемеха с использованием порошковой шихты:

- 1 – дозатор шихты; 2 – порошковая шихта на лезвии лемеха;  
3 – индуктор; 4 – наплавленный лемех

При наплавке этим способом шихту – смесь порошка сормайта с флюсом (бура, борный ангидрид, силикокальций, фтористый кальций и др.) – наносят на наплавляемую поверхность и с помощью специального приспособления вводят в индуктор. Конструкция индуктора и расположение в нем детали зависят от конфигурации упрочняемого участка. Источником питания, как правило, служат ламповые высокочастотные генераторы с частотой 70 кГц. При включении индуктора в поверхностных слоях основного металла индуктируются токи, и наружный слой металла быстро разогревается. Слой порошковой шихты слабо реагирует на воздействие переменного электромагнитного поля, и шихта нагревается в основном за счет

теплопередачи от основного металла. По этой причине температура плавления шихты должна быть ниже температуры плавления основного металла.

Флюс, входящий в состав шихты, плавится, растворяет оксиды, обеспечивает смачивание наплавляемой поверхности и растекание по ней износостойкого сплава. При наплавке этим способом никакой специальной подготовки поверхности изделия не требуется. Можно наплавлять поверхности как механически обработанные, так и покрытые слоем оксидов после металлургического передела (прокатки).

#### **4.7 Газовая наплавка**

*При газовой наплавке слоев для нагрева основного и наплавляемого металлов используют теплоту, выделяемую при горении смеси ацетилена или его заменителей и кислорода. Газовое пламя – наименее интенсивный источник нагрева, поэтому оно обуславливает большую, чем в других случаях, зону термического влияния. Испарения металла при использовании этого источника нагрева нет. Особенностью процесса является возможность получения малой доли основного металла в наплавленном (5-10%), что связано с отсутствием значительного давления струи газа на поверхность сварочной ванны.*

Кроме малого проплавления, газовая наплавка имеет и другие преимущества: универсальность и гибкость технологии; возможность наплавки тонких слоев; пониженную опасность возникновения трещин, так как процесс наплавки легко совмещается с предварительным подогревом; низкую стоимость наплавочного оборудования.

Недостатки газовой наплавки – низкая производительность процесса, нестабильность качества наплавленного слоя, зависящая от квалификации наплавщика.

Горючие газы, применяемые для газовой наплавки, представляют собой углеводороды или их смеси с другими газами ( $C_2H_2$ ;  $CH_4$ ;  $C_3H_8$ ;  $C_{10}H_8$  и др.), водород или пары бензина и керосина. При их сгорании образуется высокотемпературное пламя и выделяется значительное количество теплоты.

В зависимости от применяемых присадочных материалов различают два способа газовой наплавки. По первому присадочный металл в виде проволоки, прутков или ленты подают в сварочную ванну вручную или специальными механизмами.

При газопорошковой наплавке (второй способ) в качестве присадочных материалов используют гранулированные порошки легкоплавких сплавов определенных фракций и горелки специальной конструкции, позволяющие осуществлять две разновидности процесса: предварительное напыление слоя порошка на поверхность изделия с последующим оплавлением покрытия; собственно наплавку – одновременное нанесение и оплавление малых порций порошка на поверхности детали.

Для газовой наплавки стали, чугуна, меди и ее сплавов, сплавов на основе никеля и кобальта в качестве присадочных материалов используют сплошные проволоки и прутки по соответствующим стандартам.

Для газопорошковой наплавки используют порошки легкоплавких сплавов на основе никеля и кобальта (стеллиты).

Режимы газовой наплавки зависят от теплофизических свойств металла, габаритных размеров и формы изделия. При разработке технологии обработки конкретной детали выбирают способ наплавки, мощность и состав пламени, угол наклона горелки, марку и диаметр присадочного прутка (проволоки), флюс, порядок наложения швов.

#### **4.8 Электроконтактная наплавка (плакирование)**

*Электроконтактную наплавку осуществляют на специальной установке совместным деформированием наплавляемого и основного металлов, нагретых в зоне деформации до пластического состояния короткими (0,02-0,04 с) импульсами тока силой 10-20 кА. В результате каждого из последовательных циклов образуется единичная площадка наплавленного металла, перекрывающая соседние. Деформация наплавляемого металла за цикл составляет 40-60 %.*

Основные технологические параметры послойной электроконтактной наплавки:  $p_p$  – усилие на электроде;  $v$  – окружная скорость наплавляемой поверхности;  $h$  – шаг наплавки;  $I$  и  $I_a$  – действующее и амплитудное значения тока наплавки;  $t_{II}$  – длительность импульса тока  $I$ ;  $t_{II}$  – пауза между импульсами;  $t_{II}$  – длительность цикла наплавки.

*Преимущества послойной электроконтактной наплавки – высокая производительность и низкая энергоемкость – наиболее полно раскрываются при наплавке тонких слоев.*

Перспективным представляется изготовление с помощью электроконтактной наплавки биметаллического (Ст.40Х + Р18)

металлорежущего инструмента: протяжек, дисковых фрез, разверток и др. При этом достигается экономия быстрорежущей стали и повышение стойкости инструмента за счет термомеханического упрочнения в процессе электроконтактной наплавки.

#### 4.9 Плакирование сваркой взрывом

Одна из основных схем сварки взрывом связана с действием кумулятивной струи, так называемая угловая схема. Свариваемые неподвижная деталь (основание) 1 и μεταемая пластина (облицовка) 2 располагаются под углом  $\alpha$  на заданном расстоянии  $h_0 = 2+3$  мм (рис. 4.27).

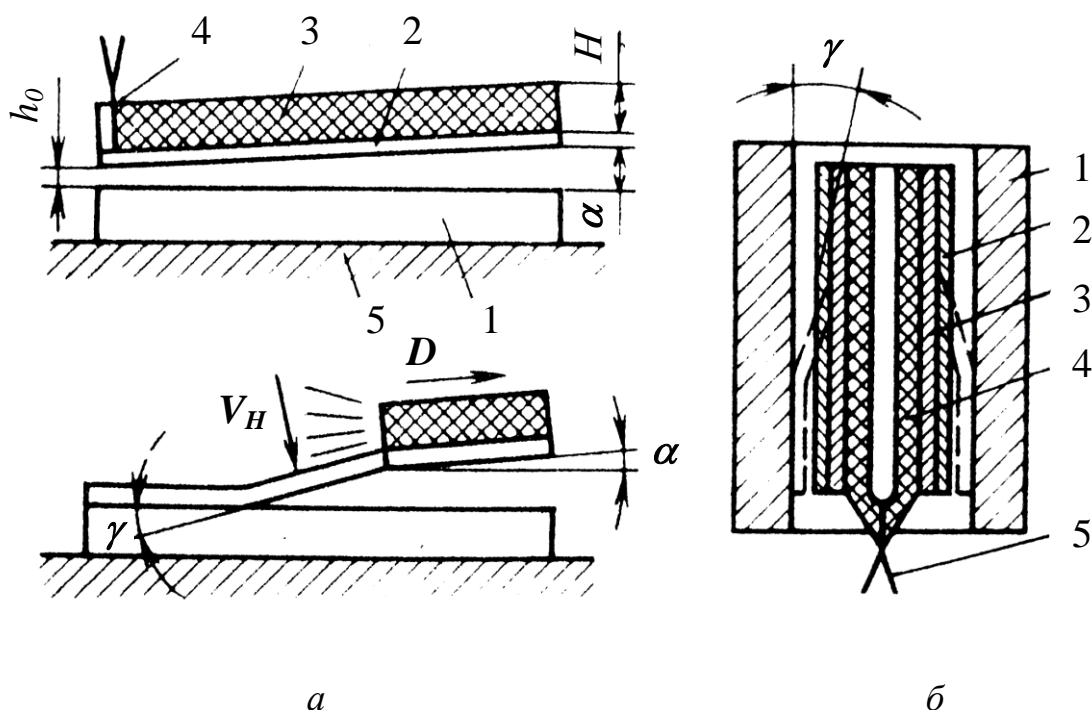


Рисунок 4.27 – Схема сварки взрывом:

- a* – детали, собранные под сварку по угловой схеме и в процессе сварки;
- б* – облицовка внутренней поверхности трубной заготовки.
- 1 – основание (деталь); 2 – μεταемая пластина (облицовка);
- 3 – заряд взрывчатого вещества; 4 – детонатор; 5 – жесткая опора

На μεταемую пластину укладывают заряд 3 взрывчатого вещества (ВВ) толщиной  $H$ . В вершине угла устанавливают детонатор 4. Сварка производится на жесткой опоре 5.

*После инициирования взрыва детонация распространяется в ВВ из точки 4 во все стороны с постоянной скоростью  $V$ , зависящей от свойств ВВ и толщины заряда. Развиваемое в зоне процесса давление (миллионные доли секунды) ограничивает диффузионные процессы, что позволяет сваривать металлы, которые при других процессах сварки образуют хрупкие интерметаллидные соединения; процесс сварки осуществляется тем легче, чем больше отношение площади соединения к толщине металла пластины. Осуществлены соединения площадью 15-25 м<sup>2</sup>. Сварка взрывом нашла применение при плакировании биметаллических заготовок и готовых элементов конструкций.*

#### **4.10 Компьютерные системы проектирования наплавочных технологий**

В Институте электросварки им. Е.О. Патона разработаны две компьютерные системы, предназначенные для проектирования технологий механизированной электродуговой наплавки. Первая из них – ASWARE является экспертной системой общего назначения. С ее помощью разрабатывают технологии наплавки деталей машин и механизмов различных отраслей промышленности; можно решать следующие основные задачи, связанные с проектированием технологий послойной наплавки: выбор наплавочных материалов в зависимости от условий работы и видов изнашивания деталей; выбор способов и техники наплавки; выбор материала подслоя; определение режимов наплавки; выбор условий предварительного подогрева и последующего охлаждения наплавляемой детали.

Наряду с экспертными системами общего назначения, охватывающими широкую номенклатуру деталей, подлежащих восстановлению и упрочнению в различных отраслях промышленности, представляет интерес разработка специализированных систем, ориентированных на отдельные виды производств.

Вторая разработанная компьютерная система MetASWARE предназначена для проектирования технологий электродуговой наплавки деталей металлургического оборудования.

В укрупненном виде структура системы ASWARE представлена на рис. 4.28. Основным структурным элементом экспертной системы является блок «проектирование технологий наплавки». В задачи этого блока входят: выбор наплавочных материалов; выбор способа и техники

наплавки; выбор материала подслоя; определение параметров предварительного подогрева и охлаждения детали после наплавки; выбор режимов наплавки.

В базе данных «наплавочные материалы» сосредоточена информация, необходимая для выбора наплавочных материалов в зависимости от условий работы и видов изнашивания, которым подвергается деталь. Для каждого наплавочного материала в базе данных имеется информация по следующим показателям: возможные типы наплавляемых деталей; допустимые способы наплавки; виды изнашивания; среда, в которой работает наплавленная данным материалом деталь, и ее характеристики (тип среды, ее температура и давление); контртело, с которым взаимодействует деталь, и его характеристики; виды трения и нагрузок, которые испытывает деталь в процессе эксплуатации, и др. База данных включает информацию о 240 наплавочных материалах (электроды; порошковые и сплошные проволоки; холоднокатаные, спеченные и порошковые ленты, порошки), которые разработаны и изготавливают различные предприятия Украины и России.

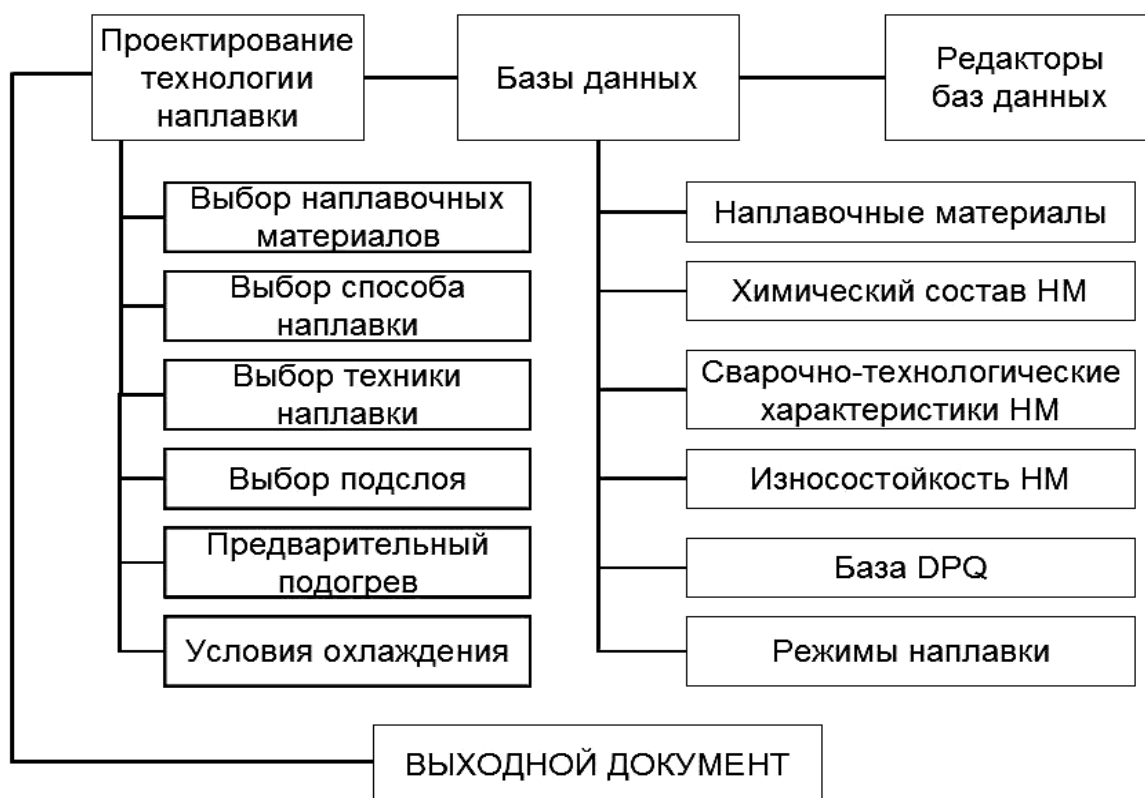


Рисунок 4.28 – Структурная схема экспертной системы ASWARE



Завершающим этапом работы экспертной системы является формирование *выходного документа*, в котором отражаются результаты совместной работы компьютера и пользователя по выбору наплавочных материалов, технологии и техники наплавки.

Для поддержания баз в актуальном состоянии разработан *автономный редактор баз данных*.

Компьютерные системы ASWARE и MetASWARE функционируют в среде WINDOWS с широким использованием присущей этой программе элементов интерфейса: разнообразных «меню», машинной графики и других компонентов, что делает системы удобными и простыми в эксплуатации. В системе ASWARE предусмотрен многоязыковый (английский, немецкий, русский) режим диалога пользователя с компьютером.

Экспертные системы рассчитаны на широкий круг пользователей, занимающихся разработкой технологий наплавки на различных предприятиях, в конструкторско-технологических бюро и научных учреждениях; возможно использование систем в учебном процессе.

#### **4.11 Преимущества и недостатки технологии наплавки**

Наплавка сыграла большую роль в деле увеличения производительности труда, повышения качества продукции и экономии сырья при производстве промышленного оборудования, его эксплуатации и ремонте. В дальнейшем предстоит освоение новых разработок по созданию сварочных материалов, обладающих более высокими технологическими и эксплуатационными характеристиками, а также более производительного оборудования.

По сравнению с другими способами поверхностной обработки металла технология наплавки обладает рядом преимуществ и недостатков.

К преимуществам технологии наплавки можно отнести следующее:

1. Возможность нанесения послойно металлического покрытия большой толщины. Это позволяет изготавливать сосуды высокого давления из обычной стали с последующей наплавкой коррозионно-стойкой стали на внутреннюю поверхность, что более экономично по сравнению с применявшейся ранее технологией изготовления сосудов из плакированной стали, получаемой прокаткой. Наплавка приносит также большой эффект при восстановлении деталей с большой величиной износа.

2. Высокая производительность. При наплавке валков прокатных станов или сосудов высокого давления с помощью ленточных электродов производительность процесса достигает 15-25 кг/ч.

3. Относительная простота конструкции и транспортабельность оборудования, приспособленного для выполнения работ вне помещения. Например, наплавка покрытыми электродами или полуавтоматическая позволяет ремонтировать изношенные детали землеройных и других строительных машин в полевых условиях.

4. Отсутствие ограничений по размерам наплавляемых поверхностей изделий. Наплавку можно применять для таких крупногабаритных объектов, как сосуды высокого давления атомных реакторов и конусы засыпных аппаратов доменных печей, тогда как другие способы поверхностной обработки (горячее или электролитическое металлопокрытие, цементация и т. д.) имеют существенные ограничения по размерам обрабатываемых изделий. Например, толстостенные сосуды высокого давления можно изготавливать из технологического стального листа с последующей износостойкой наплавкой внутренней поверхности, что значительно проще, чем изготовление таких сосудов из плакированного стального листа, не обладающего достаточной технологичностью.

5. Простота выполнения, не требующая высокой квалификации рабочего. Достаточно высокая квалификация сварщика необходима только при ручной наплавке покрытыми электродами, тогда как при механизированной наплавке (например, при наплавке под флюсом) процесс значительно упрощается. Сварщик, хорошо овладевший сваркой, например, при строительстве зданий и мостов, производстве химического оборудования и в других отраслях, может достаточно квалифицированно выполнять наплавку.

6. Возможность нанесения износостойкого покрытия на основной металл любого состава. При упрочнении закалкой, азотированием и другими аналогичными способами высокий эффект поверхностного упрочнения достигается лишь для металла определенного состава, тогда как при наплавке состав и свойства основного металла не имеют большого значения. В случаях, когда основной металл имеет низкую свариваемость, предварительно наносят подслои низкоуглеродистой стали, а затем наплавляют слой твердого металла. Отсутствие ограничений по составу (типу) стали для наплавляемых изделий позволяет снизить себестоимость производства и упростить технологию изготовления изделий.

7. Возможность повышения эффективности наплавки путем ее сочетания с другими способами поверхностной обработки. После наплавки изделие иногда подвергают пламенной закалке или азотированию. Например, для облегчения обработки резанием валы, ролики, валки и другие изделия можно наплавлять материалом с твердостью  $HV < 400$  и после механической обработки упрочнять пламенной закалкой.

К недостаткам технологии наплавки можно отнести следующее:

1. Ухудшение свойств наплавленного слоя из-за перехода в него элементов основного металла. При ручной наплавке покрытыми электродами или автоматической под флюсом деталей из низкоуглеродистой или низколегированной стали вследствие интенсивного разбавления первого слоя наплавленного металла основным и значительного увеличения содержания в составе наплавленного слоя железа коррозионная стойкость его заметно снижается.

2. Деформация изделия, вызываемая высокой погонной энергией наплавки. Неправильный выбор режима наплавки может привести к чрезмерной деформации изделия и браку. Для сохранения точности формы и размеров наплавляемого изделия приходится принимать особые меры: наплавку изделия вести в зажатом состоянии, исключая его деформацию; создавать предварительную деформацию изделия с таким расчетом, чтобы деформация, вызываемая наплавкой, направленная в противоположную сторону, обеспечивала возврат к исходной правильной форме изделия; осуществлять последующую механическую обработку до окончательных размеров.

3. Некоторая неравномерность свойств изделий, обусловленная тем, что наплавленный слой, в отличие от плакированного, имеет характерные свойства и особый состав, присущие металлу сварных швов. В этой связи исключается возможность использования при наплавке неквалифицированного сварщика. При наплавке аустенитной коррозионно-стойкой стали для предотвращения образования горячих трещин необходимо применение такого материала, в структуре которого содержится несколько процентов феррита, что не позволяет получить в наплавленном слое полностью аустенитную структуру, какая бывает обычно в плакированном слое.

4. Более ограниченный, чем, например, при напылении выбор сочетаний основного и наплавленного металла. Наплавка допускает разнообразные сочетания основного и наплавочного материалов, однако в отличие от напыления имеются определенные ограничения. Например, при

изготовлении стальных сосудов с титановым покрытием используют напыление или плакирование прокаткой, либо взрывом. Титан обладает удовлетворительной свариваемостью. Однако при наплавке стали титаном на границе основного металла и наплавленного слоя образуется хрупкая прослойка интерметаллических соединений, что практически исключает возможность применения этих методов.

5. Трудность наплавки мелких изделий сложной формы. Наплавка сопровождается оплавлением поверхностного слоя основного металла и протекает в условиях непрерывного перемещения сварочной ванны, состоящей из смеси основного и наплавляемого металлов. При наплавке мелких изделий условия для нормального формирования такой ванны ухудшаются. При сложной форме изделий также затруднено ее плавное перемещение, что исключает образование ровного качественного наплавленного слоя.

Изложенные выше преимущества и недостатки процесса наплавки следует учитывать при выборе оптимального способа ее осуществления, требуемого сварочного оборудования и материалов.

#### **4.12 Вопросы для самостоятельного контроля**

1. Понятия. Виды наплавки.
2. Классификация способов наплавки.
3. Сущность процесса электродуговой наплавки.
4. Дайте общую характеристику механических наплавки.
5. Дайте общую характеристику термических наплавки.
6. Дайте общую характеристику термомеханических наплавки.
7. Назовите основные достоинства и недостатки технологии наплавки.

## РАЗДЕЛ 5

### ИНТЕГРИРОВАННЫЕ ГЕНЕРАТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕХОДНОГО ММ-МКМ УРОВНЯ

#### 5.1 Основные понятия

К интегрированным генеративным технологиям переходного уровня можно отнести газотермические технологии.

Газотермические технологии базируются на процессах выращивания слоев металлов на поверхности детали с помощью высокотемпературной скоростной струи, содержащей частицы порошка или капли расплавленного осаждаемого материала, наслаивающиеся на основном металле при высокоскоростном ударном столкновении с его поверхностью.

При любом способе выращивания поверхность основного материала располагают на расстоянии не менее 100 мм от среза сопла горелки.

Принципиальная схема процессов газотермического нанесения покрытий представлена на рис. 5.1.

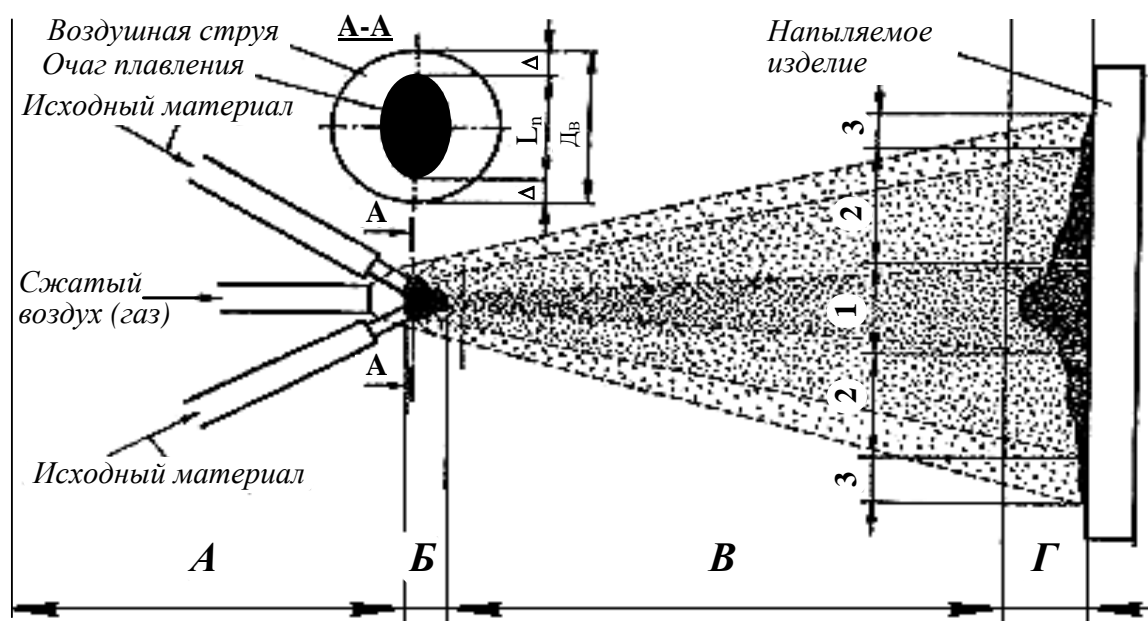


Рисунок 5.1 – Принципиальная схема процессов газотермического нанесения покрытий:

**А** – зона подготовки для распыления; **Б** - расплавление исходного материала;  
**В** - образование факела: **Г** - образование слоя наносимого материала;  
1 - пятно максимального насыщения, 2 - кольцо среднего насыщения,  
3 - кольцо минимального насыщения,  $D_B$  - диаметр воздушной среды - длина  
очага плавления,  $L_n$  - величина перекрытия воздушной струей очага плавления

Исходный материал покрытия в виде проволоки, порошка, набитого порошком «шнура» подается в зону плавления, где подплавляется (порошок) или расплавляется полностью. В очаг плавления подается струя воздуха (газа), которая диспергирует (измельчает) расплав на частички и с высокой скоростью доставляет их к поверхности подложки детали. Расплавленные частички, ударяясь о поверхность, закрепляются на ней и остывают, образуя нанесенный слой покрытия, состоящий из большого количества соединенных между собой частичек. Образовавшееся покрытие как правило не сплошное, имеет много пор и пустот, для устранения которых необходимы дополнительные операции теплового или деформационного воздействия.

## 5.2 Классификация методов послойного газотермического выращивания покрытий

В основу классификации газотермических методов положены признаки, которые имеют преимущественное значение для организации технологии нанесения слоев.

По виду источника тепловой энергии, необходимой для нагрева или распыления вещества наносимого материала, различают следующие основные способы (рис. 5.2).

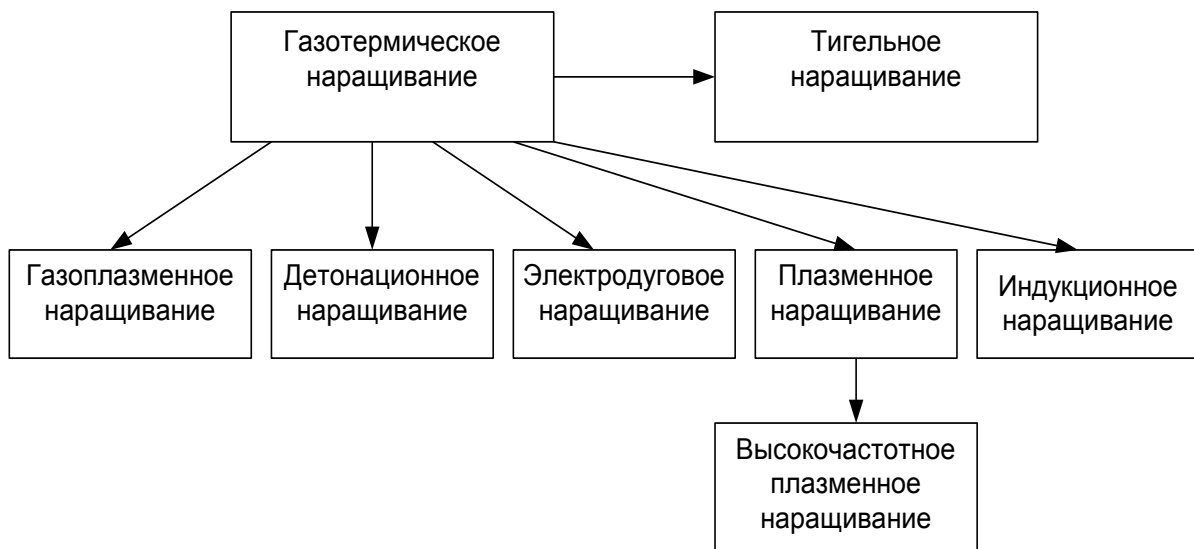


Рисунок 5.2 – Классификация методов послойного газотермического наращивания покрытий

- *Газопламенный способ послойного наращивания*, где для нагрева и диспергирования (размельчения) наносимого вещества используют теплоту сгорания струи смеси газов, сжигаемых посредством горелки.
- *Детонационный метод послойного наращивания*, при котором используется струя продуктов сгорания газов в режиме детонации.
- *Электродуговой метод послойного наращивания*, при котором нагревание металла в виде проволоки, прутка или ленты производится электрической дугой, а диспергирование его расплава – напорной струей сжатого газа.
- *Плазменный метод наращивания*, при котором для нагрева и диспергирования материала используется плазменная струя.
- *Индукционный метод наращивания*, при котором для плавления металла используют индукционный нагрев токами высокой частоты, а диспергирование расплава производят струей газа.
- *Тигельный метод наращивания*, при котором используется расплавленный в тигле наносимый материал, распыляемый нагретой газовой струей сжатого воздуха. Применяется ограниченно из-за технологических сложностей и из-за невозможности использовать при этом ряда тугоплавких материалов.

*По виду компактного состояния* исходного материала, который может подаваться в зону газотермического диспергирования в виде порошка, прутка (проволоки), набивного порошком шнура или расплавленного металла.

*По виду защиты рабочей зоны газотермического наращивания* – без защиты, с местной защитой или общей защитой в герметичной камере. Без защиты процесс наращивания производится в условиях нормального (атмосферного) давления, а при общей защите – в условиях полностью контролируемой атмосферы, когда в объеме рабочей камеры поддерживается заданный химический состав, температура и давление газовой среды.

*По характеру периодичности газотермического потока* – непрерывного, циклического или импульсного.

*По степени механизации и автоматизации технологических операций наращивания*. При ручном методе – механизирована только операция доставки технологических материалов в зону газотермического диспергирования. Полностью автоматизированное производство проводится без операционного вмешательства оператора на протяжении всего рабочего цикла.

*По функциональному назначению* различают следующие виды покрытий (рис. 5.3):

*антиадгезионное* – износостойкое покрытие, снижающее склонность контактирующих поверхностей к адгезионному взаимодействию или схватыванию;

*антифрикционное* – износостойкое покрытие, понижающее коэффициент трения в рабочей паре трения;

*жаростойкое* – коррозионностойкое покрытие, повышающее сопротивление поверхности разрушению при высоких температурах;

*защитное* – покрытие, защищающее поверхность от внешних воздействий;

*износостойкое* – покрытие, повышающее сопротивление поверхности различным видам изнашивания;

*корковое* – покрытие, сформированное на основе в целях копирования ее формы или снимаемое с основы для использования в самостоятельных целях;

*коррозионностойкое* – защитное покрытие, повышающее сопротивление основы коррозионному разрушению;

*теплозащитное* – терморегулирующее покрытие, снижающее воздействие тепловых потоков на защищаемую поверхность;

*терморегулирующее* – покрытие, обеспечивающее регулирование поглощения или излучения поверхностью тепловых потоков;

*термостойкое* – покрытие, обладающее необходимой работоспособностью в условиях многократных изменений температуры;

*уплотнительное* – покрытие, обеспечивающее необходимую стабильность зазоров в сопряженных элементах конструкции изделия;

*фрикционное* – износостойкое покрытие, повышающее коэффициент трения;

*эрозионностойкое* – покрытие, уменьшающее износ в результате воздействия высокоскоростных (турбулентных) абразивосодержащих потоков на защищаемую поверхность.

Огромное многообразие функционального назначения газотермических покрытий способствовало широкому развитию и внедрению в промышленность этих технологий.



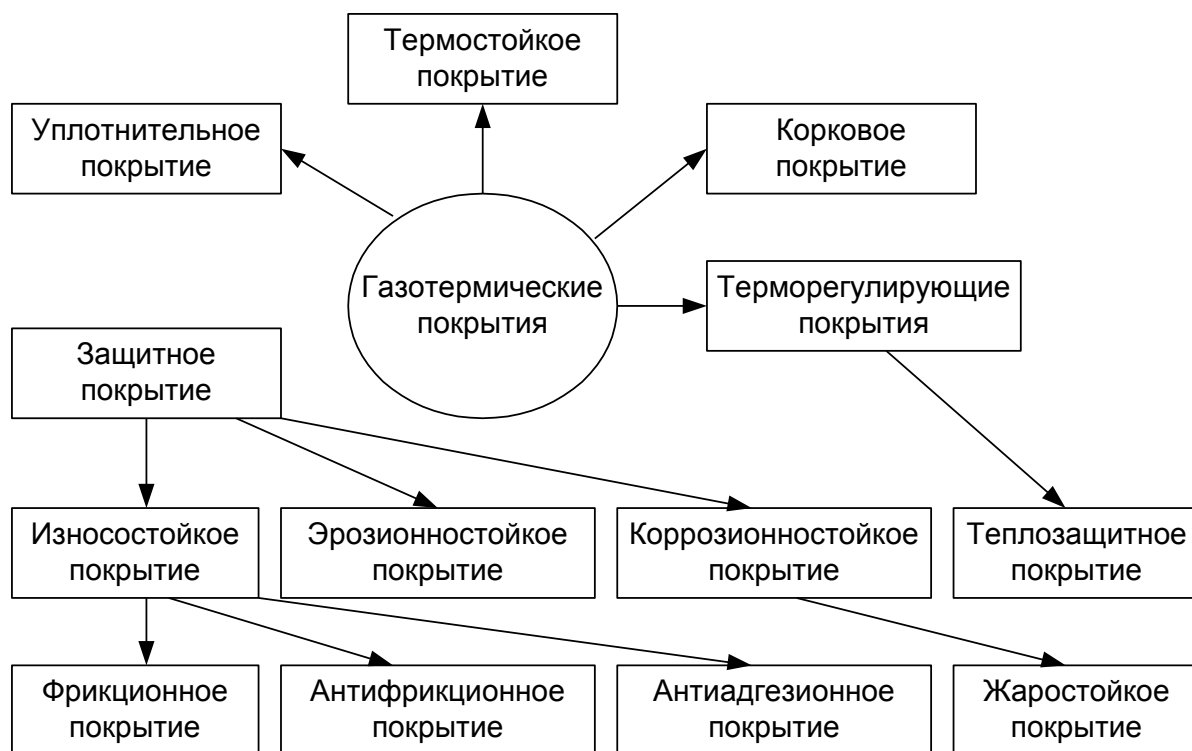


Рисунок 5.3 – Классификация газотермических покрытий по функциональному назначению

## 5.3 Технологии послойного газотермического наращивания покрытий

### 5.3.1 Газопламенное наращивание

Газопламенное наращивание в зависимости от состояния исходного материала может осуществляться с использованием проволоки, прутка и порошка.

На рис. 5.4 показан принцип газопламенного наращивания из проволоки, аналогичного напылению из прутка. В обоих случаях наносимый материал, имеющий форму прутка или проволоки, подают через центральное отверстие горелки и расплавляют пламенем горючей смеси. Расплавленные частицы металла подхватываются струей сжатого воздуха и в мелкораспыленном виде направляются на поверхность изделия. Проволока подается с заданной скоростью роликами, приводимыми в движение встроенной в горелку воздушной турбиной, работающей на сжатом воздухе, или электродвигателем через редуктор.

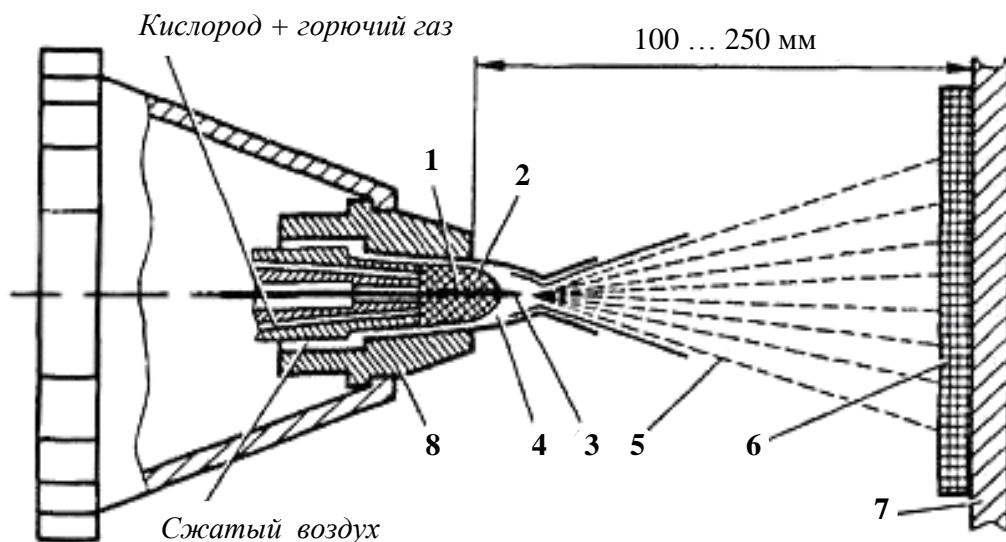


Рисунок 5.4 – Газопламенное наращивание с использованием проволоки:

- 1 - проволока, 2 - пламя, образующееся при сгорании,
- 3 - оплавливающийся конец проволоки, 4 - воздушный поток,
- 5 - частицы металла, 6 - покрытие, 7 - подложка, 8 - насадка

Горелка (пистолет) с приводом от электродвигателя позволяет более точно регулировать подачу проволоки и поддерживать ее постоянную скорость. Однако такие горелки имеют большую массу, поэтому их устанавливают в механизированных установках для наращивания. Обычно используют проволоку диаметром не более 3 мм, однако при использовании легкоплавких металлов (алюминий, цинк и т. п.) в интересах повышения производительности процесса допускается использование проволоки диаметром 5-7 мм.

При использовании порошка последний поступает в горелку сверху из бункера через отверстие, разгоняется потоком транспортирующего газа (смесь кислорода с горючим газом) и на выходе из сопла попадает в пламя, где происходит его нагрев. Увлекаемые струей горячего газа частицы порошка попадают на поверхность подложки (изделия). В порошковых горелках, как и в проволоочных, подача осаждаемого материала в пламя и разгон образующихся расплавленных частиц могут осуществляться струей сжатого воздуха.

Схема установки для выращивания покрытий с использованием проволоки показана на рис. 5.5. В этой установке редуктор снижает давление сжатого воздуха, поступающего из воздушной емкости, а осушитель удаляет из воздуха влагу и масло. В качестве горючего газа в большинстве случаев используют ацетилен, можно также применять пропан и водород.

При газопламенном способе используются материалы, температура плавления которых ниже температуры пламени.

При использовании порошка на расстоянии 60-70 мм от сопла температура пламени превышает 2500°C; по мере дальнейшего увеличения расстояния она постепенно снижается: на расстоянии 100 мм температура составляет 1900°C, на расстоянии 150 мм – 1400°C. При использовании проволоки быстрое снижение температуры пламени начинается от самого среза сопла горелки и нарастает по мере увеличения расстояния: на расстоянии 50 мм температура пламени составляет 1500°C, на расстоянии 100 и 150 мм – 500 и 200°C соответственно. Это связано с охлаждающим действием на пламя струи сжатого воздуха.

После осаждения иногда проводят оплавление покрытия. Оплавление обеспечивает получение плотного покрытия, практически без пористости.

*Технология послойного газопламенного выращивания покрытий довольно проста, а стоимость оборудования и затраты на эксплуатацию низкие. В связи с этим данный способ нашел наиболее широкое применение в практике.*

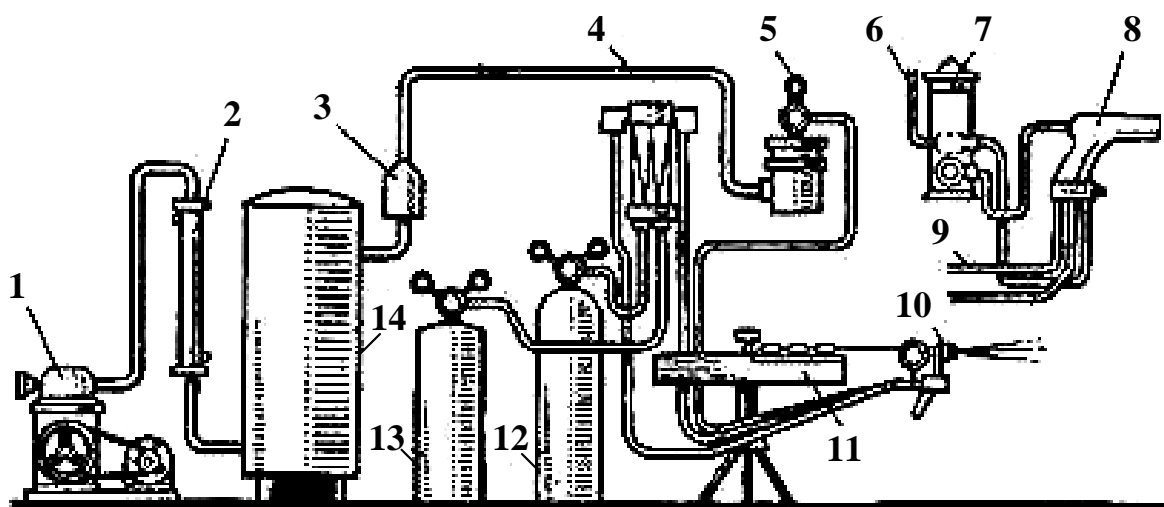


Рисунок 5.5 – Схема газопламенной установки, использующей проволоочный и порошковый материал:

- 1 - компрессор, 2 - теплообменник, 3 - осушитель, 4 - расходомер,
- 5 - редуктор для регулирования подачи сжатого воздуха,
- 6 - подвод к регулятору подачи сжатого воздуха, 7 - бункер для порошка,
- 8 - горелка, напыляющая порошок, 9 - шланг к расходомеру,
- 10 - горелка, распыляющая проволоку, 11 - бухта проволоки,
- 12 - кислородный баллон, 13 - ацетиленовый баллон, 14 – ресивер

### 5.3.2 Детонационное покрытие

Схема получения детонационного покрытия показана на рис. 5.6. В камеру водоохлаждаемого ствола установки диаметром 25.4 мм подается кислород и ацетилен в строго определенных количествах; ствол направляется на обрабатываемую деталь (а). Затем через специальное отверстие в камере азотом подается порошок напыляемого материала, например, карбид вольфрама с добавлением небольшого количества металла, оксид алюминия и т.п. (б). Газовую смесь, в которой во взвешенном состоянии находится порошок, поджигают электрической искрой (в). В результате взрыва смеси происходит выделение теплоты и образуется ударная волна, которая разогревает и разгоняет частицы порошка в направлении к поверхности изделия (г).

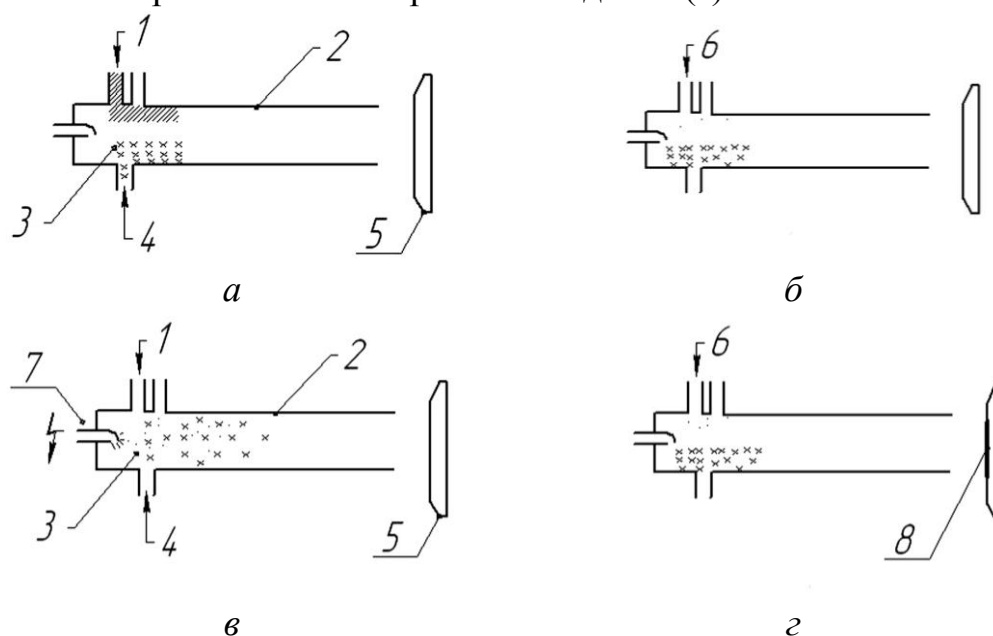


Рисунок 5.6 – Схема получения детонационного покрытия:

- 1 - сопло для подачи кислорода; 2 - водоохлаждаемый ствол;
- 3 - камера сгорания; 4 - сопло для подачи ацетилена;
- 5 - основной материал (подложка);
- 6 - сопло для подачи в камеру сгорания карбида вольфрама с азотом;
- 7- свеча зажигания; 8- покрытие

Азот и горючий газ выходят из ствола установки сразу же после взрыва, затем ствол продувается азотом для удаления продуктов горения. Процесс отрегулирован таким образом, что повторяется с частотой 3-4 цикла в секунду. За один цикл получают покрытие толщиной ~ 6 мкм. Процесс осуществляют до получения покрытия заданной толщины (0,25-0,3 мм).

Во время взрыва порошковый материал приобретает большую кинетическую энергию, так что скорость частиц на расстоянии 75 мм от среза ствола установки составляет  $\sim 820$  м/с. При размещении поверхности основного материала на указанном расстоянии порошок в момент столкновения с поверхностью разогревается до температуры  $4000^{\circ}\text{C}$ . Высокая скорость движения частиц и их разогрев при детонационном методе обеспечивают получение покрытия высокой плотности и прочности сцепления с основой. *При этом температура основного материала остается низкой, исключая его деформацию или иное физическое изменение, что позволяет использовать этот метод для прецизионных деталей.*

Вместе с тем детонационной технологии свойственны недостатки, связанные, в частности, с возможностью нанесения покрытия только на те материалы, в которых не получают остаточной деформации при действии взрывной волны. Из-за большого шума (до 140 дБ) оборудование для детонационной технологии устанавливают в камере с двойными стенами, а наблюдение за процессом осуществляют через смотровое окно. К недостаткам этого метода относится также сравнительно высокая стоимость оборудования.

### **5.3.3 Электродуговая металлизация**

Принципиальная схема дуговой металлизации показана на рис. 5.7.

Через два канала в горелке непрерывно подают две проволоки (диаметром 1,5-3,2 мм), между концами которых возбуждается дуга и происходит их расплавление. *Расплавленный металл подхватывается струей сжатого воздуха, истекающего из центрального сопла электрометаллизатора, и в мелкорасплавленном виде переносится на поверхность основного материала. Распыление и транспортирование расплавленного металла осуществляются обычно сжатым воздухом, хотя для коррозионно-стойкой стали и алюминиевых сплавов используют азот.* При постоянном токе процесс протекает стабильно, обеспечивая получение слоя покрытия с мелкозернистой структурой при высокой производительности процесса. Поэтому в настоящее время применяют источники постоянного электрического тока со стабилизатором напряжения.

Дуговая металлизация обладает следующими преимуществами. Применение мощных электрометаллизационных установок позволяет значительно повысить производительность процесса и сократить затраты времени. Например, при силе тока 750 А можно выращивать стальное

покрытие производительностью 36 кг/ч, а при силе тока 500 А – цинковое покрытие с производительностью 1,2 кг/мин, что в несколько раз превышает производительность газопламенного метода. По сравнению с газопламенным методом электрометаллизация позволяет получать более прочные покрытия, которые лучше соединяются с основой. При использовании в качестве электродов проволок из двух различных металлов можно получить покрытие из их сплава. Такого рода сплавы называют *псевдосплавами*. Эксплуатационные расходы при электрометаллизации небольшие. При выращивании покрытия распылением двух электродов из разнородных материалов желательно применять такие электрометаллизаторы, которые позволяют отдельно регулировать скорости подачи каждого электрода.

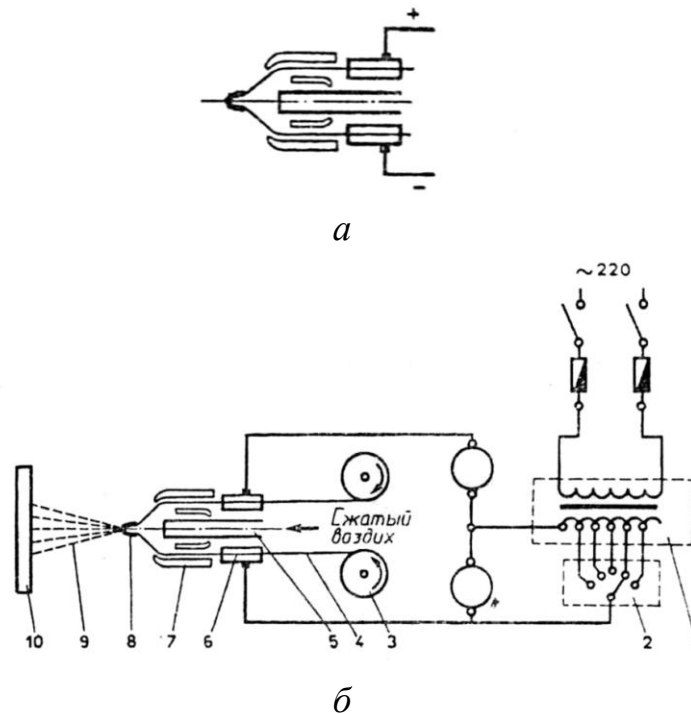


Рисунок 5.7 – Схема процесса электродуговой металлизации:

- a* – на постоянном токе, *б* – на переменном токе,  
 1 - понижающий трансформатор, 2 - переключатель напряжения,  
 3 - катушка с проволокой, 4 - распыляемый проволочный материал,  
 5 - сопло для сжатого воздуха, 6 - контактные трубки,  
 7 - направляющее устройство для проволок, 8 - электрическая дуга,  
 9 - факел распыляемого металла, 10 - напыляемое изделие

К числу недостатков дугового метода относится опасность перегрева и окисления напыляемого материала при малых скоростях подачи проволоки.

Кроме того, большое количество теплоты, выделяющейся при горении дуги, приводит к значительному выгоранию легирующих элементов, входящих в наносимый сплав (например: содержание углерода в материале покрытия снижается на 40-60%, а кремния и марганца – на 10-15%).

### 5.3.4 Метод выращивания покрытий из плазмы

При температуре около абсолютного нуля молекулы газа, состоящие из двух атомов (водорода, азота и т. п.), имеющие вид гантели (а), совершают только параллельное перемещение по осям  $x$ ,  $y$  и  $z$ , а при температуре 10 К возникают также вращательные движения. При дальнейшем повышении температуры, например, до 1000 К, возникают колебания атомов (б). Интенсивные столкновения молекул вызывают их диссоциацию (распад на атомы) (в). Температура перехода в атомарное состояние зависит в основном от рода газа и его парциального давления. Для кислорода она составляет 3000 К, для азота ~ 4500 К.

Необходимую для распада молекул энергию диссоциации выражают обычно в электрон-вольтах (эВ) в расчете на одну молекулу.

При дальнейшем повышении температуры развивается процесс ионизации газов, выражающейся в потере атомами электронов.

Достаточно полная ионизация кислорода при атмосферном давлении наступает при 10 000 К.

*Газ, в котором значительная часть атомов или молекул ионизирована, а концентрация электронов и отрицательных ионов равна концентрации положительных ионов, называется плазмой.*

Отличительная черта плазмы – высокая электропроводимость. Обычная электрическая дуга также находится в плазменном состоянии. Принцип напыления показан на рис. 5.8.

Между катодом (из чистого вольфрама или с добавлением 2% тория) и медным водоохлаждаемым соплом, служащим анодом, возникает дуга, нагревающая поступающий в сопло горелки рабочий газ, который истекает из сопла в виде плазменной струи. В качестве рабочего газа используют аргон или азот, к которым иногда добавляют водород. Порошковый наплавочный материал подается в сопло струей транспортирующего газа, нагревается плазмой и с ускорением переносится на поверхность основного материала для образования покрытия.

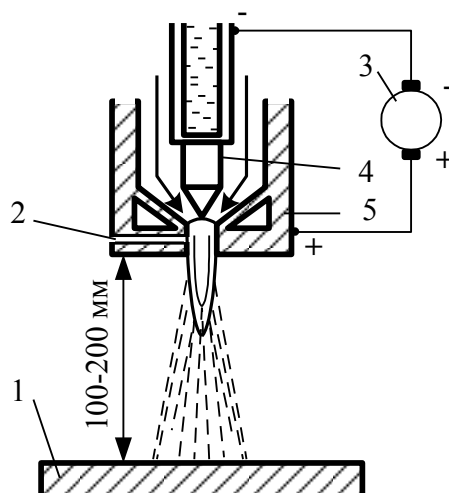


Рисунок 5.8 – Схема плазменного наращивания:

- 1 - плазмообразующий газ; 2 - место ввода напыляемого материала;  
 3 - источник питания; 4 - катод; 5 - анод

КПД плазменной горелки составляет в среднем 60%. Это значит, что 60% общего потребления электрической энергии затрачивается на нагрев рабочего газа до средней температуры на выходе из сопла.

*Выращивание покрытия из плазмы обладает рядом важных преимуществ: высокая температура плазмы позволяет проводить наращивание тугоплавких материалов; возможность регулирования температуры и скорости плазменной струи путем выбора формы и диаметра сопла и режима наращивания расширяет диапазон используемых материалов (металлы, керамика и органические материалы); открывается возможность использования в камерах атмосферы инертного газа. Покрытия, полученные методом плазменного наращивания, обладают высокой плотностью и хорошим сцеплением с основой. Сравнительно низкая производительность процесса, шум при работе и интенсивное ультрафиолетовое излучение – недостатки плазменного метода. Кроме того, он отличается высокой стоимостью оборудования и большими эксплуатационными затратами.*

### **5.3.5 Высокочастотное плазменное наращивание (ВЧ - плазменное наращивание)**

*Высокочастотное плазменное послойное наращивание – это разновидность плазменного газотермического метода, выделившаяся в*



самостоятельный благодаря его энергетической особенности, проявляемой в характеристиках источника тепловой энергии, необходимой для диспергирования вещества наносимого материала. Схема высокочастотной плазменной установки представлена на рис. 5.9.

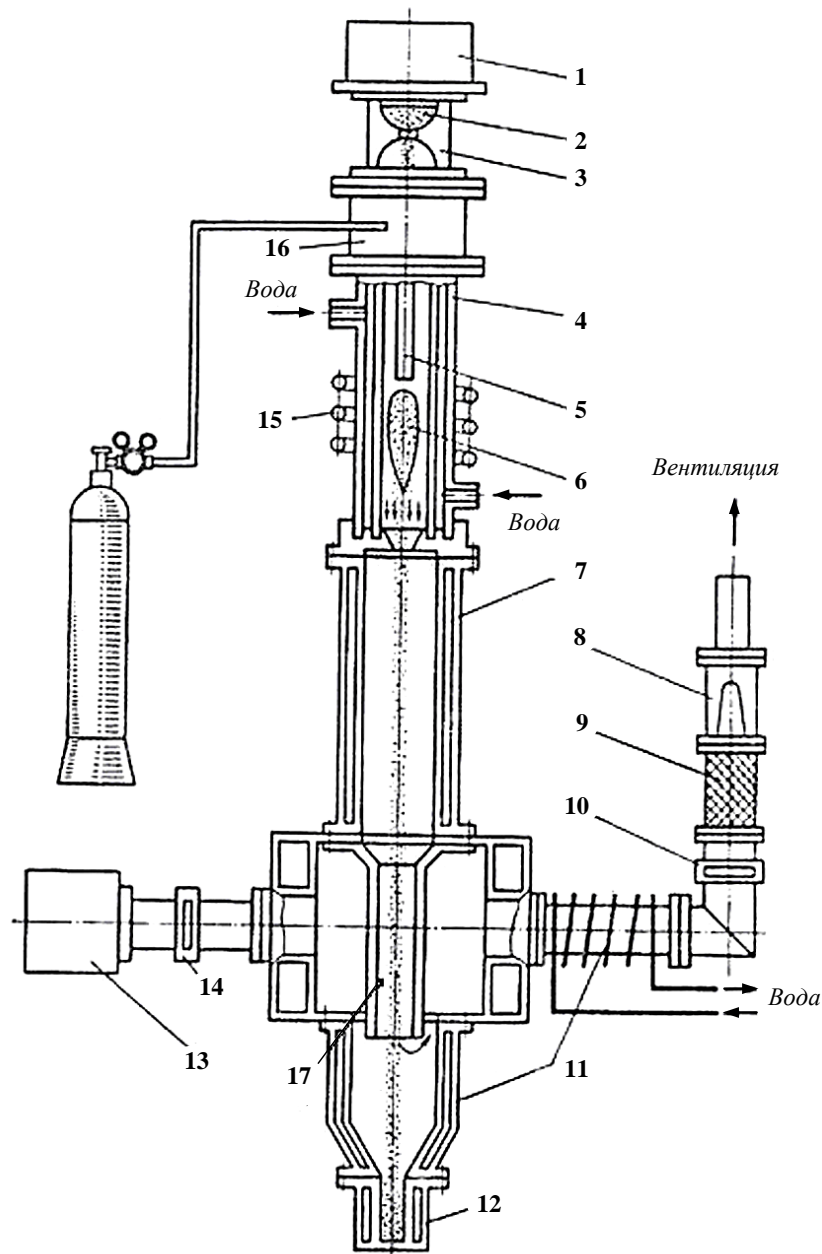


Рисунок 5.9 – Схема высокочастотной плазменной установки:

- 1 - вибратор, 2 - порошок, 3 - питатель, 4 - кварцевая камера,
- 5 - трубка ввода порошка, 6 - плазма, 7 - холодильник, 8 - фильтр, 9 - циклон,
- 10 - вентиль, 11 - холодильник, 12 - сборник, 13 - форвакуумный насос,
- 14 - вентиль, 15 - индуктор, 16 - ввод газа,
- 17 - напыляемое изделие (внутренняя поверхность вала)

*ВЧ – плазменное наращивание подразумевает использование ВЧ - плазмотрона как рабочего инструмента для термического диспергирования наносимого материала и разогрева его до температур плавления или испарения. Получаемое газотермическое покрытие приобретает особо качественные характеристики.*

*Конструкция технологического узла ВЧ – плазмотрона состоит из газоразрядной (рабочей) камеры, газораспределительной головки и индуктора. Принцип работы высокочастотной плазменной горелки основан на возможности высокочастотного индукционного разогрева плазмы (как электропроводящей среды) электромагнитным полем высокой частоты. Плазма в этом случае играет роль короткозамкнутого одновиткового проводника, являющегося вторичной обмоткой трансформатора, у которой первичной является сама высокочастотная обмотка.*

Применение высокоэнергетической высокочастотной индукционной плазмы, содержащей углерод и кремний, позволило получить на деталях переходную зону с особыми свойствами: высокой твердостью и прочностью одновременно, высоким сопротивлением ударным нагрузкам и разгаростойкостью. В то же время благодаря тонкому внешнему слою покрытия очень высокой твердости деталь приобретает высокую износостойкость, примерно в 2,5 раза превышающую износостойкость детали после обычной термической обработки.

Процесс характеризуется отсутствием продавливания слоя в условиях повышенных динамических нагрузок, пониженной температурой объемного (интегрального) нагрева деталей (180-200°С).

### **5.3.6 Индукционный метод наращивания покрытий**

Схема метода приведена на рис. 5.10. Металл покрытия в виде проволоки или прутка, помещенный в индуктор, расплавляется с помощью концентратора вихревых токов и наносится на обрабатываемую поверхность струей сжатого воздуха.

Источник питания током высокой частоты – ламповый генератор; охлаждение обмоток концентратора и коаксиального кабеля от генератора осуществляется водой.

Для эффективной работы металлизатора целесообразно применять токи с частотой не ниже 70 кГц при диаметре проволоки (прутка) 4...5 мм. Скорость подачи проволоки в горелку составляет 0,45...1,2 м/мин, размер напыляемых частиц – 20... 120 мкм, давление сжатого воздуха – 0,4 МПа, удельный расход электроэнергии при распылении – 3...4 кВт·ч/кг.

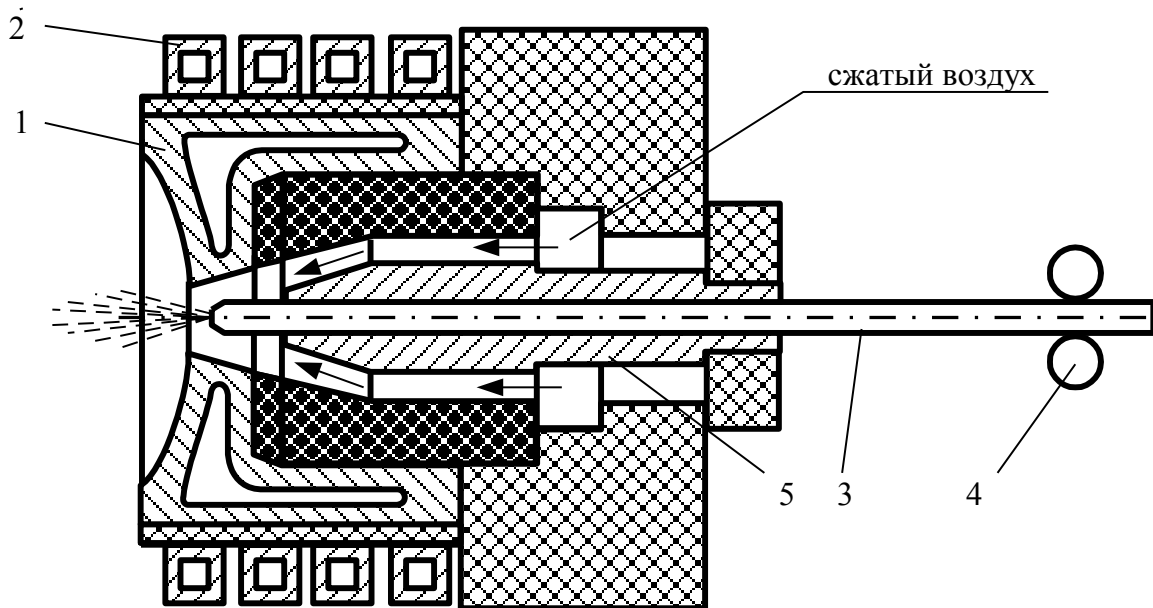


Рисунок 5.10 – Схема высокочастотного индукционного металлизатора:

- 1 - концентратор электромагнитного поля; 2 - индуктор;  
 3 - наращиваемый материал (проволока); 4 - подающие ролики;  
 5 - направляющая вставка

*Высокочастотным металлизатором наносятся стальные, алюминиевые и цинковые покрытия.*

*Преимущества высокочастотного индукционного наращивания заключаются, во-первых, в том, что можно точно регулировать температуру нагрева, во-вторых, очень хорошая аэродинамика распыления дает возможность повысить физико-механические свойства защитного покрытия (твердость, износостойкость, предел прочности при растяжении), а также коэффициент использования диспергируемого металла. Существенным недостатком является необходимость*

использования лампового генератора, который располагается в непосредственной близости от работающего металлатора.

#### **5.4 Преимущества и недостатки газотермических технологий наращивания покрытий**

К преимуществам можно отнести следующие.

1. *Возможность нанесения покрытий на изделия, изготовленные практически из любого материала.* Можно наносить покрытия на изделия, изготовленные не только из металла, но и из стекла, фаянса и фарфора, органических (включая дерево, ткань, бумагу, картон) и многих других материалов. Этим преимуществом не обладает ни один из известных способов поверхностной обработки, из которых одни пригодны только для металлов, а другие, хотя и обладают многими ценными преимуществами, применимы не для всех материалов.

2. *Возможность использования разных материалов на одном и том же оборудовании.*

3. *Отсутствие ограничений по размеру обрабатываемых изделий:* можно покрыть как большую площадь, так и ограниченные участки крупных изделий. При нанесении же металлопокрытия электролитическим осаждением, погружением в расплав или диффузионным насыщением (азотированием, цементацией и др.) возможности обработки изделия ограничены размерами ванны либо печи. Методы приносят большие экономические выгоды в случае неприемлемости других способов упрочнения, например, когда необходимо нанести покрытие на часть крупного изделия.

4. *Возможность применения для увеличения размеров детали (восстановление и ремонт изношенных деталей машин).* Во избежание выбраковки изделия, при механической обработке которого срезан излишний металл, или при реставрации деталей с большим износом, напыление, как и наплавку, можно использовать как способ восстановления размеров деталей. Можно наносить слой толщиной в несколько миллиметров, тогда как при электролитическом хромировании, например, осуществляемом с целью повышения износостойкости, толщина слоя составляет 6-300 мкм.

5. *Относительная простота конструкции оборудования,* его малая масса, несложность эксплуатации, возможность быстрого и легкого перемещения.

6. В комплекте оборудования для газоплазменной технологии достаточно иметь компрессор, который можно также использовать для предварительной пескоструйной обработки поверхности изделия, горелку и газовые баллоны. Если же имеется источник электроэнергии, то напыление можно проводить электрическими методами.

7. Небольшая деформация изделий под влиянием процесса. Многие способы поверхностной обработки изделия требуют нагрева до высокой температуры всего изделия или значительной его части, что часто становится причиной его деформации.

8. Возможность использования газотермических технологий для изготовления деталей машин различной формы. Например, покрытие наносят на поверхность формы-оправки, которую после окончания процесса удаляют: остается оболочка из нанесенного материала.

9. Простота технологических операций нанесения покрытий, относительно небольшая трудоемкость, высокая производительность.

10. Не требуется специальной дорогостоящей обработки (очистки) продуктов, загрязняющих окружающую среду, в отличие от средств очистки и нейтрализации, например, при гальванических видах обработки изделия и др.

Недостатки газотермических технологий можно представить таким перечнем.

1. Малая эффективность нанесения покрытий на мелкие детали из-за низкого коэффициента использования наносимого материала (отношение массы покрытия к общей массе израсходованного материала). В таких случаях поверхностную обработку мелких деталей целесообразно осуществлять гальваническим, химическим, физическим и другими способами (например, диффузионным насыщением, электролитическим, из расплавов металлов и пр.).

2. Вредные условия работы операторов во время предварительной обработки поверхности изделий. Для предварительной подготовки поверхности перед нанесением используют пескоструйную или дробеструйную обработку с помощью кварцевого песка, корунда, стальной или чугунной дроби. Эта операция сопровождается загрязнением рабочего участка и ухудшает условия работы оператора, обслуживающего установку.

3. Выделение дыма и аэрозолей во время наращивания. Процесс сопровождается образованием облака мельчайших частиц наносимого материала, взаимодействие которых с окружающим воздухом сопровождается образованием различных соединений и дыма. Вредность соединений и дыма для здоровья людей требует мощных вытяжных устройств.

4. Рассматриваемые технологии имеют отличительные особенности, знание которых необходимо для правильного выбора определенной технологии нанесения покрытий для каждого конкретного случая. *Для выбора оптимального способа нанесения покрытия необходимо учитывать форму и размеры изделий; требования, предъявляемые к точности нанесения покрытия, его эксплуатационным свойствам; затраты на основное и вспомогательное оборудование, наплавочные материалы и газы, на предварительную и окончательную обработку покрытий; условия труда и другие факторы производственного и социального характера.*

### **5.5 Применение газотермических покрытий**

В промышленно развитых странах с целью решения экологических проблем освоение техники газотермических покрытий происходит путем вытеснения гальванических "грязных" технологий. Насыщенность этими технологиями европейской промышленности выше насыщенности украинских предприятий примерно в 350-400 раз. Ситуация, сложившаяся в 80-90 гг. и приведшая к распаду промышленности в СНГ, в настоящее время дает возможность не реанимировать устаревшие технологии, а, адаптируясь к новым условиям, вместо гальванических методов использовать новейшие технологии нанесения покрытий методами газотермического наращивания.

Газотермические покрытия применяют как при ремонте оборудования, так и при упрочнении рабочих поверхностей новых деталей и характеризуются широтой технологических возможностей:

- покрытия можно наносить на объекты любых размеров: мосты, суда, трубопроводы, строительные конструкции, котлы, коленчатые валы, лопатки турбин и др.;
- толщина покрытия может составлять от 0,01 до 10 и более мм; покрытия могут иметь заданную пористость (от 0 до 30 и более процентов);
- покрытия могут быть изготовлены из любых материалов, характеризующихся точкой плавления или интервалом размягчения;
- в качестве подложки можно использовать дерево, стекло, пластмассы, керамику, композиционные материалы, металлы;
- нанесение покрытий может производиться в широком диапазоне состава покрытия, температуры и давления – в низком вакууме в специальной камере с контролируемой инертной атмосферой, в воздухе при нормальных условиях, под водой;

➤ нанесение металлических и керамических покрытий не вызывает значительного нагрева поверхности, следовательно, обеспечивается сохранение геометрических размеров деталей.

Основные свойства и материалы покрытий определяются требованиями к ним в конкретных условиях эксплуатации.

**Износостойкие покрытия.** Изнашивание металлов – это процесс разрушения поверхностных слоев трущихся тел, который определяется разнообразием условий их нагружения. В зависимости от этих условий следует выбирать те материалы, которые имеют большее сопротивление изнашиванию.

**Жаростойкие и теплозащитные покрытия.** Жаростойкие покрытия образуют плотную оксидную пленку, которая защищает покрытие и подложку от окисления. Оксиды алюминия, хрома, кремния имеют плотное строение и высокую прочность сцепления. Жаростойкими являются сплавы в системах Ni-Al, Ni-Cr, Ni-Cr-Al, Ni-Co-Cr-Al-X, MoSi<sub>2</sub> и др.

**Теплозащитные покрытия (ТЗП)** должны иметь низкое значение коэффициента теплопроводности и высокую температуру плавления. Наиболее подходящим материалом для ТЗП является оксид циркония.

В качестве теплозащиты в зависимости от материала подложки и условий применения следует выбирать керамические материалы с заданной пористостью. Для лопаток турбины газотурбинного двигателя, например, предпочтительнее кубическая структура оксида циркония и оксида иттрия или церия.

**Коррозионно-стойкие покрытия.** Коррозионные разрушения металлов обусловлены химическими и электрохимическими процессами, происходящими на поверхности металла при взаимодействии со средой. Различают коррозию атмосферную, в морской воде, грунтовую, в агрессивных средах – кислотную, щелочную и т. д., высокотемпературную газовую (сульфидную, сульфидно-оксидную и т. д.).

Для защиты от атмосферной, морской, подземной коррозии стальных конструкций, трубопроводов, судов и т. д. широко применяют металлы-протекторы, имеющие более отрицательный потенциал, чем железо (анодные покрытия) – Zn, Al. В качестве защитных покрытий катодного типа применяют коррозионно-стойкие металлы – Pb, Cr, Cu, Ti. Главное требование к катодным покрытиям – это их сплошность, исключая попадание жидкости (электролита) между подложкой и покрытием, в этом случае будет разрушаться подложка, т. е. защищаемый металл. Такие коррозионно-стойкие покрытия могут быть изолирующими, что обеспечивается их плотностью и химическим составом.

**Покрyтия оптического назначения.** Покрyтия оптического назначения применяют для корректировки теплового баланса в космосе, где основной механизм теплопередачи – лучевой. Покрyтия с высоким интегральным коэффициентом черноты  $\text{Co}_3\text{O}_4$ ,  $\text{Co}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MoSi}_2$  имеют степень черноты  $\epsilon=0,9\dots0,98$  при температуре до  $350^\circ\text{C}$  и  $0,8\dots0,9$  при температуре  $350\dots900^\circ\text{C}$ . Покрyтия, обладающие высоким интегральным коэффициентом черноты, более интенсивно поглощают лучистую энергию, что приводит к нагреванию объекта. Покрyтия с высокой отражательной способностью (солнечные отражатели) способствуют отдаче тепла. Отражательная способность алюминиевого покрyтия –  $0,98$ . Значение оптических покрyтий для регулирования тепла весьма велико. Такие покрyтия заменяют конструкцию системы терморегулирования и являются конструкционными.

**Электропроводные и электроизоляционные покрyтия.** Электропроводные (медь), электроизоляционные (оксид алюминия, алюмомагнезиальная шпинель), нейтронно-поглощающие (гафний и оксид гафния) покрyтия выполняют роль проводников, изоляторов, защитных экранов в ядерных установках, являются также конструкционными покрyтиями.

**Уплотнительные покрyтия.** Уплотнительные покрyтия (УП) применяются взамен вставок из уплотнительных материалов в газотурбинных двигателях. Назначение – уменьшить зазор между статором и ротором газогенератора (компрессор и турбина). Особенностью этих покрyтий является их податливость (кромка лопатки или лабиринт легко врезаются в слой покрyтия, которое, однако, достаточно прочно, чтобы выдерживать напор газового потока при повышенных температурах.) В качестве твердой смазки используют графит и нитрид бора. В качестве матрицы с увеличением рабочей температуры – алюминий, никель, алюминид никеля, оксид циркония.

**Декоративные покрyтия.** Декоративные покрyтия (бронзовые покрyтия на силуминовых скульптурах) также можно считать конструкционными, так как они позволяют экономить более дорогие медные сплавы. Восстановление скульптурной группы "Квадрига" на фронте Большого театра в Москве производилось напылением медной проволокой газопламенной и электродуговой металлизацией. Толщина стенки скульптуры составляла изначально  $4$  мм, на момент восстановления –  $2$  мм. После наращивания толщина стенки была доведена до начальной.



Ниже приведены наиболее распространенные области применения технологии для защиты поверхностей деталей и узлов машин от абразивного, эрозионного, коррозионного и других видов воздействия рабочей среды.

*Автомобильная промышленность:* распределительные и коленчатые валы, валы водяных насосов, шкворни, разжимные кулаки тормозов, головки поршней, цилиндры, поршневые кольца, диски сцепления, выхлопные клапаны и т. п.

*Авиационная промышленность:* сопла ракетных двигателей, элементы реактивных двигателей, лопатки турбин, различные переходники, наконечники, листы для облицовки фюзеляжа и т. п.

*Электротехническая промышленность:* конденсаторы, отражательные поверхности антенн систем связи и т. п.

*Цементная промышленность:* лопасти вентиляторов, детали конвейеров, клапаны и седла клапанов, подшипники и т. п.

*Химическая промышленность:* клапаны и седла клапанов, валы и крыльчатки (рабочие колеса) насосов, корпуса насосов химических циркуляционных систем, плунжеры, цилиндры и кольца кислотоупорных насосов и т. п.

*Угольная и металлургическая промышленность:* лопасти дымососов, детали ковшей и черпаков, грохоты классификаторов, детали воздуходувок, матрицы, пуансоны и другие элементы штампов, пресс-форм и т. п.

*Энергетическая промышленность:* шнеки питателей для подачи угля, детали вентиляторов и дымососов для отвода отходящих газов, паровые клапаны, детали конвейеров и т. п.

*Изделия общего назначения:* калибры (пробки, скобы), резьбовые калибры, оправки, детали шлифовальных станков, центры токарных станков, шпиндели и валы, шнеки экструзионных машин и т. п.

*Прочие изделия:* подшипники различных конструкций, коленчатые валы, ролики и валки, зубья шестерен и т. д.

## **5.6 Вопросы для самостоятельного контроля**

1. В чем состоит физическая сущность газотермических технологий послыйного выращивания?
2. Приведите классификацию методов газотермических технологий выращивания.
3. Сравните технологические возможности газоплазменного и детонационного методов.
4. Каковы достоинства и недостатки плазменных технологий?
5. Области применения газотермических покрытий.

## РАЗДЕЛ 6

### ИНТЕГРИРОВАННЫЕ ГЕНЕРАТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ МИКРОУРОВНЯ

#### 6.1 Основные понятия

В настоящее время научные достижения позволяют на принципиально новых основах конструировать поверхность и приповерхностный слой. Сюда относятся и возможности синтезировать тонкие слои, названные покрытиями, получаемыми послойным выращиванием. Речь идет о генеративных технологиях, относящихся к микроуровню, определяемому микрометрическими толщинами слоев.

По критерию сущности процессов формирования все методы получения покрытий макроуровня на рабочих поверхностях можно разделить на три основные группы.

К первой группе относят *химико-термические методы (ХТМ)* образования покрытий, основанные на твердофазовом, жидкостном или газофазовом насыщении поверхностей изделия (TCVD – Thermo-chemical vapor deposition).

Во вторую группу входят *методы комплексного формирования покрытий*, когда они образуются в результате химических реакций между парогазовыми смесями и термодиффузионными реакциями между конденсатом и материалом изделия (CVD – Chemical vapor deposition).

К третьей группе могут быть отнесены *вакуумо-плазменные методы физического осаждения покрытий*, которые получили название в мировой практике PVD (PVD – Physical vapor deposition). При этом процессы PVD обычно включают вакуумное распыление или испарение (генерацию) тугоплавкого металла, его частичную или полную ионизацию, подачу реакционного газа, химические и плазмохимические реакции, конденсацию слоев покрытия на рабочих поверхностях изделий.

*Вакуумо-плазменные методы универсальны по возможности синтеза широкой гаммы монослоевых, многослойных и композиционных покрытий на базе нитридных, карбидных, карбонитридных, оксидных, боридных и других соединений тугоплавких металлов IV-VI групп Периодической системы элементов. С помощью этих методов можно осаждать качественные покрытия при низких температурах подложки.*

Все эти методы реализуют принцип изготовления «снизу-вверх», от «малого к большому».

Ионно-плазменные технологии синтеза покрытий получили широкое распространение в мировой практике производства благодаря своей универсальности, возможности синтеза покрытий разнообразного состава и конструкции в широком температурном диапазоне (100-1000°С). При низкой дефектности слоев возможна реализация «теоретической» прочности материала и получение покрытий, которые обеспечивают максимальное повышение эффективности и надежности изделий.

*Ионно-плазменные процессы позволяют управлять энергией ионов, осуществлять десорбцию, миграцию поверхностных атомов и химические реакции, распыленность и имплантацию, соответственно делать очистку, синтезировать покрытие или модифицировать свойства поверхностного слоя изделия (табл. 6.1).*

*Вакуумно-плазменная технология является малоэнергоёмкой и экологически чистой. Установки и технология отличаются высокой степенью универсальности.*

Преимущества методов, которые относятся к третьей группе, а также их высокая степень управляемости делают вакуумно-плазменные технологии нанесения износостойких покрытий наиболее перспективными.

Таблица 6.1 – Влияние энергии ионов на формирование поверхности изделия

Еі. Эв.	<5	5...12  30	12  30  .10 <sup>3</sup>	10 <sup>2</sup> ...10 <sup>4</sup>
Явления	Десорбция	Миграция поверхн. атом. хим. реакции	Распыление	Имплантация 50А/Кэв
Последствия	Очищение		Способ покрытия распыленными атомами	Модификация свойств поверхности

В настоящее время в зависимости от конкретно решаемых технологических задач применяются различные вакуумные методы нанесения покрытий, генерируя частички наносимых веществ термическим испарением, ионным распылением, активированным реакционным испарением, ионным осаждением, электронно-лучевым плазменным напылением, конденсацией с ионной бомбардировкой, а также осаждением покрытий из газовой фазы в вакууме.

В табл. 6.2 приведены характерные (ориентировочные) параметры различных процессов нанесения покрытий. Для сравнения приведены параметры термовакуумного процесса нанесения покрытий.

В тех случаях, когда с поверхностью твердого тела взаимодействуют ускоренные ионы, обладающие энергией выше тепловой, будут иметь место различные процессы, которые в значительной мере определяются именно кинетической энергией ускоренных ионов.

*При энергии менее 5эВ ион либо отражается от облучаемой поверхности, либо переходит в термодинамическое равновесие с ней, а затем десорбируется. Важную роль играет потенциальная энергия поверхностных атомов твердого тела (энергия возбуждения атома или иона), так как ее значением определяются электронные переходы, вызывающие эмиссию вторичных электронов или разрыв (восстановление) химических связей, имеющих на поверхности сорбированных примесей.*

*В том случае, когда энергия ионов превышает энергию связи атомов, атомы решетки под действием налетающих ионов перемещаются в новые положения, что приводит к поверхностной миграции атомов (перемешиванию) и поверхностным повреждениям решетки твердого тела.*

*При энергиях ионов 12-40 эВ (в зависимости от природы облучаемого материала) преобладающим процессом становится выбивание поверхностных атомов мишени, т.е. распыление материала.*

*При энергиях ионов выше 100эВ они начинают внедряться в верхний слой кристаллической решетки мишени, причем структура и ориентация кристаллитов мишени являются важными факторами, определяющими глубину проникновения ионов.*

По мере увеличения энергии ионов глубина внедрения увеличивается, а поверхностные повреждения кристаллической решетки уступают место объемным. Вследствие этого *начинается ионная имплантация, и она становится доминирующим процессом.*

*Системы ионного нанесения покрытий (рис. 6.1), в которых генерация наносимого материала в газообразном состоянии осуществляется в результате термического перевода твердого вещества в парообразное, получили название ионно-термических (среди них распространение нашли электронно-лучевые системы и системы нанесения покрытий из плазмы с горячим катодом).*

Таблица 6.2 – Характерные параметры различных процессов нанесения покрытий

Характерные параметры процесса	Методы нанесения покрытий							При помощи плазменных ускорителей
	Термическое нанесение	При помощи ионного (катодного) распыления	Ионно-термическое нанесение	Из плазмы разряда с горячим катодом	Из плазмы с холодным катодом	Ионное легирование (имплантация)		
						ионное насыщение	ионное внедрение	
Скорость нанесения покрытий, мкм/мин	0,5-2,0	0,03-2,5	0,5-1,0	0,5-1,0	0,1-0,5	0,1-0,2	0,5-1,0	0,2-2,0
Толщина покрытий или глубина легированного слоя, мкм	2-50	1-10	2-20	2-20	2-20	10-20	0,3-2	2-20
Минимальная температура подложки, °С	250-500	250-400	250-500	250-500	150-400		50-600	250-400
Площадь обрабатываемой поверхности, см <sup>2</sup>	500-1000	50-400 (до10 <sup>5</sup> )	50-400	50-400	50-400		10-400	50-400
Мощность установки, кВт	5-75	5-75	5-75	5-70	5-50		5-100	5-40
Напряжение, кВ	0,1	1-5	1	1	1	0,4-2	50-100	1
Процент ионизации	0,1	25	1-20	2-30	80		100	20-95
Энергия прибывающих на подложку частиц, эВ	0,3	10-50	20	20	20-50		5·10 <sup>4</sup>	5·10 <sup>5</sup>

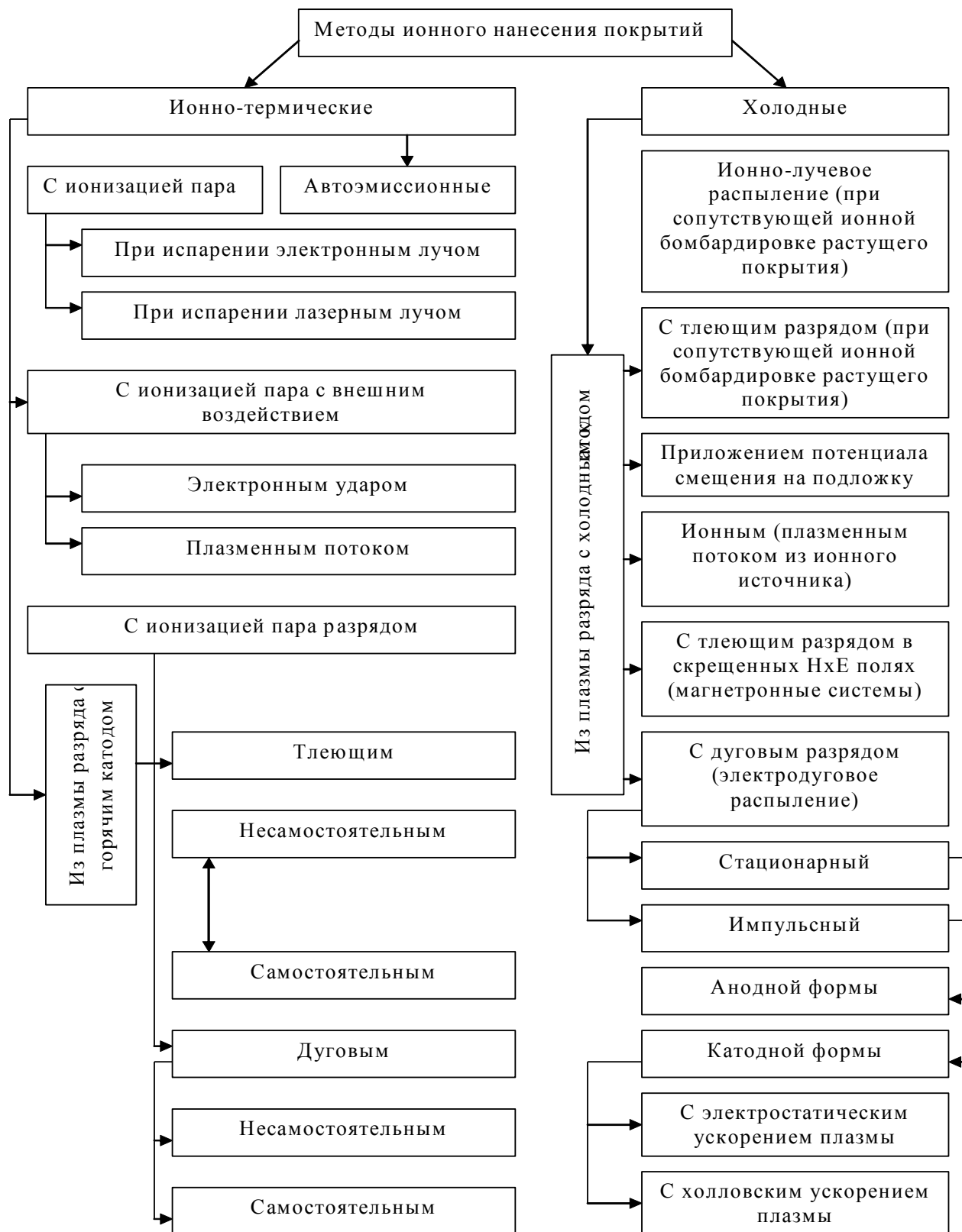


Рисунок 6.1 – Системы ионного нанесения покрытий

Другие системы, в которых генерация потока частиц наносимого вещества производится ионным нанесением (распылением), получили название холодных систем (или систем нанесения покрытий из плазмы с холодным катодом). Такое деление генерируемых систем в достаточной мере условно, так как существуют системы, где генерация наносимого вещества осуществляется одновременно по двум рассмотренным механизмам (например, магнетронное распыление из жидкой фазы).

## 6.2 Механизмы образования пленочных покрытий методом испарения или распыления и конденсацией в вакууме

Процесс образования (выращивания) покрытия конденсацией в вакууме можно условно разделить на ряд последовательно протекающих стадий:

1 – образование зародышей; 2 – рост и объединение зародышей в островки; 3 – слияние островков при их соприкосновении и образование «сетчатых» пленок-покрытий; 4 – образование сплошного покрытия и зарастание каналов; 5 – дальнейший рост покрытия (рис. 6.2). Эта схема убедительно иллюстрирует реализацию принципа «снизу-вверх».

Образование покрытия начинается с возникновения зародышей, состоящих из нескольких атомов. Обычно предполагают, что образующиеся зародыши имеют некоторую равновесную форму, например, куполообразную, характеризующуюся равновесным контактным углом  $\theta$ .

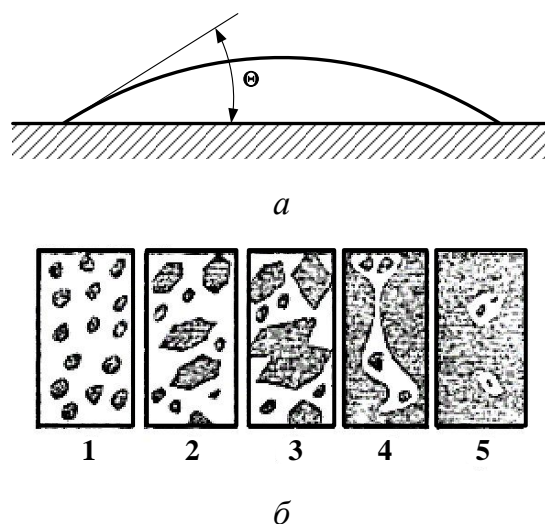


Рисунок 6.2 – Схема куполообразного зародыша (а) и последовательность стадий роста (1-5) пленки (б)

На образование зародышей при конденсации на поверхности основы большое влияние оказывает тип взаимодействия между материалом и зародышем, который проявляется через равновесный контактный угол  $\theta$ . При химическом взаимодействии происходит смачивание, и зародыш хорошо растекается по поверхности. В этом случае угол  $\theta \rightarrow 0$  и образование зародыша будет облегчено. Если смачивания не происходит, угол  $\theta \rightarrow 180$ , образование зародыша будет затруднено. Чистота поверхности сильно влияет на контактный угол  $\theta$ , воздействуя на условия конденсации и образование зародышей. Например, окисленная поверхность препятствует смачиванию и задерживает образование зародышей при нанесении металлических покрытий. В общем случае рост критического зародыша может происходить: 1) путем прямого захвата атомов из пара и 2) путем присоединения диффундирующих по поверхности абсорбированных атомов. Последний процесс преобладает при повышении температуры.

Процесс образования покрытия на стадии 1 происходит до тех пор, пока среднее расстояние между зародышами не станет равным среднему диффузионному пробегу адсорбированного атома. С этого момента наступает стадия 2, на которой зародыши развиваются, захватывая диффундирующие атомы, и таким образом препятствуют возникновению новых зародышей. Следовательно, к концу первой стадии достигается максимальная для данных условий осадения концентрация зародышей. Стадия 1 протекает очень быстро и поэтому сами зародыши не успевают вырасти.

Присоединяя диффундирующие по поверхности подложки абсорбированные атомы, *размер зародыша растет выше критического и такой зародыш, разросшийся до величины, когда его можно уверенно наблюдать с помощью электронного микроскопа или ионного проектора, принято называть островком.*

Стадия 2 характеризуется не только ростом зародышей, но и уменьшением их концентрации, поскольку они сливаются друг с другом. *Если слияние сопровождается изменением первоначальной формы и ориентации островков, то такое слияние называется коалесценцией.* Коалесценция на стадии 2 называется первичной. Отдельные зародыши могут перемещаться и сливаться при столкновении. Однако миграция зародышей наблюдается главным образом при их слабой связи с основой и при достаточно высоких



температурах. Она может быть также стимулирована внешним воздействием на зародыши, например, электрическим полем.

*Слияние островков без значительного изменения их формы и ориентации, которое сводится к процессам только по границе соприкосновения островков, называется коагуляцией.* Она наблюдается при низкой температуре или когда деформация самих островков затруднена, например, из-за присутствия в них оксидов.

На стадии 3 соседние островки сливаются и образуются более крупные островки. Если в результате слияния островков обнажается достаточно большая поверхность основы, то на ней может происходить вторичное зародышеобразование. *При большом заполнении поверхности островками начинается их массовое слияние и образование единой структуры в виде сетки.* Такое слияние называют вторичной коалесценцией и оно характеризуется значительным массопереносом островков — зерен по поверхности. По мере завершения образования сплошной сетчатой структуры вторичная коалесценция замедляется. *Полученная сетчатая пленка содержит большое количество пор и продолговатых пустот, которые называются каналами.* Такие каналы часто имеют извилистую форму и иногда кристаллографическую огранку.

*Стадия 4 характеризуется медленным заполнением каналов – пустот.* В них возникают новые зародыши, которые очень медленно разрастаются и сливаются. Длина каналов по мере их зарастания уменьшается, а ширина изменяется мало. Заращение приводит к сглаживанию рельефа покрытия, его поверхность становится гладкой, ровной, копирующей макрорельеф напыляемой поверхности.

*На последней стадии 5 толщина покрытия растет. Рост покрытия может сопровождаться структурными изменениями, такими как рекристаллизация, рост зерен, снижение количества дефектов в кристаллической решетке покрытия, фазовые переходы и т. п.*

Важным параметром процесса наращивания, позволяющим в широких пределах регулировать структуру и свойства покрытий, является температура поверхности основы, на которую наносят покрытие. Эта температура имеет несколько характерных значений:

1)  $T_{кр}$  – критическая температура основы, выше которой конденсация не происходит, поскольку все падающие атомы отражаются от напыляемой

поверхности; 2)  $\theta_1$  – температура, выше которой конденсация пара происходит по механизму пар - жидкость - кристалл; 3)  $\theta_2 \approx T_{пл} / 3$  – температура, ниже которой покрытие имеет аморфное строение.

Экспериментально установлено, что в зависимости от температуры основы конденсация может происходить по двум механизмам: пар - кристалл и через жидкую фазу пар - жидкость - кристалл. В первом случае только что возникшие островки имеют ограниченную форму и кристаллическое строение, во втором – их форма близка к сферической форме жидкой капли, растекающейся по поверхности. Переход от одного механизма к другому осуществляется при температуре  $\theta_1$ , которая при конденсации на нейтральной неориентированной поверхности, например, поверхности стекла, равна примерно  $\frac{2}{3}T_{пл}$  от температуры плавления осаждаемого материала  $T_{пл}$ .

При более низкой температуре конфигурация островков и промежутков между ними определяется возможностью их формоизменения. При температуре  $\theta_2 \approx T_{пл} / 3$  и ниже диффузионная подвижность атомов в зародыше и островке, а также и возможность формирования самих островков подавлены. В результате образуется структура со случайным расположением атомов в решетке. Такая структура образует покрытие, по своему строению близкое к аморфному. В интервале температур  $\theta_2 < T_0 < \theta_1$  конденсация осуществляется по механизму пар - кристалл. Островки растут в виде плоских образований и, если степень заполнения поверхности основы невелика, могут иметь кристаллическую огранку. В этой области полученный конденсат, как правило, текстурирован. *Этот процесс основан на способности атомов металлов и других неорганических материалов, нагретых до температуры испарения в вакууме, перемещаться прямолинейно в виде атомарных или молекулярных пучков и, конденсируясь на поверхности твердого материала, выращивать пленки.* Особенно интенсивно процесс выращивания покрытий конденсацией в вакууме начал развиваться с 60-х годов, когда для нагрева и испарения были применены такие мощные интенсивные и концентрированные источники энергии, как электронный луч, различные виды электрических разрядов, магнетроны и т. п. Появилась возможность создавать с высокой производительностью не только тонкопленочные покрытия, но и покрытия толщиной в несколько десятков и сотен микрометров.

### 6.3 Вакуумные методы выращивания покрытий

В методах и технологических особенностях вакуумного конденсационного выращивания (ВКВ) покрытий встречается много общего. В связи с этим представляется целесообразным рассмотреть обобщенную схему процесса (рис. 6.3).

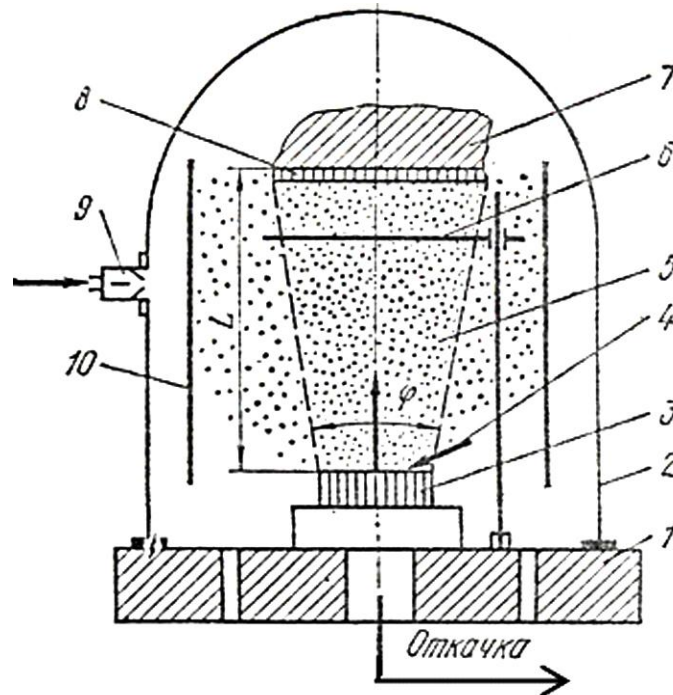


Рисунок 6.3 – Обобщенная схема процесса вакуумного конденсационного выращивания (ВКВ) покрытий:

- 1 - базовая плита; 2 - камера; 3 - наносимый материал; 4 - подведение энергии для распыления материала; 5 - поток напыляемых частиц; 6 - заслонка;  
7 – подложка-изделие; 8 - покрытие; 9 - натекаТЕЛЬ рабочего газа; 10 – экран

*Известно, что покрытия при вакуумном конденсационном выращивании получают из потока частиц, находящихся в атомарном, молекулярном или ионизированном состоянии. Поток частиц получают посредством воздействия на материал различными энергетическими источниками. Различают генерацию наносимого материала методом термического испарения, взрывного испарения – распыления и ионным распылением твердого материала. Процесс ВКВ проводят в жестких герметичных камерах при давлении  $13,3-133 \cdot 10^{-3}$  Па. Благодаря этому обеспечивается необходимая длина свободного пробега наносимых частиц и защита процесса от взаимодействия с атмосферными газами. В общем*

случае движущей силой переноса частиц в направлении к поверхности нанесения является разность в парциальных давлениях паровой фазы. Наиболее высокие давления пара, достигающие 133 Па и более, наблюдаются вблизи поверхности распыления (испарения). Это и обуславливает перемещение частиц в направлении наращиваемого изделия, где давление паров минимально. Другие силы переноса могут быть введены для частиц, находящихся в потоке в ионизированном состоянии. В этом отношении выращивание покрытий из ионизированных паровых потоков предпочтительно. Кроме того, ионизированные частицы обладают большей энергией. Это облегчает формирование покрытий высокого качества.

*Процесс вакуумного конденсационного выращивания покрытий целесообразно рассматривать состоящим из трех стадий: 1) переход конденсированной фазы (твердой или жидкой) в газообразную (пар); 2) формирование потока и перенос частиц на поверхность напыления; 3) конденсация паров на этой поверхности – выращивание покрытия.*

Для получения качественных покрытий необходимо гибкое управление этими процессами посредством создания оптимальных режимов их протекания.

Две первые стадии в значительной мере определяют третью стадию. Это, в частности, следует из формул, определяющих скорость осаждения покрытия ( $V_n$ ).

Для точечного источника испарения  $S_{рас} \ll L$ :

$$V_{II} = \frac{v_p S \cos \alpha}{4\pi L^2}$$

Для плоского источника:

$$V_{II} = \frac{v_p S \cos \alpha \cos \theta}{\pi L^2},$$

где  $v_p$  – скорость генерации (испарения);  $S$  – площадь генерации;  $L$  – дистанция напыления;  $\alpha$  – угол между направлением потока частиц и нормалью к поверхности подложки;  $\theta$  – угол между направлением потока частиц и нормалью к поверхности распыления (испарения).

Из приведенных зависимостей следует, что общими параметрами процесса вакуумного конденсационного выращивания являются скорость и площадь распыления, а также направление потока частиц относительно поверхности покрытия и дистанция.

*Первая стадия процесса должна обеспечивать наряду с регулируемой скоростью и площадью распыления отсутствие в потоке конденсированной фазы в виде жидких или твердых частиц. Во второй стадии необходимо стремиться к формированию потока с максимальной степенью ионизации паровой фазы.* Благодаря этому создаются условия для повышения энергии генерируемых частиц и управление их потоками (фокусировка, отклонение) и др.

На практике для получения равномерных слоев увеличивают дистанцию напыления, используют несколько распылителей, изменяют конфигурацию площади распыления; применяют различные траектории перемещения напыляемых изделий и др. Дистанция напыления оказывает влияние и на другие показатели эффективности. Увеличение дистанции свыше оптимальных значений изменяет условия зарождения и роста покрытий, приводящие к снижению адгезионной прочности.

Для различных способов вакуумного конденсационного выращивания дистанцию выбирают в широких пределах – от 20 до 500мм.

*Давление в камере.* В первую очередь влияет на длину свободного пробега генерируемых частиц. Максимальная степень разрежения (глубокий вакуум) облегчает процесс их переноса. Так, например, при  $P_k = 10^{-4} \text{ Па}$  длина свободного пробега частиц составляет 1000мм, а при  $P_k = 0,1 \text{ Па}$  она равна 10 мм. Давление насыщенных паров мало зависит от величины  $P_k$ . Однако диффузия частиц из пограничного слоя распылителя и скорость распыления (испарения) существенно снижаются при повышении  $P_k$ . Наряду с этим в камере снижается количество остаточных газов, активных по отношению к распыленному материалу. Давление в камере оказывает влияние и на равномерность выращенных покрытий. На практике иногда прибегают к увеличению давления в камере с целью получения покрытий с большой равномерностью по толщине. К повышению давления в камере прибегают при методах, использующих электрические разряды. Высокий уровень разрежения не способствует стабильному горению дугового или тлеющего разряда. При вакуумных реакционных способах выращивания давление в камере является, как это будет показано дальше, определяющим при синтезировании соединений различного типа.

*Температура подложки* оказывается одним из наиболее значимых параметров процесса выращивания. С температурой поверхности изделия

в первую очередь связана адгезионная прочность, структура покрытия, уровень остаточных напряжений и, соответственно, его свойства.

Различные исследователи предлагают зонные модели зависимости структуры толстых покрытий (свыше 1 мкм) от температуры подложки. Наиболее простой является трехзонная модель вакуумных конденсационных покрытий (рис. 6.4, а). В первой низкотемпературной зоне покрытия формируются при температурах подложки от обычных для окружающей атмосферы до граничной температуры  $T_1$ . Ее значение оценивается примерно равным  $0,3$  от температуры плавления наносимого материала  $(0,3T_{пл})$ . При низких температурах в слое формируется специфическое куполообразное строение кристаллитов.

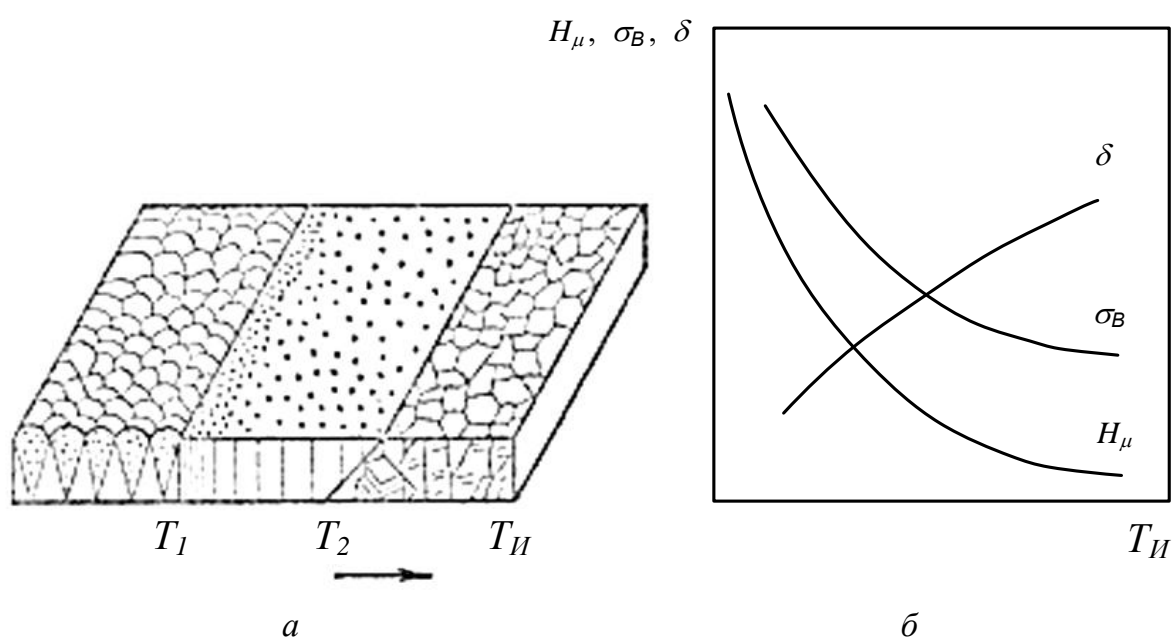


Рисунок 6.4 – Схема распределения структурных зон в выращенном покрытии (а) и качественная зависимость микротвердости  $H_{\mu}$ , временного сопротивления  $\sigma_B$  и относительного удлинения покрытий  $\delta$  от температуры подложки изделия  $T_{II}$

Во второй зоне (среднетемпературной) в интервале температур  $T_1 - T_2$  в покрытии формируется ярко выраженное столбчатое строение. Причем с увеличением температуры ширина столбчатых кристаллитов возрастает. Температура  $T_2$  оценивается примерно  $(0,45-0,5)$  от температуры плавления материала покрытия  $(0,45-0,5T_{пл})$ .

В третьей – высокотемпературной зоне при температуре поверхности подложки выше  $T_2$  в покрытии формируется преимущественно равноосная структура.

В табл. 6.3 приведены значения граничных температур  $T_1$  и  $T_2$  для толстых покрытий, выращенных из различных материалов. Метод выращивания и состав парового потока (степень ионизации) мало влияют на изменение пределов температурных зон. При температуре поверхности подложки выше  $T_2$  в покрытии происходят процессы объемной рекристаллизации, приводящие к росту зерна. Изменяя температуру поверхности подложки и, собственно, структуру покрытий, можно в широких пределах регулировать их механические свойства. Для конденсационных покрытий наблюдается четкая зависимость механических свойств от структуры. На рис. 6.4, б приведены качественные зависимости микротвердости  $H_{\mu}$ , временного сопротивления  $\sigma_B$  и относительного удлинения  $\delta$  от температуры подложки. Причем эти закономерности свойственны многим выращенным покрытиям: из чистых металлов, сплавов, соединений, композиционных составов.

Таблица 6.3 – Граничные температуры  $T_1$  и  $T_2$  и их отношения  $T_2/T_{nl}$  трехзонной структурной модели формирования покрытий

Материал	$T_{nl}, K$	$T_1, K$	$T_1/T_{nl}$	$T_2, K$	$T_2/T_{nl}$
Титан	1945	643±10	0,33	948±30	0,49
Никель	1726	543±10	0,31	723±10	0,42 0,45
Медь	1356	433±10	0,32	673±20	0,50
Железо	1809	563±20	0,31	863±20	0,48
Бериллий	1573	473±20	0,29	1023±50	0,63
Ni+20%Cr	1673	500±50	0,30	870	0,52
Молибден	2883	923±20	0,32	1200	0,42
Вольфрам	3683	1133±50	0,30	1723±50	0,47
Оксид хрома	2973	648±10	0,22	1273±100	0,43
Оксид алюминия	2323	623±10	0,26	1173±100	0,50
Карбид титана	3340	1070±30	0,31	-	-
Карбид циркония	3690	1323±50	0,36	1623±50	0,44

*Температура поверхности подложки оказывает большое влияние на адгезионную прочность покрытий. С увеличением температуры адгезионная прочность возрастает. Это особенно характерно при формировании покрытий из потока частиц с низким энергетическим уровнем, например, с малой степенью ионизации. Температуру нагрева изделия-подложки выбирают, исходя из многих предпосылок. При этом учитывают свойства материала и конструктивные особенности напыляемого изделия, требования, предъявляемые к структуре покрытия, уровень остаточных напряжений, способ напыления и т. д. В зависимости от условий подогрев подложки - изделий осуществляется от температуры 300°С и выше.*

Формирование покрытий при высоких температурах, близких к температуре плавления наносимого материала, связано с процессами реиспарения. Это уменьшает производительность выращивания.

*Параметры потока наносимых частиц* оказывают решающее влияние на показатели эффективности процесса вакуумного конденсационного выращивания.

К параметрам потока относят: плотность потока наносимых частиц ( $N$ , *частиц/(см<sup>2</sup> · с)*); их энергию ( $W$ , *эВ/атом*); степень ионизации частиц ( $n_1$ , %); скорость частиц в направлении поверхности наращивания  $v_ч$ , *м/с*; угол расхождения потока наносимых частиц ( $\varphi$ , °).

Ориентировочная плотность и энергия частиц для различных способов вакуумного конденсационного наращивания приведены на рис. 6.5. Область I охватывает, в основном, способы распыления термическим испарением, характеризуется высокими плотностями потока напыляемых частиц  $10^{16} - 10^{24}$  *1/см<sup>2</sup>* с малыми значениями энергий ( $W \leq 0,5$  эВ). Область II характерна для ионного распыления материала с последующим ускорением заряженных частиц. Область III включает высокоскоростные способы распыления с последующей ионизацией частиц и их ускорением.

Верхняя граница (сплошная линия) соответствует максимально допустимому потоку энергии на поверхность выращивания. Степень ионизации потока частиц зависит от способа напыления. Термическое испарение дает малую степень ионизации. Степень ионизации любых



потоков может быть увеличена применением дополнительных источников энергии.

Скорость частиц в направлении поверхности изделия зависит от способа выращивания, применения ускоряющих устройств до 2000 м/с и более. Угол расхождения частиц при распылении колеблется в широких пределах и определяется способами распыления, поверхностью распыления и др. Для точечного источника распыления угол расхождения подчиняется закону косинуса.

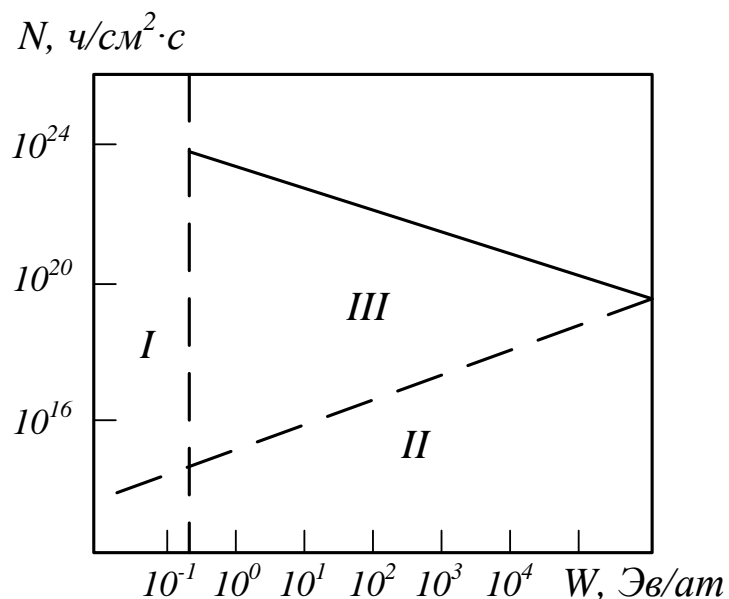


Рисунок 6.5 – Диаграмма распределения плотности потока частиц  $N$  и энергии  $W$  для различных способов ВКН

#### 6.4 Ионное (катодное) распыление

Метод заключается в распылении бомбардировкой ионами газоразрядной плазмы мишени из материала, который наносится, и следующего осаждения распыленных частиц на поверхности подложки изделий. Ионные распылительные системы классифицируют по количеству электродов (диодные, триодные, тетродные), виду используемого напряжения (постоянное, переменное, высокочастотное), средствам возбуждения плазмы (с самовозбуждением, с дополнительным разрядом, с автономными ионными источниками), наличию или отсутствию потенциала на подложке (со сдвигом и без).

В наиболее простом случае система распыления состоит из двух электродов, размещенных в вакуумной камере (рис. 6.6). Материал,

который наносится 3, располагают на катоде. На другом электроде (или отдельно) устанавливают подложку, например, инструменты. Вакуумную систему откачивают до вакуума (0,005 Па.) и наполняют рабочим газом, которым чаще всего является аргон, под давлением порядка 0,5 Па. На электрод с инструментами подают отрицательный потенциал и бомбардировкой ионами аргона выполняют их очистку. При этом происходит распыление органических и неорганических загрязнений поверхности. После очистки подложки отрицательный потенциал прикладывают к мишени и распыляют ее. Частицы, которые распыляются, эжектируются через плазму разряда, осаждаются на подложке и образуют покрытие.

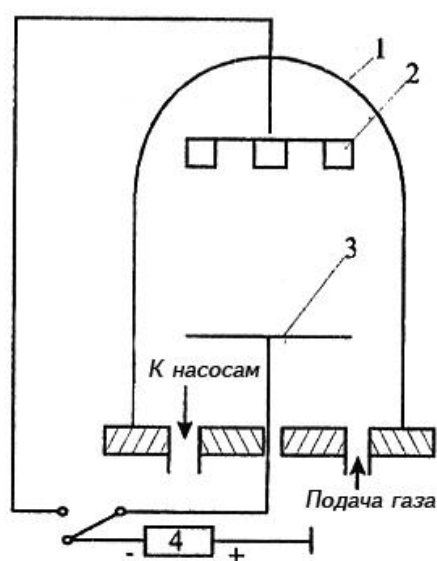


Рисунок 6.6 – Система ионного (катодного) распыления:

- 1 - вакуумная камера; 2 - обрабатываемые детали; 3 - напыляемый материал;
- 4 - источник питания для подачи отрицательного потенциала на подложку

При необходимости как рабочий используют реактивный газ, например, кислород или азот. В случае для металлов на подложке образуются покрытия из оксидов, нитридов и тому подобное. Покрытие карбидами и нитридами титана, в частности, на твердом сплаве, можно также получить прямым распылением этих соединений в среде инертного газа.

К недостаткам катодного метода относят низкий КПД – большая часть энергии рассеивается на мишени, а также недостаточную степень ионизации наносимых частиц – примерно 1%.

Магнетронные распылительные системы (МРС) являются усовершенствованным вариантом диодных систем распыления. Причиной появления таких систем явилось стремление повысить скорость осаждения при одновременном снижении радиационного воздействия электронов на подложку. В системах на постоянном токе используют режим аномально тлеющего разряда. Высокие скорости распыления, характерные для МРС, обеспечиваются за счет локализации плазмы у поверхности распыляемой мишени путем наложения скрещенных электрического и магнитного полей.

Схема магнетронного распыления (генерации) показана на рис. 6.7. Основными элементами системы являются катод-мишень 2, кольцевой анод 1 и магнитная система 3. Подложку располагают над анодом (на схеме не показано). При подаче постоянного напряжения между мишенью (отрицательный потенциал) и анодом (положительный или нулевой потенциал) возникает неоднородное электрическое поле, силовые линии которого скрещиваются с силовыми линиями магнитного поля, замыкаяющими магнитную систему. В условиях тлеющего разряда эмитированные с катода под действием ионной бомбардировки вторичные электроны совершают в магнитном поле сложное движение у поверхности катода по траекториям, близким к циклоидальным.

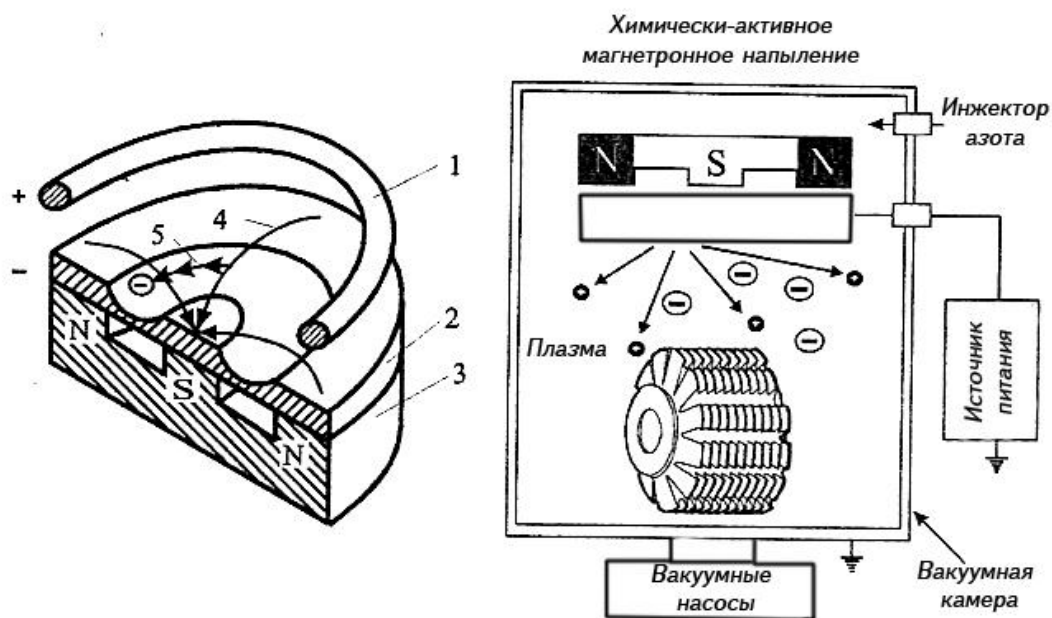


Рисунок 6.7 – Схема магнетронного распыления:

- 1 - кольцевой анод; 2 - катод-мишень (распыляемый материал); 3 - магнитная система;
- 4 - силовые линии магнитного поля; 5 - траектория движения электронов

Поверхность мишени, расположенная между местами входа и выхода силовых линий и интенсивно распыляемая, имеет вид замкнутой кольцевой дорожки. При этом электроны оказываются в своеобразной ловушке, создаваемой, с одной стороны, магнитным полем, возвращающим электроны на катод, а с другой – поверхностью мишени, отталкивающей электроны. Электроны перемещаются в ловушке до тех пор, пока произойдет несколько ионизирующих столкновений с атомами рабочего газа и электроны не потеряют полученную от электрического поля энергию.

В дальнейшем они диффундируют через плазму к аноду. Таким образом, большая часть энергии электрона расходуется на ионизацию в непосредственной близости от катода, где создается высокая концентрация положительных ионов. В результате возрастают интенсивность бомбардировки катода, скорость его распыления и соответственно скорость осаждения (наращивания) материала на подложку до 1 мкм/мин.

Наличие магнитной ловушки приводит к тому, что в МРС отсутствует бомбардировка подложки вторичными электронами высоких энергий, а основным источником нагрева подложек является энергия, выделяемая при торможении и конденсации осаждаемых атомов вещества, в результате чего температура подложки не превышает 100-200°C. Для термоактивации подложки в некоторых установках предусмотрены отдельные нагреватели. Для получения покрытий в виде соединений в зону распыления вводится реакционный газ (азот).

К недостаткам процесса можно отнести незначительную термоактивацию подложки, снижающую качество формируемой структуры и адгезию покрытия.

## **6.5 Ионно-термическое выращивание покрытий**

Стремление увеличить скорость нанесения покрытий до характерной для термического напыления, с одной стороны, и обеспечить высокую адгезию покрытий, характерную для осажденных с помощью ионного распыления, с другой, привело к созданию различных ионно-термических систем. На рис. 6.8 показана одна из схем такого выращивания. При испарении различными методами материал ионизируется в плазме разряда, осуществленного в среде инертного газа, и ускоряется по направлению к подложкам-деталям, к которым прикладывается отрицательный потенциал.

Испарение можно производить с помощью нагревателя сопротивления или индукционного нагрева. Однако существуют трудности испарения тугоплавких материалов, а также изменение стехиометрии состава при наращивании сплавов и химических соединений и загрязнение покрытия материалом испарителя. Поэтому используют различные лучевые методы нагрева, главным образом, электронно-лучевые и лазерные.

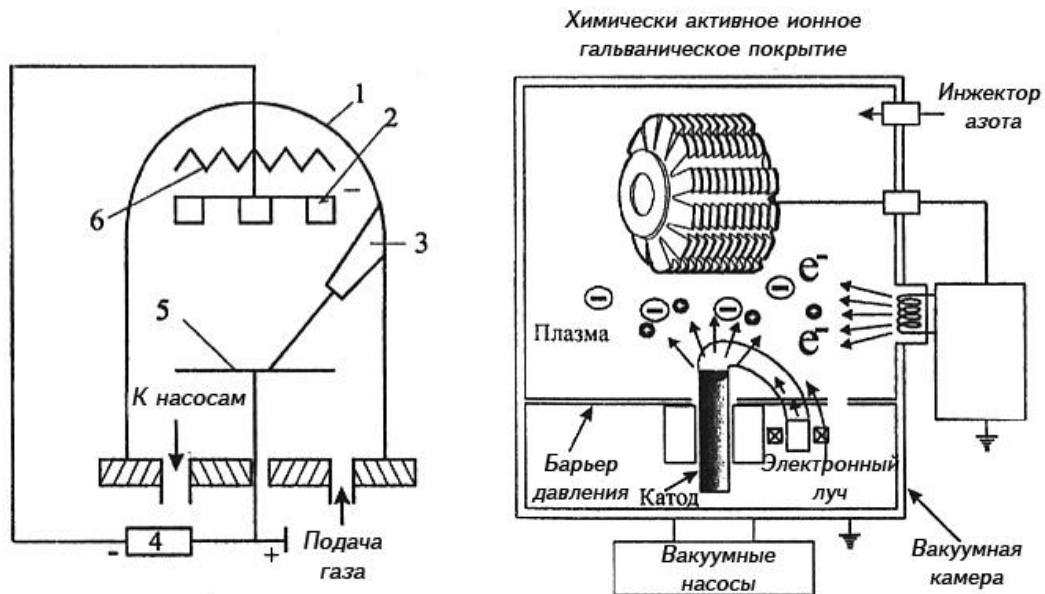


Рисунок 6.8 – Схема ионно-термического нанесения покрытий:

- 1 - вакуумная камера; 2 – обрабатываемые детали;
- 3 - электронный источник или квантовый генератор (располагаемый вне камеры);
- 4 - источник питания для подачи отрицательного потенциала на подложку;
- 5 - напыляемый материал; 6 - источник подогрева подложки

*Применение ионно-термического метода значительно расширяет технологические возможности систем вакуумного нанесения покрытий в направлении управления параметрами наносимого на подложку материала, хотя и сокращает их круг из-за термической диссоциации, характерной для ряда химических соединений.* В большинстве случаев адгезионное взаимодействие предпочитают активировать не предварительной очисткой деталей бомбардировкой ионами, а путем их нагрева, что ограничивает применение материалов подложек, не допускающих их значительного нагрева.

Применение этого метода позволяет получать эффективные износостойкие покрытия на твердосплавных неперетачиваемых пластинах для режущего инструмента, но значительно менее эффективно для

быстрорежущих инструментов, у которых допустимая температура нагрева при очистке не должна превышать температуры отпуска 540-560°C.

Различные модификации ионно-термического метода отличаются главным образом тем, что осаждение покрытий производят из плазмы разряда, осуществляемого преимущественно в парах наносимого металла.

### 6.6 Выращивание покрытий из плазмы электродугового разряда с горячим катодом

Система выращивания из плазмы разряда с горячим катодом показана на рис. 6.9. Кольцевой катод 6 при нагреве эмитирует на распыляемый металл 5, к которому приложен положительный потенциал, мощный несфокусированный электронный поток и расплавляет металл. Далее осуществляется разряд в парах наносимого материала. Для повышения адгезии покрытия к деталям может прикладываться отрицательный потенциал, ускоряющий ионизированную часть парового потока по направлению к деталям. При подаче в камеру реакционного газа, в качестве которого чаще всего используют азот или кислород, образуются на деталях нитриды, окислы и другие соединения. Недостатком системы остается сравнительно небольшой процент ионизированных частиц в общем потоке материала, поступающего к детали, что сказывается на адгезионных характеристиках покрытия и условиях протекания реакции синтеза соединений.

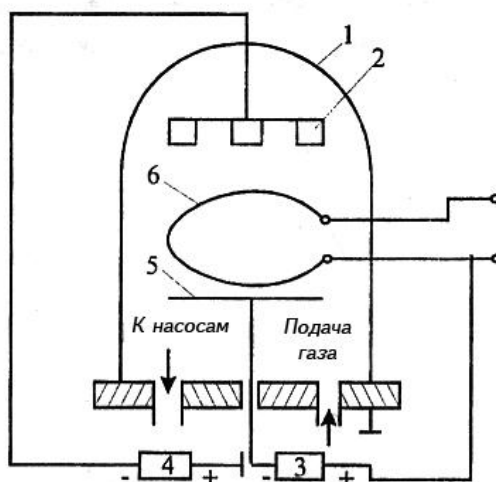


Рисунок 6.9 – Схема выращивания покрытий из плазмы разряда с горячим катодом:

- 1 - вакуумная камера; 2 - обрабатываемые детали подложки;
- 3 - источник питания для подачи положительного потенциала на катод;
- 4 - источник питания для подачи отрицательного потенциала на подложку;
- 5 - напыляемый материал; 6 - кольцевой катод

## 6.7 Выращивание покрытий из плазмы электродугового разряда с холодным катодом

Эффективными и относительно простыми являются устройства, основанные на процессах испарения генерируемого материала катодным пятном вакуумной дуги – сильноточным низковольтным разрядом, развивающимся исключительно в парах материала электродов. Теоретическое и экспериментальное изучение характеристик вакуумной дуги, а также решение ряда конструктивных вопросов позволило достигнуть в последнее время значительных успехов в совершенствовании технологии нанесения покрытий из электродугового разряда с интегрально холодным катодом.

Широкое распространение получил метод конденсации в вакууме на поверхность подложки вещества из плазменной фазы с ионной бомбардировкой – метод КИБ. Метод реализуется на различных установках обычного типа (рис. 6.10) и с плазмооптической системой управления плазменным потоком (холовским ускорителем) (рис. 6.11).

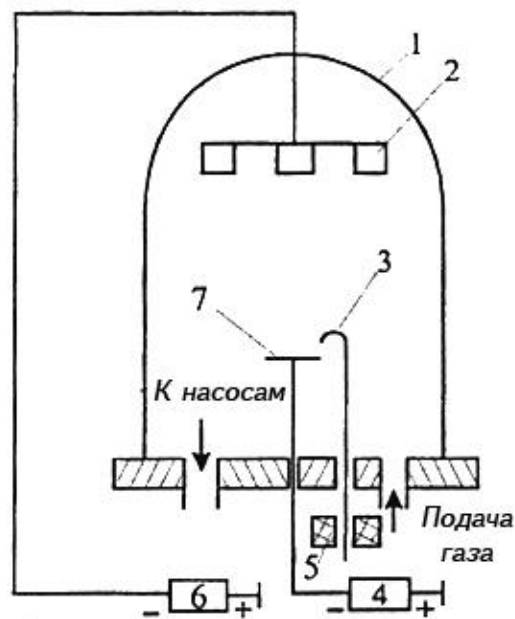


Рисунок 6.10 – Схема выращивания покрытий из плазмы электродугового разряда с холодным катодом (метод КИБ):

- 1 - корпус вакуумной камеры (анод); 2 - обрабатываемые детали;
- 3 - электромеханический поджег дуги; 4 - источник питания дуги;
- 5 - электромагнит; 6 - источник питания для подачи отрицательного потенциала на подложку; 7 - напыляемый материал (катод)

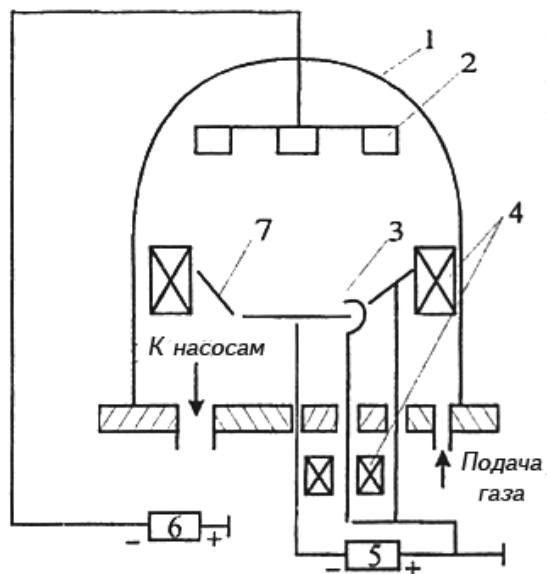


Рисунок 6.11 – Схема выращивания покрытий из плазмы электродугового разряда с холодным катодом и плазмооптической системой:

- 1 - корпус вакуумной камеры (анод); 2 - обрабатываемые детали;
- 3 - напыляемый материал (катод); 4 - электромагниты; 5 - источник питания дуги;
- 6 - источник питания для подачи отрицательного потенциала к подложке;
- 7 - водоохлаждаемый анод

*Метод КИБ основан на том, что плазменный поток металла, образующийся с помощью вакуумной дуги с холодным катодом, ускоряется путем приложения отрицательного потенциала к изделию с последующей конденсацией на нем ионов и нейтральных атомов при одновременном прохождении плазмохимической реакции их с реактивным газом. Подавая в вакуумную камеру газ-реагент во время электродугового испарения тугоплавкого металла, можно получать покрытия на основе нитридов, карбидов и других соединений металлов IV - VI групп Периодической системы элементов.*

*Важной особенностью данного метода является возможность проведения эффективной ионной очистки поверхности изделия путем интенсивной бомбардировки ее ускоренными ионами распыленного вещества, что создает условия для высокой адгезии покрытия к подложке. При высоком потенциале подложки (1 кВ и выше) ускоренными ионами распыляется не только осаждающийся металл, но и частично поверхностный слой подложки. Так осуществляется ионное травление подложки, обеспечивающее очистку поверхности. Одновременно ускоренные ионы внедряются в подложку и насыщают*



тонкий приповерхностный слой. Глубина проникновения ионов в этом случае оказывается достаточной для обеспечения надежной адгезии покрытия.

В настоящее время разработан ряд различных модификаций установок для нанесения износостойких покрытий, объединенных единым принципом генерации вещества мишени катодным пятном вакуумной дуги. Основные отличия их заключаются в способах доионизации, фокусировки, ускорения и сепарирования плазменного потока. Улучшать качество нанесения износостойких покрытий позволяет разработка комплексной технологии, включающей предварительную химико-термическую обработку с последующим нанесением покрытия, например, предварительное ионное азотирование контактных площадок инструмента и осаждение покрытий по методу КИБ. Преимущество комплексного технологического процесса заключается в возможности совмещения обеих операций в одном технологическом цикле при использовании вакуумно-плазменных установок нового поколения.

Анализ вакуумных методов нанесения покрытий показывает, что производительность наращивания слоев методом КИБ превосходит другие методы, обеспечивает высокое качество покрытий, приоритетное положение и преимущественное развитие его в условиях серийного производства.

## **6.8 Метод активированного реакционного испарения**

*Метод активированного реакционного испарения (АРИ) (рис. 6.12) является модификацией широко известного метода термического испарения и конденсации в вакууме. Метод позволяет с достаточной производительностью получить тугоплавкие соединения типа карбидов, нитридов, окислов, сульфидов и аналогичных материалов.*

При реакционном испарении в вакуумную камеру подают дозированное количество газов, таких, как азот, кислород, углеводороды (метан, ацетилен) и др. При этом испаряющиеся атомы металла, взаимодействуя с атомами газа, образуют химические соединения, например:  $2\text{Ti} + \text{C}_2\text{H}_2 \rightarrow 2\text{TiC} + \text{H}_2$ . С целью полноты протекания реакции применяют различные способы активирования или ионизации атомов металла в паровой фазе и газе. В качестве источника испарения используют в основном высоковольтные электронно-лучевые пушки,

нагрев которыми сопровождается формированием над поверхностью расплава тонкого слоя плазмы.

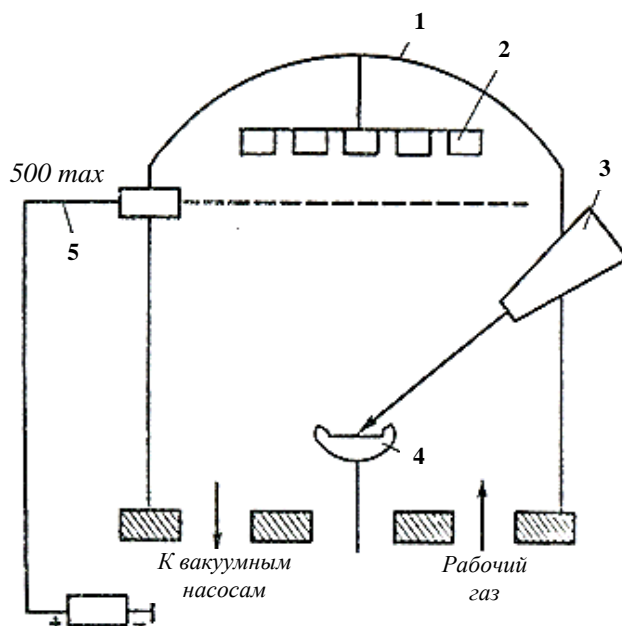


Рисунок 6.12 – Схема метода активного реакционного испарения:

1 – вакуумная камера; 2 – изделие; 3 – электронно-лучевая пушка; 4 - мишень

С помощью помещенного над расплавом электрода с небольшим положительным потенциалом (50-400 В) низкоэнергетические вторичные электроны вытягиваются из плазменного слоя и образуют плазменную область между расплавом и электродом.

Низкоэнергетические электроны ионизируют или активизируют атомы газа и металла в паровой фазе. Тем самым возрастает вероятность протекания реакции взаимодействия при их столкновении. В плазме имеет место также обмен зарядами при столкновении положительных ионов и нейтральных атомов.

Кроме того, в плазме возникают нестабильные молекулы химических соединений, находящиеся в возбужденном состоянии и являющиеся зародышами химических соединений на подложке.

Этот процесс обеспечивает полное протекание синтеза, например, TiC, при реакции паров металла с атомами газа  $C_2H_4$ , когда отношение металл/металлоид близко к единице.

За счет изменения парциального давления газового компонента можно регулировать отношение металл/металлоид в покрытии. Наличие

плазмы обеспечивает более полное использование газа-реагента, что позволяет получить высшие химические соединения при низком парциальном давлении газа.

Предложен целый ряд методов:

– отрицательный, положительный или "плавающий" потенциал подают на подложку (вместо использования специального электрода);

– над расплавом устанавливают дополнительный эмиттер электронов (например, нагреваемую вольфрамовую нить), что повышает степень ионизации парогазовой смеси и позволяет в более широких пределах регулировать скорость испарения;

– вместо высоковольтной электронно-лучевой пушки используют плазменную электронно-лучевую пушку с горячим полым катодом (для осаждения TiC) или с холодным катодом (для осаждения TiN). В этом случае благодаря низкой энергии первичные электроны не только нагревают расплав, но и способствуют ионизации испарившихся атомов металла и газа.

Метод АРИ обеспечивает достаточно высокие скорости осаждения покрытий (от 20 до 200 мкм/ч). В частности, при электронно-лучевом испарении (мощность луча 3 кВт, расстояние от испарителя до подложки 130 мм) скорость осаждения TiC составила 60-120 мкм/ч. При испарении пушкой с полым катодом (типичные характеристики: внутренний диаметр танталового катода 4 мм, длина 80 мм, толщина стенки 0,5 мм, скорость подачи аргона 30 см<sup>3</sup>/мин, разряд 40 В, 200 А, расстояние от испарителя до подложки 140 мм) скорость осаждения TiC около 12 мкм/ч.

Методом АРИ получены следующие соединения: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, V<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiC, ZrC, NbC, Ta<sub>2</sub>C, TaC, VC, W<sub>2</sub>C, NiC, NiN, VC-TiC, TiC-Ni, TiN, Cu<sub>x</sub>Mo<sub>6</sub>S<sub>8</sub>, Cu<sub>x</sub>S, окислы титана и др.

В качестве реакционного газа предпочтительнее использовать метан (CH<sub>4</sub>) и этилен (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>), чем ацетилен (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>).

Твердость покрытия зависит от парциального давления реактивного газа, температуры подложки и потенциала на подложке. Данным методом может быть обеспечена очень высокая микротвердость TiC (HV=3000 Па в случае осаждения при 500°C, HV=5500 Па в случае осаждения при 1000°C.)

В процессе активированного реактивного осаждения покрытие из TiN не всегда хорошо воспроизводится и часто является пористым. Для устранения этого недостатка рекомендовано строго контролировать соотношение между скоростью испарения и подачей азота.

## 6.9 Электронно-лучевое плазменное выращивание покрытий

Одним из путей решения проблемы нанесения качественных защитных покрытий в вакууме является применение разработанного способа электронно-лучевого плазменного наращивания (ЭЛПН), заключающегося в использовании несамостоятельного электрического заряда в парах испаряемого металла, ионизированного электронным лучом. С помощью ЭЛПН можно получать ионизированный поток пара с регулируемой энергией ионов в широком диапазоне за счет подачи на подложку отрицательного потенциала смещения различной величины.

Основой испарителя служит электронно-лучевая система с термоэлектронным кольцевым катодом, с которого эмитируются электроны, ускоряются до величины приложенного потенциала и бомбардируют поверхность металла, приводя к испарению последнего в результате нагрева. Часть испаренных атомов ионизируется при столкновении с электронами, и при определенной скорости испарения между поверхностью и кольцевым катодом достигается такая плотность пара, что происходит пробой промежутка катод-анод и работа испарителя переводится в режим несамостоятельного разряда, характеризующегося большим током и относительно малым падением напряжения в промежутке анод-катод. Поток пара состоит из ионов, возбужденных атомов и вторичных электронов, образующихся при столкновении первичных электронов с атомами пара. Таким образом, при ЭЛПН конденсация потока пара происходит в присутствии ионов испаряемого металла, энергию которых можно регулировать за счет величины подаваемого на подложку отрицательного потенциала смещения  $U_{см}$ , а степень ионизации - напряжением и током разряда, а также парциальным давлением и потенциалом ионизации испаряемого металла. Метод позволяет наносить с высокой производительностью чистые металлы, а также тугоплавкие соединения, если испарительное устройство снабжается кольцевым коллектором для ввода в плазму испаряемого металла активного газа. В отличие от известных электродуговых методов испарения, реализованных в установках типа "Булат" и "Пуск", при ЭЛПН расходуемым электродом является не катод, а анод, что позволяет полностью избавиться от капельной фазы за счет диффузионного пятна, покрывающего всю площадь анода (испаряемого металла).

К катоду и аноду электронной пушки от источника питания подводится высоковольтное напряжение. В зависимости от типа пушки оно составляет 5-60 кВ.

Электроны после прохождения электрического поля с разностью потенциалов  $U_0$  ускоряются и приобретают кинетическую энергию  $E_k$ :

$$E_k = 1/2m_0 - V_0^2 = eU_0$$

где  $m_0$ ,  $V_0$ ,  $e$  – масса, скорость и заряд электрона.

Например, проходя через поле с напряжением в 1В, скорость  $V_0=595\text{м/с}$ . Энергия атомов в потоке невелика и составляет 0,2-0,3В, степень ионизации частиц 0,05-0,1%.

Для повышения производительности и стабилизации процесса испарения целесообразно на ионизированный поток металлического пара накладывать продольное магнитное поле. Работа в режиме низковольтного несамостоятельного разряда дает высокую степень ионизации потока пара, приближающуюся к 100%. В установках, работающих по схеме испарителя с анодной формой дуги, реализуются высокие мощности разряда, достигающие 10кВт. Практически полностью ионизированный поток пара позволяет получать покрытия с высокой адгезионной и когезионной прочностью без дополнительного нагрева изделия.

Способ ЭЛПН с применением напуска реакционного газа в вакуумную камеру в процессе наращивания получил название РЭП (реакционное электронно-лучевое плазменное), на базе которого были созданы опытно-промышленные и промышленные установки.

Существенное влияние на работоспособность покрытий и прочность их сцепления с подложкой оказывает *высокий уровень термических напряжений*, возникающий из-за разницы коэффициентов линейного термического расширения материалов подложки и покрытия. Установлено, что микротвердость покрытий нитрида титана на стали Р6М5 после наращивания и последующей выдержки при комнатной температуре снижается и через 10÷12 суток устанавливается постоянное значение, что обусловлено релаксацией термических (сжимающих) напряжений в результате пластической деформации поверхностных слоев металлической подложки. Поэтому с целью уменьшения напряжений в покрытиях и повышения их износостойкости целесообразно между покрытием нитрида титана стехиометрического состава и подложкой создавать переходный компенсационный слой титана с постоянным увеличением в нем содержания фазы TiN вплоть до 100%-ного TiN.

## 6.10 Синтез многослойных ионно-плазменных покрытий в одновакуумном цикле

Синтез многослойных покрытий можно реализовать в установках, которые работают по принципу одновакуумного цикла. Модульное построение установки дает возможность проведения нескольких видов обработки поверхностей деталей и инструмента, в том числе многослойного синтеза ионно-плазменных покрытий с применением КИБ, магнетронного распыления и ионной имплантации в одновакуумном цикле. Схема рабочей камеры представлена на рис. 6.13. Вакуумная система позволяет достичь давления  $6,65 \times 10^{-3}$  Па ( $5 \times 10^{-5}$  мм рт. ст.) не более чем за 20 мин.

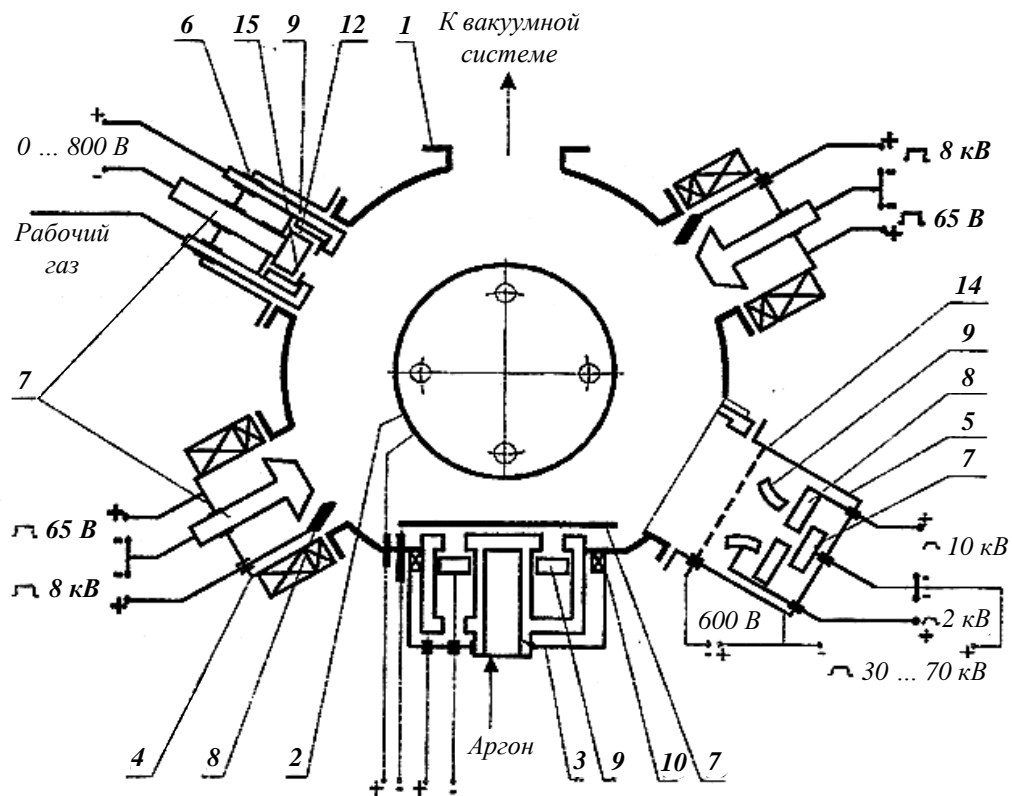


Рисунок 6.13 – Схема рабочей камеры установки для синтеза многослойных покрытий:

- 1 – камера; 2 – устройство для размещения деталей и передачи движения в вакууме;
- 3 – источник ионов для ионной очистки; 4 – испаритель;
- 5 – источник ионной имплантации («Диана»); 6 – магнетронный источник распыления;
- 7 – катод; 8 – электрод; 9 – анод; 10 – стабилизирующая катушка; 11 – фокусирующая катушка; 12 – постоянные магниты; 13 – заслонка; 14 – сетка; 15 – катод-мишень

Основная сложность в создании эффективного средства модифицирования поверхностей, например, поверхностей трения металлических деталей заключается в необходимости обеспечения оптимального состава покрытия для увеличения ресурса работы узлов трения в определенных условиях их эксплуатации, при необходимости выбора оптимальных режимов нанесения многослойных покрытий в одном вакуумном цикле, при необходимости обеспечения равномерного распределения частиц имплантируемого вещества – имплантату при обработке внутренних цилиндрических поверхностей.

### 6.11 Метод ионного осаждения

В аппаратном исполнении установка для ионного осаждения (рис. 6.14) совмещает элементы установки для термического испарения и ионного распыления. Метод обеспечивает высокую производительность и повышенную энергию осаждаемых частиц. Это обусловлено тем, что испарение металла проводится чаще всего электронным лучом в атмосфере тлеющего разряда, который возбуждается между катодом-подложкой и анодом-испарителем. На подложку подается отрицательный потенциал величиной 1-5 кВ. На стадии предварительной очистки при электрическом разряде в среде аргона на изделие может подаваться отрицательный потенциал до 15 кВ (5).

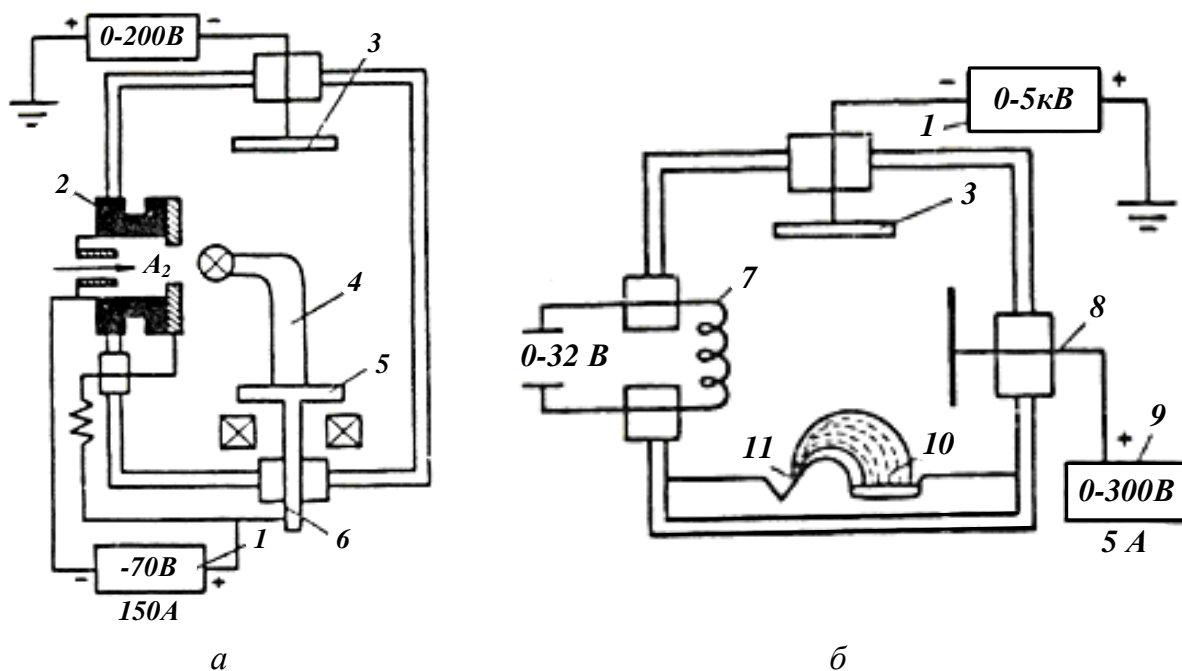


Рисунок 6.14 – Схема установки для ионного осаждения

Рабочий газ (аргон) напускают в рабочую камеру до давления  $10^{-3} - 10^{-2} \times 12,3$  Па после предварительного вакуумирования установки ( $10^{-5} - 10^{-6} \times 12,3$  Па). Атомы испаренного металла в плазме ионизируются или возбуждаются, и благодаря высокому отрицательному потенциалу на подложке происходит интенсивная ионная бомбардировка поверхности конденсации в процессе осаждения материала.

Повышенное давление улучшает однородность покрытия, создаются условия для нанесения их на затененные участки изделия.

Высокая прочность сцепления покрытия с подложкой обеспечивается не только за счет предварительной ионной очистки последней в результате бомбардировки поверхности ионами аргона, но и за счет внедрения ионов покрытия в подложку на глубину до 50 А. В сочетании с диффузией и псевдодиффузией ширина переходного слоя на границе раздела может составлять 1-2 мкм.

Один из наиболее простых методов повышения степени ионизации и снижения давления – применение положительного электрода (под потенциалом 200-500 В) для создания триодной системы. Особенно эффективна эта система при электронно-лучевом испарении, когда вторичные электроны, эмитированные расплавом, ускоряются в электрическом поле, создаваемом электродами. Для усиления ионизации ионную схему осаждения преобразуют не только в триодную, но и в тетродную, или применяют соленоид для создания продольного магнитного поля.

На характеристики разряда влияют также размеры деталей и наличие металлических экранов. Существенно расширяются возможности управления процессом при использовании дополнительных эмиттеров электронов.

## **6.12 Методы оценки качества пленочных покрытий**

Среди многих видов покрытий тонкие вакуумно-плазменные занимают особенное место. Эта особенность определяется их незначительной толщиной, высокой микротвердостью, прочностью сцепления с подложкой, а также условиями эксплуатации, характеристиками трения, износостойкостью и тому подобное.

*Определение толщины пленки* возможно несколькими методами: путем прямого измерения подложки до и после нанесения покрытий, методом металлографических шлифов и целым рядом разнообразных физических методов.



*При металлографическом методе контроля* образцы или инструмент плотно прижимают напыленными поверхностями к другой поверхности с твердостью, равной твердости подложки, и по специальной технологии изготавливают металлографические шлифы в плоскости, перпендикулярной к поверхности наращивания. После травления шлифов в 4%-м растворе азотной кислоты в этиловом спирте износостойкий слой проявляется в виде светлой зоны, которая не травится. Толщина слоя измеряется на металлографическом микроскопе при увеличении 1000-2000 X. Недостатком описанного метода является необходимость разрушения изделия.

*Среди физических методов наиболее распространенным является рентгеноструктурный анализ.*

*Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников* базируется на двух методах испытаний: основном – по восстановленному отпечатку и дополнительном – по необновленному.

При испытании применяют алмазные наконечники с формой рабочей части: а – четырехгранная пирамида с квадратной основой; б – трехгранная пирамида с основой в виде равностороннего треугольника; в – четырехгранная пирамида с ромбической основой; г – цилиндр.

При выборе нагрузки исходят из предположительной глубины отпечатка. Минимальная толщина слоя (покрытия) должна превышать глубину отпечатка не меньше, чем в 10 раз.

Для испытания на микротвердость пленок толщиной меньше 4мкм рекомендуется применять алмазный наконечник с формой рабочей части в виде бицилиндра.

Применяются разнообразные способы определения *прочности сцепления покрытия с подложкой*. Большая часть разработанных методов основана на полном отделении покрытия от подложки, которая является неприемлемым в случае тонких твердых покрытий. Другая часть методов позволяет определить лишь качественную характеристику прочности сцепления путем царапания с постоянной нагрузкой на иглу или с помощью укола алмазным наконечником.

*Метод царапания с переменной нормальной нагрузкой* является наиболее приемлемым количественным методом для определения сцепляемости тонких твердых покрытий с подложкой. Он позволяет определить критические нормальные нагрузки, при которых начинается потеря сцепления покрытия с материалом подложки. Устройство, которое царапает, имеет алмазную иглу в форме конуса Роквелла с радиусом затачивания 0,2 мм.

С ростом нормальной нагрузки наступает момент, когда покрытие теряет связь с подложкой. *Нагрузка, при которой теряется сцепление покрытия с подложкой, называется критической. Размер критической нагрузки является критерием прочности сцепления с подложкой.*

Наиболее простым и достаточно надежным методом определения *пористости износостойких покрытий* является средство наложения на поверхность напыленного инструмента фильтровальной бумаги, пропитанной водяным раствором  $K_3Fe(CN)_6$  – 10 г/л,  $NH_4Cl$  – 30 г/л,  $NaCl$  – 60 г/л. После выдержки в течение 5мин бумагу промывают дистиллированной водой и просушивают на чистом стекле. Признаком несплошности покрытия является наличие на фильтровальной бумаге следов темно-синего цвета реакции раствора с быстрорежущей подложкой, что характеризуют количество и величину пор на исследуемом участке.

*Более точным методом является потенциостатический контроль.* В этом методе количественное определение площади сквозных дефектов в покрытии основано на определении величины анодного тока, который отвечает анодной реакции взаимодействия электролита с металлом подложки на дне сквозных дефектов покрытия. При постоянном потенциале величина измеряемого анодного тока для контролируемых поверхностей равной площади должна быть пропорциональной площади сквозных дефектов.

*Износостойкость тонких пленок* обычно оценивают в процессе трения, например, на машине трения СМЦ-2 по схеме цилиндр – плоскость.

Скольжение происходит по одной и той же поверхности цилиндра, то есть износостойкость определяется в условиях повторного трения при отсутствии ювенильного контакта. Наиболее близко это средство моделирует, например, условия трения задней поверхности инструмента, однако повторное трение и отсутствие ювенильности искажают условия контакта трущихся поверхностей, которые наблюдаются при резании.

По другой методике оценки изучают износ ползуна в условиях, когда поверхность трения непрерывно обновляется, то есть трение и износ происходят на свежесозданной ювенильной поверхности.

Работоспособность режущих инструментов с покрытием оценивают, исследуя износ в условиях, моделирующих процесс трения. Отличия от реального процесса резания – это отсутствие ювенильности контакта, повторное трение и расхождение в наростообразовании, что является причиной ошибок при оценке износа инструментов с износостойкими покрытиями.

Принцип определения износостойкости покрытия, нанесенного на режущую пластину, в котором устранены перечисленные выше изъяны, заключается в том, что с целью повышения точности износ инструментальных материалов с разнообразной адгезионной активностью осуществляется при ювенильном контакте со стружкой, которая срезается в одинаковых условиях, predetermined формой и размерами застойной зоны на передней поверхности. Для этого режущее лезвие инструмента изготавливается с фаской под углом ( $-10^\circ$ ) и шириной, которая относится к толщине среза как (1,5-2): 1 (рис. 6.15).

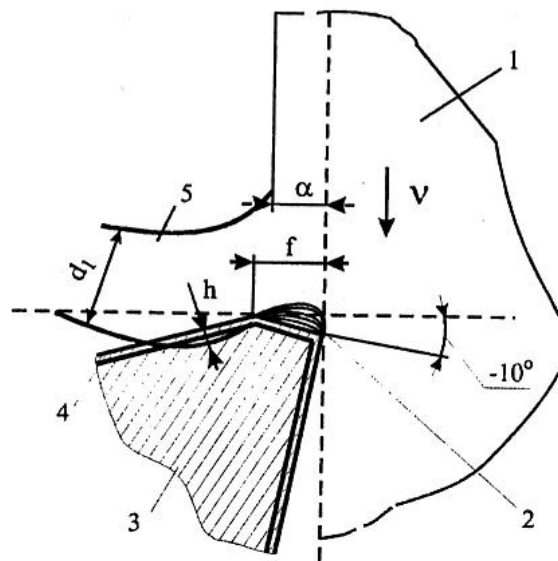


Рисунок 6.15 – Схема испытаний на износостойкость тонких пленок при резании:

1 – обрабатываемый материал; 2 – застойная зона; 3 – режущая пластина из быстрорежущей стали; 4 – износостойкое покрытие; 5 – стружка

Сохранение постоянства формы и размеров застойной зоны для инструментальных материалов с разнообразной адгезионной активностью является важнейшим условием повышения точности определения возможности пленки противостоять износу.

Для определения износостойкости покрытий любых составов, нанесенных на быстрорежущую подложку, рекомендуется применять такие условия испытаний: точение стали 45, скорость – 30м/мин, глубина резания – 1,5мм, подача – 0,43 мм/об ( $\alpha=0,3$  мм при  $\varphi=45^\circ$ ), угол фаски – ( $-10^\circ$ ), размер фаски  $f = 0,50$  мм, время испытаний – 10мин, без СОТС. Площадь ячейки износа определяют планометрированием.

Для повышения точности измерений и повторяемости результатов режущую пластинку выводят из зоны резания по принципу «падающего резца».

### 6.13 Работоспособность режущих инструментов с покрытиями

Повышение работоспособности режущих инструментов достигается целым рядом свойств покрытий, которые непосредственно контактируют с обрабатываемым материалом. Это проявляется в повышении производительности, снижении общих расходов на режущий инструмент, повышении качества обработки, возможности отказа от применения СОТС и тому подобное. На рис. 6.16 схематически представлены факторы, которые положительно и негативно влияют на инструмент с покрытием.

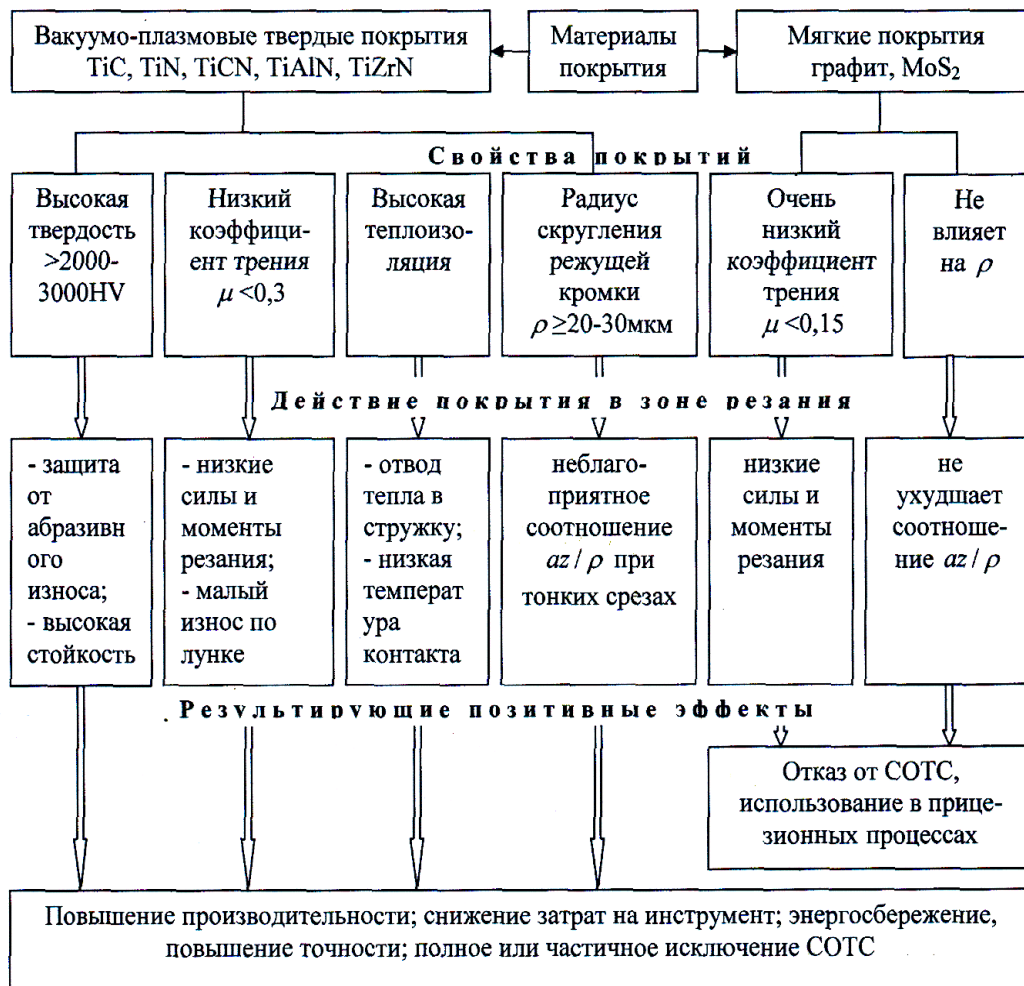


Рисунок 6.16 – Обобщенная характеристика влияния покрытий на процесс резания и работоспособность инструмента

С помощью покрытий разрешается противоречие между высокой твердостью и вязкостью, свойственное инструментальным материалам. Создаются предпосылки для реализации процессов сухого резания, потому что покрытия имеют не только высокую износостойкость, но и низкую теплопроводность, то есть могут выступать своеобразным тепловым барьером.

Эти эксперименты показывают, что нагревание подложки до температуры приблизительно  $800^{\circ}\text{C}$  не приводит к десорбции (повторному испарению) на потенциальных «буграх» рельефа, которые мигрируют по поверхности атомов, на начальном этапе формирования пленки.

На рис. 6.17 представлена схема влияния основных технологических параметров процесса КИБ на качественные характеристики быстрорежущего инструмента с покрытием.

Оптимальные температурные условия нанесения покрытий, например, на быстрорежущий инструмент приведены на рис. 6.18. На этапе ионного очищения и термоактивации поверхности подложки важнейшими параметрами процесса являются температура и время ее достижения. Температура ограничена значениями приблизительно  $540\text{-}550^{\circ}\text{C}$ , а время очищения и термоактивации принимают в пределах 5-10 мин. Такой узкий интервал времени очистки обусловлен, с одной стороны, необходимостью обеспечения качественной очистки, а с другой, - хранением размеров радиусов округления режущих кромок от увеличения (растравливания).

На этапе II – осаждение покрытия – оптимальными являются условия поддержания температуры подложки на уровне  $525\pm 10^{\circ}\text{C}$ . При такой температуре обеспечивается формирование покрытия с наилучшей структурой.

На этапе III – охлаждение инструмента с покрытием осуществляют в камере установки «Булат» до температуры  $190^{\circ}\text{C}$ , что предотвращает окисление износостойких пленок на воздухе.

*Тепловыми условиями осаждения и формирования износостойкого покрытия можно управлять такими способами: изменением размера напряжения на подложке и силы тока в цепи испарителя; кратковременным подключением высокого напряжения; подогревом (охлаждением) с помощью дополнительных источников тепла (охлаждение); применением технологической оснастки для крепления инструмента с низкой (высокой) теплоемкостью.*

Охлаждение быстрорежущего инструмента является завершающим этапом технологического цикла. Оно осуществляется в камере установки до

температуры 190°C с целью предотвращения окисления инструмента, после чего камера раскрывается, и он остывает на воздухе.

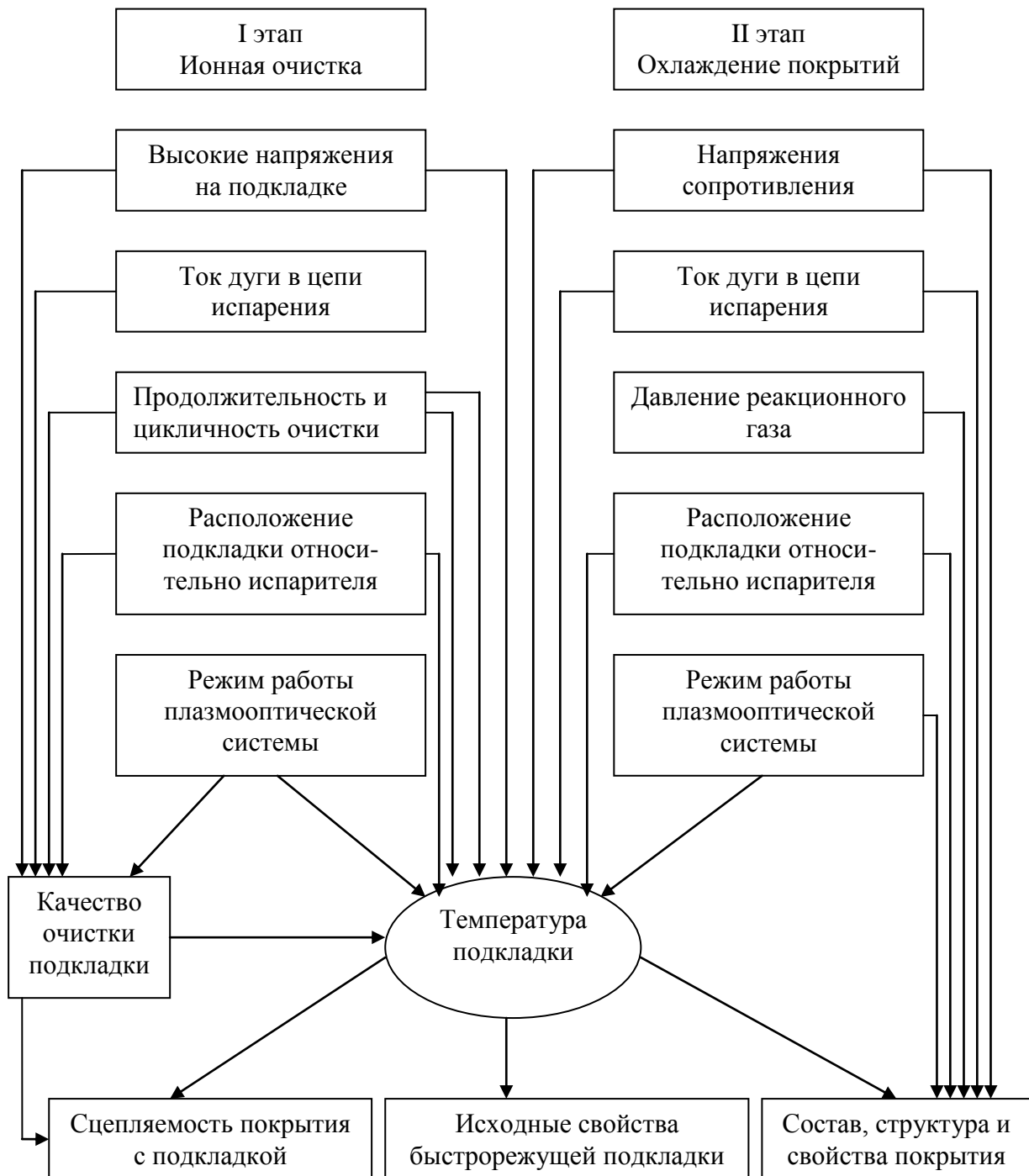


Рисунок 6.17 – Схема влияния технологических параметров процесса нанесения износостойких покрытий на качественные характеристики быстрорежущего инструмента

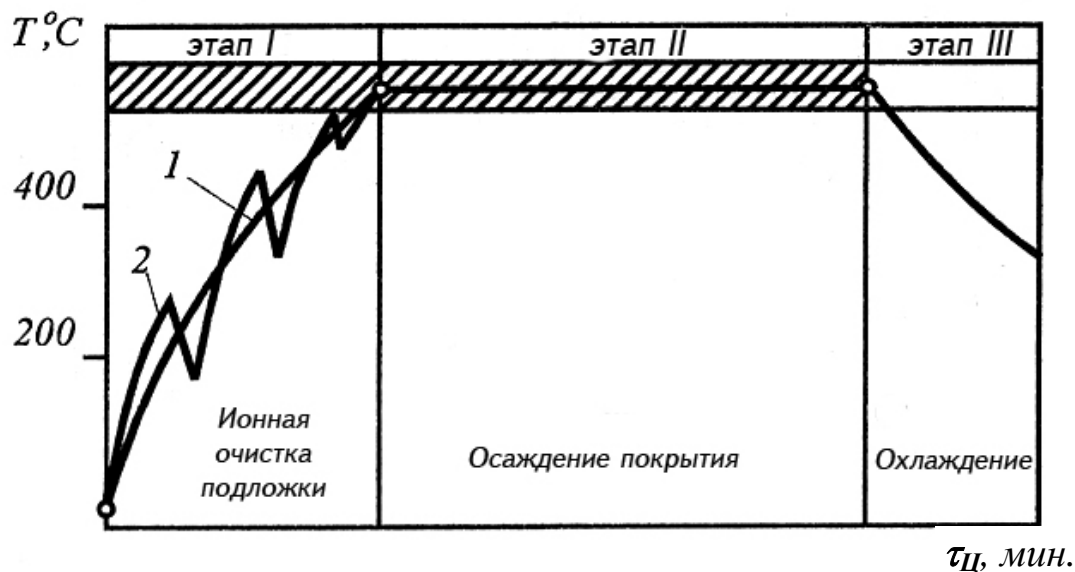


Рисунок 6.18 – Оптимальные температурные условия нанесения покрытий на быстрорежущий инструмент методом КИБ:

1 - непрерывное нагревание; 2 - циклическое нагревание

Наиболее сложноуправляемым фактором, который зависит от большинства режимных параметров технологического цикла, а также массы и габаритных размеров инструментов, средства их крепления в рабочих приспособлениях и перемещения относительно испарителя, который влияет на качество и работоспособность инструмента, является температура подложки как на этапе ионного очищения, так и в процессе нанесения покрытия.

Разработаны принципы, технология и оборудование комплексной поверхностной ионно-плазменной обработки (КИПО). В соответствии с этими принципами повышения долговечности покрытий может быть достигнуто путем увеличения пластической прочности и жесткости режущего клина инструмента за счет формирования износостойкого комплекса (рис. 6.19). Он состоит из:

- слоя 2, что термостабилизирует и способствует росту пластической прочности и жесткости режущего клина инструмента;
- внешнего износостойкого покрытия 4 однослойного, композиционного, многослойного или многослойно-композиционного типов, которое имеет повышенное сопротивление усталостному разрушению, особенно в условиях повышенных контактных стационарных или циклических нагрузок;

– адгезионного подслоя 3, имеющего повышенную кристаллохимическую совместимость с материалами, и слоя, который термостабилизирует и обеспечивает повышение адгезионной прочности.

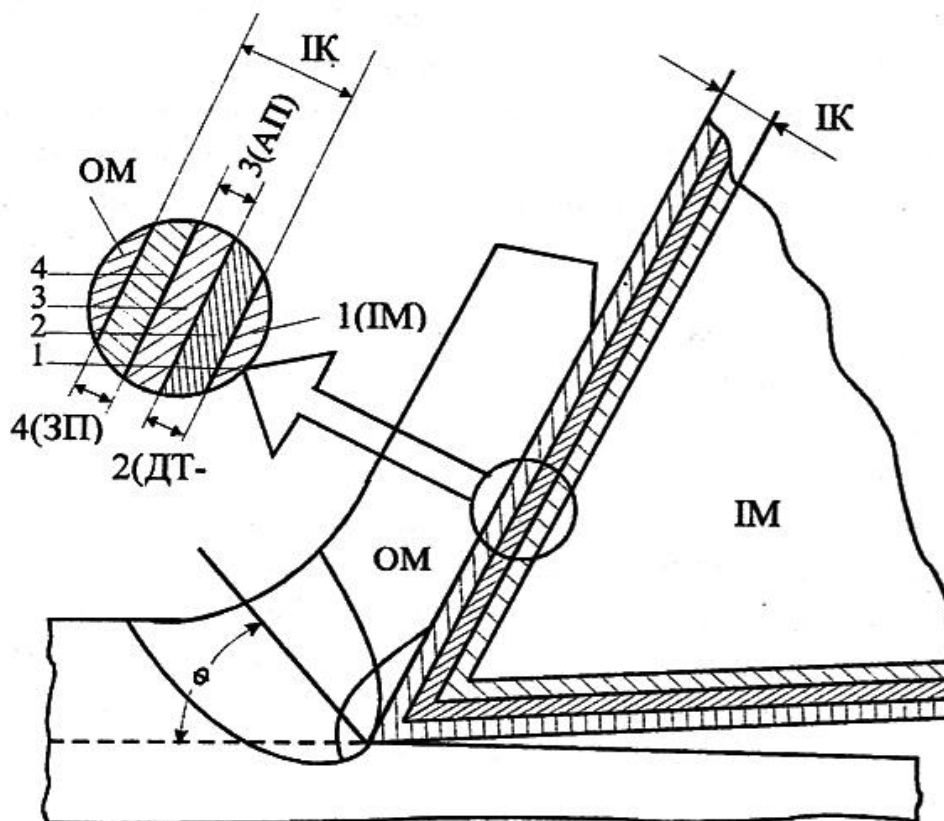


Рисунок 6.19 – Принципиальная схема износостойкого комплекса (ИК) для режущего инструмента:

- 1 – инструментальный материал (ИМ);
- 2 – диффузионный термостабильный слой (ДТ-слой);
- 3 – адгезионный подслоя (АП); 4 – износостойкое покрытие (ЗП),
- 5 – обрабатываемый материал (ОМ)

При этом необходимо придерживаться двух условий синтеза покрытия:

- активное взаимодействие касательных фаз материалов 2, 3, 4 должна обеспечивать крепкую адгезию между ними;
- взаимодействие касательных фаз материалов слоев 2, 3, 4 при температурах эксплуатации инструмента не должно приводить к



формированию хрупких интерметаллоидных фаз, которые снижают режущие свойства инструментального материала.

Принципиальная последовательность операций процесса КИПО инструмента с целью формирования ИК приведена на рис. 6.20, здесь же для сравнения приведена традиционная технология КИБ, применяемая для нанесения покрытий на режущий инструмент. Как видно из схемы, принципиальное отличие технологии КИПО от стандартной технологии КИБ заключается в разделении процессов прогрева и очистки инструмента (последнюю проводят газовой плазмой), формировании термостабилизирующего слоя 2, последовательного осаждения адгезионного подслоя 3 и износостойкого покрытия 4.

Комплексная ионноплазменная обработка инструмента из быстрорежущей стали может быть достаточно эффективной и в случаях необходимости повторных заточек режущего инструмента в процессе его эксплуатации.

Качество синтезированных покрытий можно проиллюстрировать наведением некоторых характеристик их свойств (табл. 6.4 и рис. 6.21, 6.22)

Производственным испытаниям подвергались крупные партии инструмента из быстрорежущих сталей марок P6M5, P18, P6M3, P9K5 и т. д. Результаты испытаний показали, что в зависимости от обрабатываемого материала и применяемого инструмента стойкость увеличивается в 1,5-5,3 раза. При этом применение подобных покрытий (табл. 6.5) позволяет заменить без снижения стойкостных свойств инструмент из стали марки P18 инструментом из стали марки P6M5 с высокотвердым покрытием, причем стойкость инструмента из стали марки P6M5 с покрытием в 1,5-2. раза выше стойкости инструмента из стали марки P18 без износостойкого покрытия. Трехгранные и четырехгранные твердосплавные пластины ТТ7К12 испытывали при обработке углеродистой стали марки 50 на токарно-винторезном станке. Исследования показали, что стойкость пластин с покрытием из TiN в 4-5,3

раза выше, чем у пластин без покрытия при скорости резания 40 м/мин, подаче 0,4 мм/об и глубине резания 1 мм.

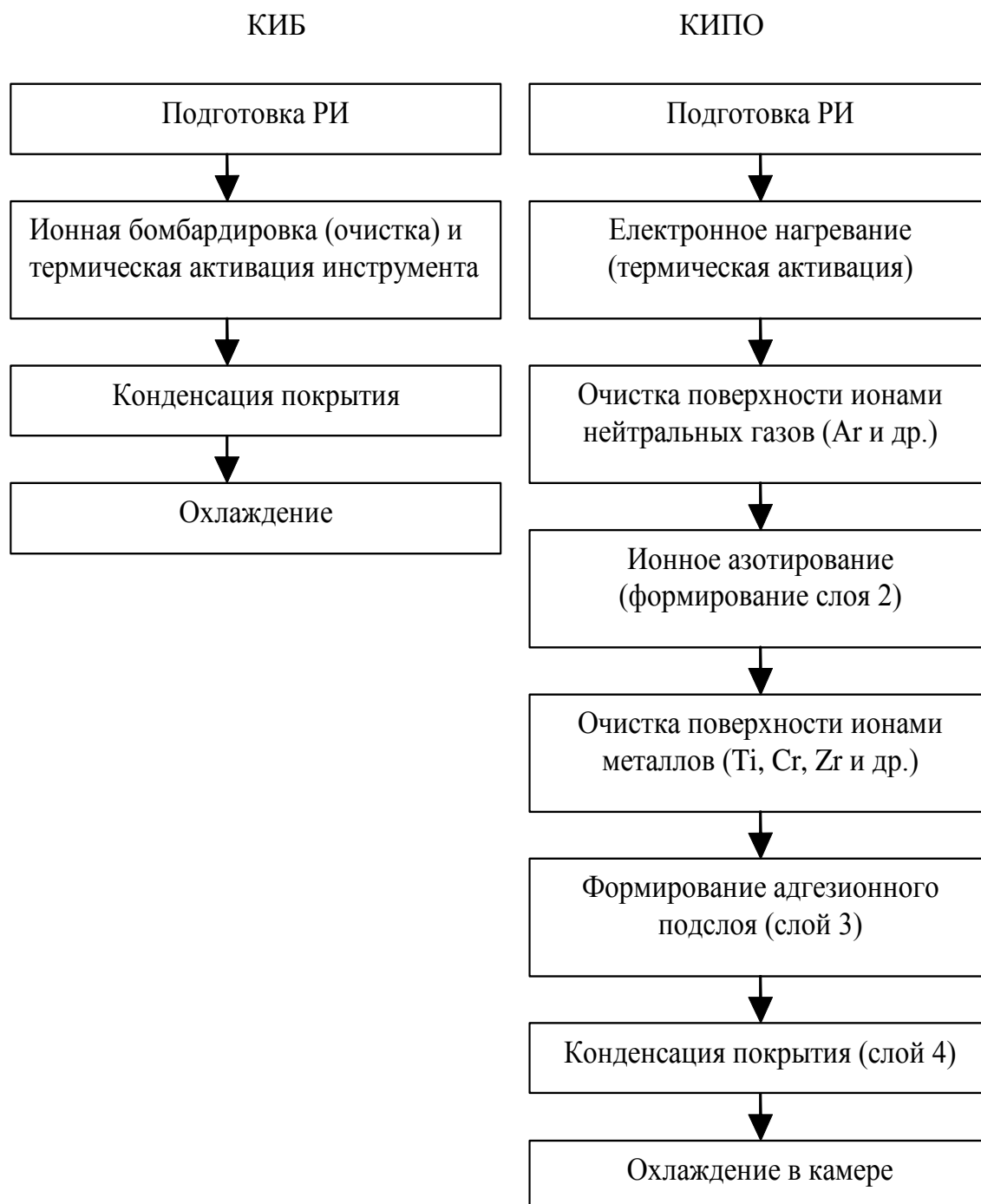


Рисунок 6.20 – Блок-схема технологического процесса комплексной ионно-плазменной обработки (КИПО) режущего инструмента

Таблица 6.4 – Обзор стандартных покрытий

Вид покрытия	Цвет	Температура покрытия	Применение
- Ti – монослойное покрытие	Золотой	180 - 500°C	Обработка резанием, пластическое формообразование, обработка полимерных материалов
- Ti – многослойное покрытие	Золотой	350 - 500°C	Усиление нагрузки резца (силовое резание)
- TiCN – монослойное покрытие	Фиолетовый	350 - 500°C	Фрезерование, штампование, пластичное формообразование, обработка полимерных материалов
- TiCN – многослойное покрытие	Серый	350 - 500°C	Резание материалов > 900 N/mm <sup>2</sup>
- TiAl – монослойное покрытие	Голубо- серый	250 - 500°C	Сухая обработка литых деталей в области высоких температур
-Cr- монослойное покрытие	Серебряный	180 - 450°C	Обработка резанием Ti или Al. Обработка полимерных материалов. Обработка давлением
- CrCN – многослойное покрытие	Серебряный серый	180 - 450°C	Резание композиционных материалов

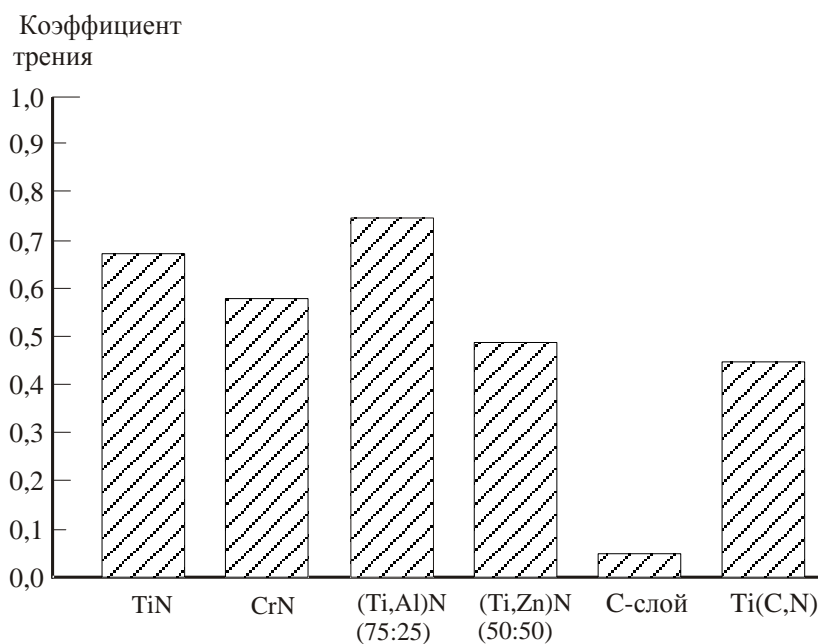


Рисунок 6.21 – Коэффициент трения PVD-Arc-покрытие (сфера с 100 Ст6 по покрытому диску)

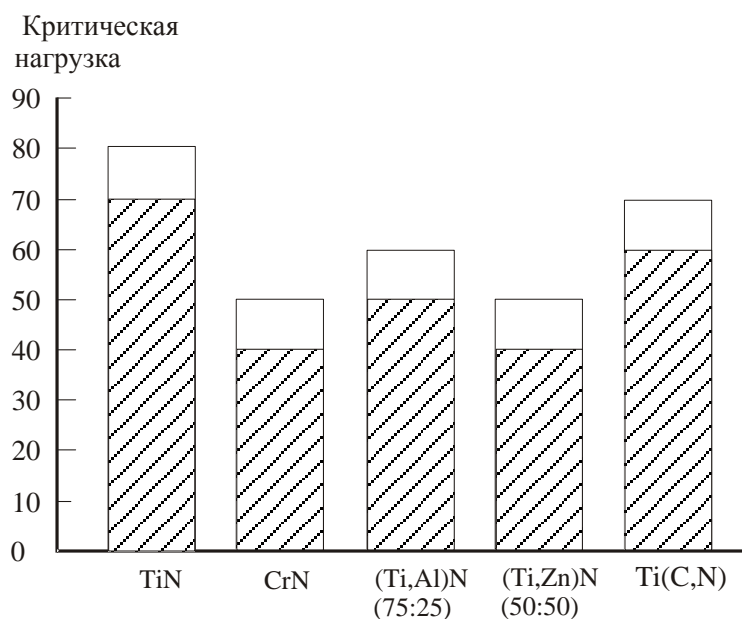


Рисунок 6.22 – Критическая нагрузка PVD-Arc-покрытие

Необходимо помнить, что на работоспособность покрытий очень влияет подготовка поверхности подложки, в частности, ее шероховатость сильно влияет на коэффициент трения.

Комплексное представление о влиянии различных покрытий на показатели сверления дают данные, приведенные на рис. 6.25.

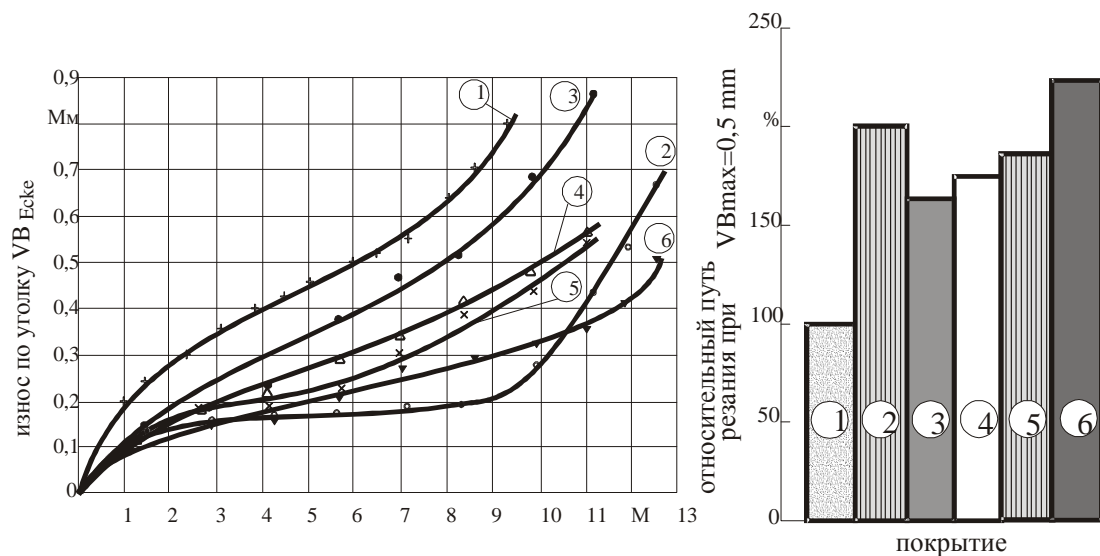


Рисунок 6.23 – Сравнение работоспособности износостойких покрытий

(инструмент: сверло  $\varnothing 12\text{мм}$ ;  
инстр. материал: быстрореж. сталь;  
обрабатываемый материал: С45 (200НВ);  
режим резания:  $V_c=35$  м/мин.;  
 $f_z=0,05$  мм;  
проходное отверстие (глубина 35мм);  
эмульсия 5%)

- 1 – без покрытия;
- 2 – покрытия TiN / Германия;
- 3 – покрытия ZrN-TiN / Украина;
- 4 – покрытия Zr-TiN-NbN / Украина;
- 5 – покрытия TiN / Украина;
- 6 – покрытие TiN -C / Германия.

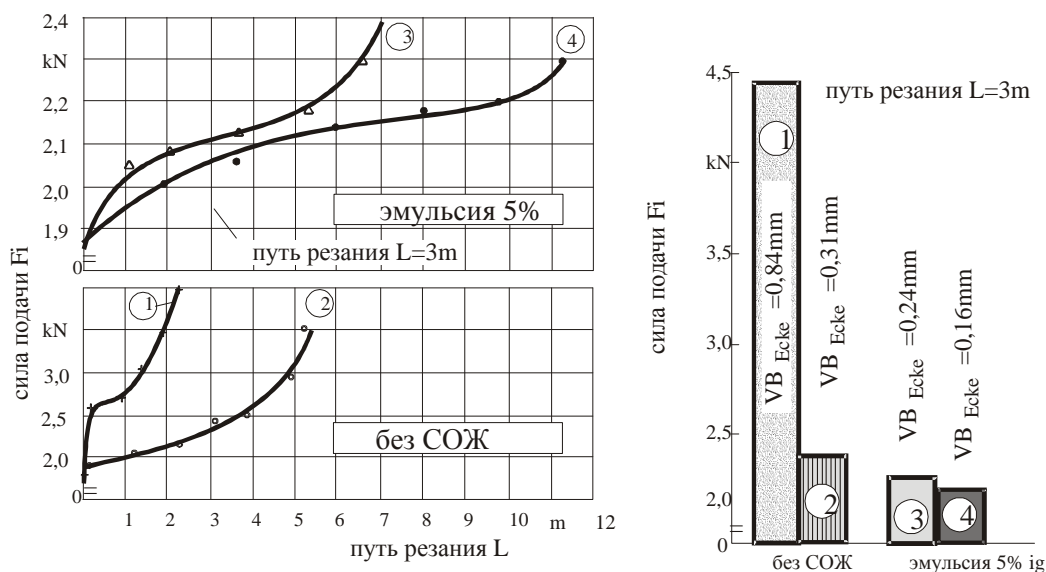


Рисунок 6.24 – Зависимость усилия подачи СОЖ и покрытия

(инструмент: сверло  $\varnothing 12\text{мм}$ ;  
инстр. материал: быстрореж. сталь;  
обрабатываемый материал: С45 (200НВ);  
режим резания:  $V_c=35$  м/мин.;  
 $f_z=0,05$  мм;  
проходное отверстие (глубина 35мм)

- 1 – покрытия TiN / Германия;
- 2 – покрытия ZrN-TiN / Украина;
- 3 – покрытия Zr-TiN-NbN / Украина;
- 4 – покрытия TiN / Украина;

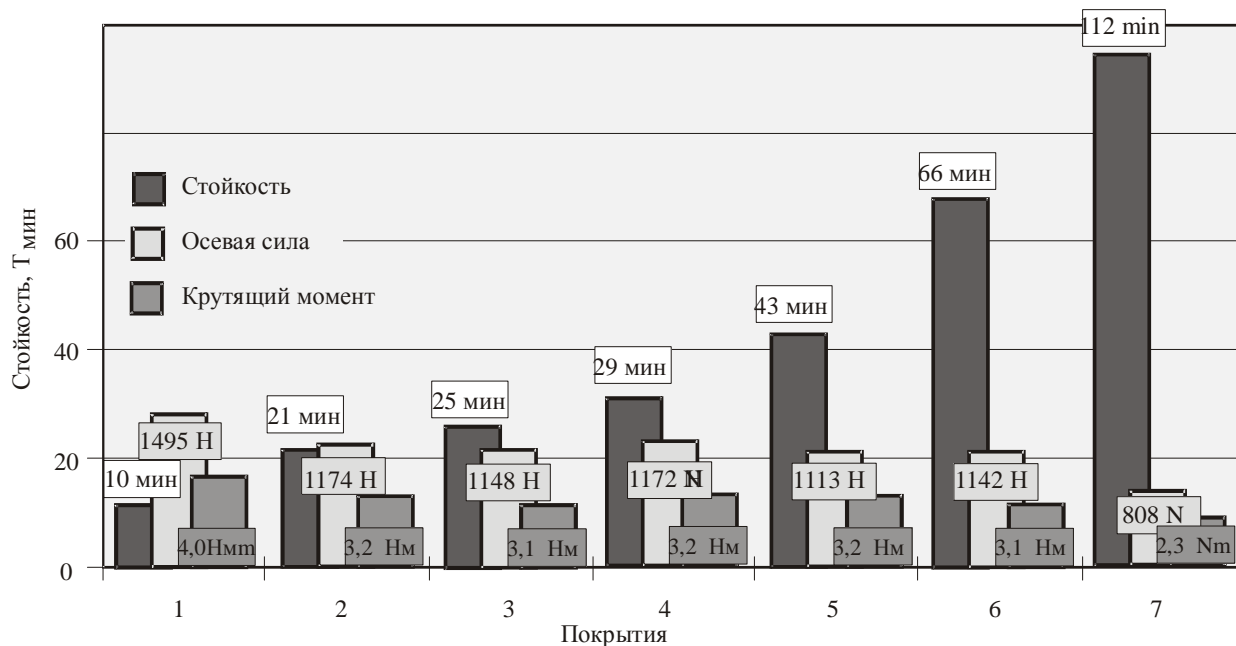


Рисунок 6.25 – Стойкость, осевая сила и момент кручения для сверла с различными покрытиями

Условия: быстрорежущее спиральное сверло  $\phi 6,8\text{мм}$ ;

Обрабатываемый материал – сталь 45 (200НВ); скорость резания  $V=35\text{м/хв}$ ;  
подача  $S=0,05\text{мм}$ ; глубина сверления  $l=30\text{мм}$ ; без СОТС.

Покрyтие: 1 – исходное состояние; 2 – TiCN обычное; 3 – TiN обычное;  
4 – рN/Ti/TiN/TiCN; 5 - рN/Cr/TiCrN; 6 - рN/Ti/TiN; 7 - рN/Ti/TiN/TiAlN

Исследованиями сравнительной стойкости твердосплавных пластин ВК6 (с покрытием TiN и без него) при обработке труднообрабатываемых материалов титанового сплава ВТ14 и высокопрочной стали марки СП28 установлено, что стойкость пластин с покрытием выше в среднем в два раза при обработке сплава марки ВТ14 и в 4 раза при обработке стали марки СП28. Титановый сплав марки ВТ14 обрабатывали при скорости резания 40-50 м/мин, а сталь марки СП28 – при 84 м/мин.

Покрyтия из TiC, TiN,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и HfN, осажденные методом АРИ на твердосплавный инструмент и инструмент из быстрорежущей стали, повысили их стойкость при непрерывном точении в 2-8 раз. Стойкость

сверл с покрытием из TiN возросла в 20 раз по сравнению со стойкостью сверл без покрытия.

С увеличением температуры подложки при нанесении покрытия стойкость инструмента возрастает (температура подложки должна быть выше 600°C).

Не во всех случаях максимальная стойкость отвечает максимальной твердости. Хотя более высокую твердость обеспечивает парциальное давление  $C_2H_2 \sim 1 \cdot 10^{-4} \cdot 12,3$  Па, минимальный износ задней грани имеет место при давлении  $C_2H_2 4 \cdot 10^{-4}$  мм рт. ст., что соответствует более низкому значению  $HV \sim 2500 \cdot 9,8 \cdot 10^{-6}$  Па.

Сравнение достигнутых стойкостей при сверлении быстрорежущими сверлами при критерии износа по углу  $h = 0,5$  мм показывает, что каждое нанесенное покрытие в данных условиях резания приводит к повышению стойкости минимум на 70% в сравнении с инструментами без покрытия. Режущие свойства сверл, прорезных и концевых фрез, резцов, зенкеров, разверток, метчиков и зубообразующего инструмента с износостойкими покрытиями окиси хрома и нитрида титана определялись при обработке сплавов марок О8Х17Н13М2Т, 12Х18Н10Т, 30ХГСА, 45, ОХ23Н28МЗДЗТ, 50, 20ХН3А, БрХ08, АМц, АМц-6 и др. При точении режущие свойства инструмента с покрытием оценивались в сравнении с резцами из стандартной стали марки Р18, а при обработке многолезвийным инструментом: развертками, фрезами, сверлами, метчиками - в сравнении с инструментом из тех же быстрорежущих сталей без покрытий. Толщина покрытий, осаждаемых на режущие кромки инструментов, составляла 5-15 мкм при микротвердости  $HV = 1500-3000$  Па.

Для ориентации в выборе составов износостойких комплексов приводится таблица 6.5.

Таблица 6.5 – Рекомендуемый состав покрытий для нанесения на режущие инструменты, предназначенные для резания труднообрабатываемых материалов

Обрабатываемый материал	Покрытие	Рекомендуемый инструм. материал вместо матрицы под покрытие	Ориентировочное значение скорости резания V, м/мин., при обработке инструментом		Повышение стойкости инструмента при нанесении покрытия (резание при оптимальной скорости)
			без покрытия	с покрытием	
Коррозионно-стойкие стали ферритного, мартенситного классов (типа 08X13, 12X13, 1X12H2BMB)		ВК6-М, ВК6, ТТ10К8-Б	140-160	170-200	2,5-3,5
Коррозионно-стойкие, жаропрочные стали аустенитного класса (типа X18H10T, X18H12T, X23H18, X15H5)	(Ti,Cr)-(Ti,Cr)N-TiN	ВК6-М, ВК6, ТТ10К8-Б	120-150	155-180	2,0-2,8
	(Ti,Zr)-(Ti,Zr)N-ZrN	P6M5K5, P12Ф4K5	10-20	15-28	1,5-2,2
	Zr-(Nb,Zr)-ZrN				
Жаропрочные, жаростойкие хромоникелевые стали (типа X12H20T3P)	Ti-(Ti,Al)N-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ВК6, ТТ10К8-Б	50-60	60-70	1,8-2,2
	Zr-(Nb,Zr)-ZrN				
Сплавы на титановой основе (типа BT1, BT3, BT6, BT14, BT20, BT22)	Cr-(Mo,Cr)N-CrN	ВК6	40-50	55-80	1,8-2,5
	Zr-(Zr,Cr)N-(Zr,Cr,Al)N				
Жаропрочные деформированные сплавы (типа ХН60В, ХН77ТЮ, ХН77ТЮР, ХН35ВТЮ)	(Ti,Cr)-(Ti,Cr)N-TiN				
	(Ti,Cr)-(Ti,Cr,Al)N-(Ti,Al)N	ВК6, ТТ10К8-Б	20-45	25-60	1,8-2,5
	Cr-(Mo,Cr)N-CrN				



## 6.14 Заключение

Наиболее эффективная область синтезированных покрытий определяется их функциональными свойствами: износостойкостью, коррозионной стойкостью, оптическими, триботехническими, декоративными и др. Послойное выращивание – реализация генеративного принципа – позволяет конструировать поверхностный слой изделия в зависимости от требований эксплуатации. Текстурирование граничного слоя при многослойном синтезе покрытий дает возможность на наноуровне управлять свойствами поверхности.

Износостойкость покрытий определяет их использование для режущих, деформирующих и измерительных инструментов, технологической оснастки, деталей машин.

Коррозионностойкость покрытий важна для изделий медицинской техники (зубные протезы, хирургические и др. инструменты, имплантаты), оборудование пищевой, химической, нефтяной и газовой промышленности.

Оптические свойства покрытий улучшают характеристики световых и тепловых фильтров, архитектурного стекла в строительстве, стекла всех видов транспорта, медицинской и светозащитной оптики.

Триботехнические свойства покрытий повышают работоспособность деталей узлов трения, инструмента и инструментальной оснастки.

Декоративные качества улучшают тонкие износостойкие пленки различных цветов на стеклянной, керамической, фаянсовой и хрустальной посуде и др. изделиях из этих материалов. Широко применяется нанесение износостойких покрытий на элементы столовых приборов (ложки, ножи, вилки), на корпуса часов, на браслеты, бижутерию, фурнитуру и другие изделия из полируемой нержавеющей стали или других металлов, которые предварительно хромированы или никелированы.

Области применения генеративных способов формирования поверхности и приповерхностного слоя несомненно будут расширяться и покрытия будут играть важную роль как при изготовлении миниатюрных изделий, так и крупногабаритных.

## 6.15 Вопросы для самостоятельного контроля

1. Назовите основные группы методов получения покрытий и модификации поверхностного слоя.
2. Каково влияние энергии ионов на формирование поверхности изделий?
3. Каков спектр функциональных назначений покрытий
4. Сущность метода катодного (ионного) распыления
5. Сущность метода магнетронного распыления
6. Сущность метода ионно-термического нанесения покрытий
7. Как осуществляется синтез покрытий из плазмы электродугового разряда с горячим и холодным катодом?
8. Как осуществляется синтез многослойных покрытий в одновакuumном цикле?
9. Какие химические соединения составляют покрытия по методу КИБ?
10. Какие принципы реализуются в конструкциях электродуговых источников плазмы?
11. Какова роль температуры подложки в синтезе покрытий по методу КИБ?
12. Каков механизм образования покрытия?
13. Каковы особенности метода комплексной поверхностной ионно-плазменной обработки (КИПО)?
14. Представьте принципиальную схему износостойкого многослойного комплекса.
15. Какие методы применяются для контроля качества покрытий?
16. Каковы предпосылки повышения работоспособности режущего инструмента нанесением покрытий?
17. Приведите примеры повышения работоспособности режущего инструмента.
18. Каковы тенденции развития технологии синтеза покрытий?

## РАЗДЕЛ 7

### ИНТЕГРИРОВАННЫЕ ГЕНЕРАТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ НАНОУРОВНЯ

#### 7.1 Особенности реализации интегрированных генеративных технологий на нанометровом уровне

Разработка новых материалов, технологий их получения и изготовления изделий является одной из ключевых задач развития всех сфер жизнедеятельности человека, во многом определяет экономический и социальный уровень развития общества.

В предыдущих разделах рассмотрены способы реализации принципиально нового подхода в этом направлении – интегрированные генеративные технологии макро- и микроуровня. Следующим этапом, позволяющим достичь предельных характеристик современных технологий, является формирование объектов путем структурирования на наноуровне.

Практическое осуществление данного подхода стало возможным благодаря созданию и развитию нанотехнологий, позволяющих, в частности, создавать необходимые «конструкции» из наномасштабных элементов, располагаемых в требуемом порядке по принципу наращивания «снизу-вверх» («*bottom-up*»), рис. 7.1.

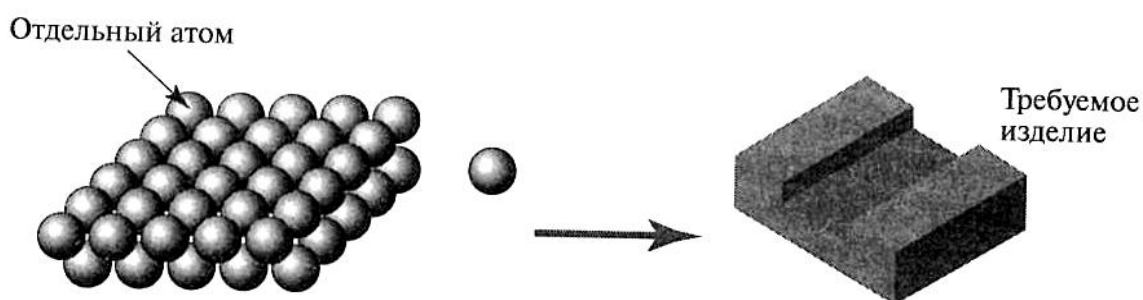


Рисунок 7.1 – Получение требуемого изделия путем сборки на атомарном уровне по принципу «снизу-вверх» («*bottom-up*»)

Нанотехнологии, реализующие генеративный принцип, являются продолжением и развитием микротехнологии – науки, изучающей микрообъекты и манипуляции с ними. *Нанотехнологии базируются на изучении нанообъектов с размерами, соизмеримыми с размерами*

*отдельных молекул и атомов независимо от их природы. Поэтому речь идет о междисциплинарном направлении науки и технологии, сочетающем различные разделы физики, химии, механики, биологии и т.д.*

Особенность *генеративных интегрированных технологий наноуровня* заключается в том, что рассматриваемые процессы и совершаемые действия происходят в нанометровом диапазоне пространственных размеров.

«Сырьем» при этом являются отдельные атомы, молекулы, системы атомов, молекул и их структурных объединений, а не привычные в традиционных технологиях микронные или макроскопические объемы материала, содержащие, по крайней мере, миллиарды атомов и молекул.

***Происходит переход от манипуляции веществом к манипуляции атомами.***

«Индивидуальный» подход, при котором внешнее управление достигает отдельных атомов и молекул, способствует реализации особых структурных состояний, сложных квантовомеханических эффектов, определяющих «аномальные» физические, механические, химические и другие свойства, отличные от свойств традиционных материалов.

Проблема создания и исследования структур с контролируемыми параметрами и заданными свойствами на наноуровне входит в число важнейших технологических проблем современности. Это связано с уникальными свойствами материалов в наноструктурном состоянии, близкими к фундаментальным ограничениям, возможностью создания «интеллектуальных» материалов с заранее заданными программируемыми свойствами, разработкой новых технологий обработки материалов и модификации их поверхности, с общей тенденцией к миниатюризации изделий. Решение данных задач, несомненно, приведет к революционным изменениям во многих областях – материаловедении, машиностроении, электронике, энергетике, химии, биологии, медицине и т. д.

Зарождение и развитие новой парадигмы всей производственной деятельности «снизу-вверх» – от отдельных атомов к изделию, а не «сверху-вниз» при традиционных технологиях, когда изделие получают отделением «лишнего» материала от массивной заготовки, охватывает все жизненно важные виды деятельности человека – от освоения космоса до

медицины, от национальной безопасности – до экологии и сельского хозяйства.

## 7.2 Основные термины и определения

Как и любая область знаний, нанонаука имеет свою специфическую систему терминов. Терминология нанонауки еще проходит стадию формирования.

Более того, в связи с бурным развитием нанотехнологий в настоящее время, открытием новых неожиданных явлений и перспектив применения многие, казалось бы, устоявшиеся на данный момент определения нельзя считать исчерпывающими. Перечень терминов с приставкой «нано-» постоянно дополняется и расширяется.

Во многих странах ведется разработка стандартов, касающихся нанотехнологий. Например, в Международной организации по стандартизации (*ISO*), объединяющей 157 национальных организаций, в 2005 г. был создан Технический комитет по разработке стандартов для нанотехнологий (*ISO/ TC 229*), в том числе в области терминологии.

Рассмотрим некоторые основные понятия.

**Наномасштаб** подразумевает порядок размеров между 1 и 100 нанометрами ( $1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$ ).

**Нанотехнология** – это *междисциплинарная* область науки, в которой изучаются закономерности физико-химических процессов в пространственных областях нанометровых размеров с целью управления отдельными атомами, молекулами, молекулярными системами при создании новых молекул, наноструктур, наноустройств и материалов со специальными физическими, химическими и биологическими свойствами.

**Нанотехнология** – это также совокупность методов и приемов, обеспечивающих возможность контролируемым образом создавать и модифицировать объекты, включающие компоненты с размерами менее 100 нм, имеющие принципиально новые свойства и позволяющие осуществлять их интеграцию в полноценно функционирующие системы большего масштаба.

**Наноматериалы** – это материалы, содержащие структурные элементы, геометрические размеры которых хотя бы в одном направлении

не превышают 100 нм (от 1 до 100 нм), обладающие качественно иными по сравнению с традиционными материалами физическими, химическими, механическими и биологическими свойствами, функциональными и эксплуатационными характеристиками.

Верхняя граница диапазона обусловлена тем, что существенные изменения свойств материалов начинаются при размерах структурных элементов менее 100 нм. Нижняя граница диапазона обусловлена критическим размером нанокристаллического материала как структурного элемента, имеющего упорядоченное строение, т. е. кристаллическую решетку (например, для железа этот предел составляет 0,5 нм).

Термин «наноматериалы» является объединяющим и включает в себя большую группу различных материалов – нанокристаллических, нанофазных, нанокомпозитных, нанопористых, а также нанокластеры, наночастицы, нанопорошки, нанотрубки, нанопокрyтия и т. д.

**Нанокристаллические (наноструктурные, наноструктурированные, нанофазные) материалы** – материалы, у которых размер отдельных кристаллитов или фаз, составляющих структурную основу, не превышает 100 нм хотя бы в одном измерении.

**Объемные (массивные, компактные) наноматериалы** – наноматериалы с размерами изделий из них в макродиапазоне (более нескольких миллиметров), состоящие из большого числа наноразмерных элементов (кристаллитов), т. е. поликристаллические материалы с размером зерна 1...100 нм.

**Консолидированные наноматериалы** – компактные наноматериалы, пленки и покрытия из металлов, сплавов и соединений, получаемые методами порошковой технологии, интенсивной пластической деформации, контролируемой кристаллизации из аморфного состояния и разнообразными приемами нанесения пленок и покрытий.

**Нанокластеры (атомные кластеры, от англ. cluster – пучок, рой, скопление)** – низкоразмерные структуры, состоящие из небольшого числа атомов, размером до 10 нм.

**Наночастицы (атомные частицы)** – промежуточные образования из атомов (молекул) между нанокластерами и макроскопическими твердыми телами, имеющие характеристические размеры менее 100 нм.

**Квантовые точки, проволоки, ямы** – искусственно созданные кластерные наноструктуры с размерным квантованием движения носителей заряда в трех, двух и одном направлениях соответственно, рис. 1 Приложения А1.

**Фуллерены** – стабильные замкнутые сферические и сфероидальные многоатомные молекулы, поверхность которых образована правильными многогранниками из атомов углерода (или другого элемента).

**Нанопорошки (ультрадисперсные порошки)** – порошки с размером частиц менее 100 нм.

**Нанотрубки** – нитевидные наночастицы из атомов углерода или других элементов диаметром не более 100 нм, содержащие протяженную внутреннюю полость.

**Нановолокна** – нитевидные частицы диаметром не более 100 нм, не имеющие внутренней полости.

**Наноструктурные покрытия** – покрытия нанометровой толщины (нанослойные покрытия); покрытия с нанометровым размером кристаллитов (нанокристаллические покрытия).

**Нанокompозиты** – композиционные материалы с металлической, полимерной, керамической матрицей и наполнителем в виде наночастиц, нановолокон, нанослоев, а также композиционные материалы со сложным использованием нанокомпонентов.

**Нанонаука** – система знаний, основанная на описании, объяснении и прогнозировании свойств материальных объектов с нанометровыми характеристическими размерами или систем более высокого метрического уровня, упорядоченных или самоупорядоченных на основе наноразмерных элементов.

**Нанопроизводство** – производство или подготовка наноструктур.

**Наноиндустрия** – интегрированный комплекс производственных, научных, образовательных и финансовых организаций различных форм собственности, осуществляющих целенаправленную деятельность по созданию интеллектуальной и промышленной конкурентоспособной промышленной продукции, относящейся к сфере нанотехнологий.

**Нанообъект** – физический объект исследований (и разработок), размеры которого принято измерять в нанометрах.

**Наносистема** – материальный объект в виде упорядоченных или самоупорядоченных, связанных между собой элементов с нанометровыми размерами, кооперация которых обеспечивает возникновение у объекта качественно новых свойств, связанных с проявлением наномасштабных факторов.

**Наносистемная техника** – созданные полностью или частично на основе наноматериалов и нанотехнологий функционально законченные системы и устройства, характеристики которых кардинальным образом отличаются от показателей систем и устройств аналогичного назначения, созданных по традиционным технологиям.

**Нанотехника** – машины, механизмы, приборы, устройства, материалы, созданные с использованием новых свойств и функциональных возможностей систем при переходе к наномасштабам и обладающие ранее недостижимыми массогабаритными и энергетическими показателями, технико-экономическими параметрами и функциональными возможностями.

**Нанодиагностика** – совокупность методов исследования структурных, физико-химических, механических, биологических и других характеристик наноматериалов и наносистем, измерение метрических параметров с наноточностью.

**Нанометрология** – наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности в нанометровом диапазоне.

*Объединяющим началом всех указанных понятий и терминов является то, что приставка «нано-» есть особое обобщенное отражение объектов исследования, прогнозируемых явлений, эффектов и способов их описания, связанных с характерной протяженностью базового структурного элемента.*

На рис. 7.2 представлена схема, отражающая фундаментальные основы нанонауки, составляющие ее направления, контуры технологического пространства и областей применения наноматериалов, нанотехники, нанотехнологий.



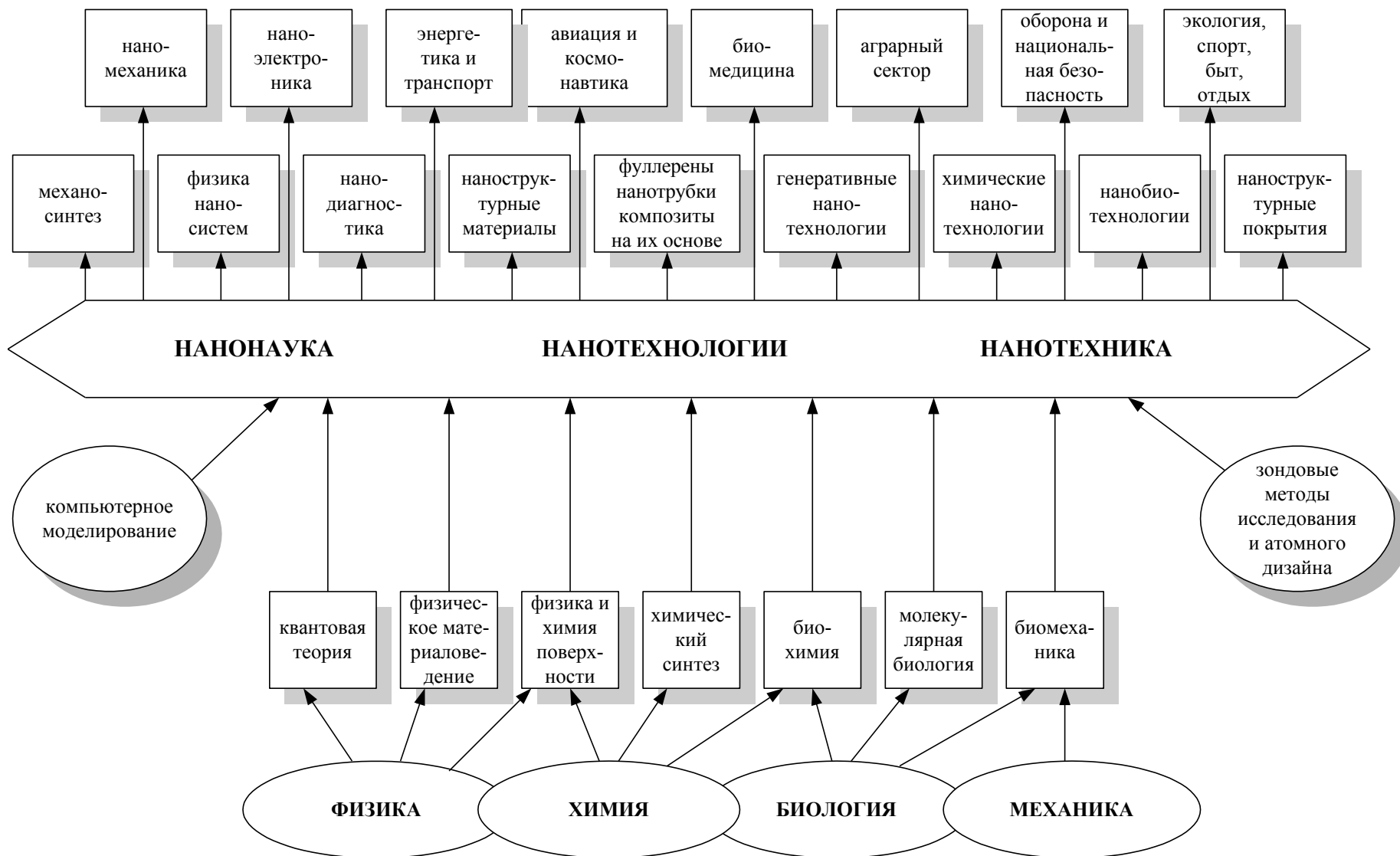


Рисунок 7.2 – Фундаментальные основы и области применения нанонауки, нанотехнологий и нанотехники

## 7.3 Генеративные методы получения наноматериалов

### 7.3.1 Элементарные объекты интегрированных генеративных нанотехнологий

*Элементарными объектами нанотехнологии (наномасштабными, наноразмерными элементами), позволяющими искусственно конструировать функциональные материалы с заранее заданными структурой и свойствами, т. е. реализовать наноуровневый этап интегрированных генеративных технологий, см. п. 7.1, являются атомы, молекулы, атомные кластеры и частицы, нанопорошки, нанослойные покрытия, нанотрубки и фуллерены, квантовые ямы, проволоки, точки, см. п. 7.2.*

*Использование указанных прецизионных элементарных объектов позволяет с помощью определенных механизмов с высочайшей точностью создавать последовательным наращиванием изделия для применения в различных областях, что составляет суть генеративных методов нанотехнологического производства.*

Основными механизмами данного производства являются следующие:

- ◆ создание объемных объектов атомной сборкой, наращиванием «атом за атомом»;
- ◆ контролируемое образование атомных кластеров и их дальнейшее использование в качестве новых материалов либо структурных элементов для более сложных материалов и устройств;
- ◆ выращивание плоских молекулярных монослоев с атомарной точностью и осаждение монослоя за монослоем с целью создания однородных по площади нанослоев, в т. ч. сложных гетероструктур;
- ◆ создание полупроводниковых структур на основе квантовых точек, проволок, ям для нужд микро- и оптоэлектроники;
- ◆ формирование функциональных нанокристаллических покрытий;
- ◆ использование в качестве элементарного объекта нанотрубок и фуллеренов для формирования нанослойных покрытий, объемных наноматериалов, в том числе композиционных;
- ◆ формирование объемных наноструктурных материалов на основе нанопорошков.

Рассмотрим далее некоторые генеративные методы создания наноструктур, основанные на использовании различных элементарных объектов нанотехнологий.

### 7.3.2 Атомно-молекулярная сборка (механосинтез) с помощью сканирующей зондовой микроскопии

Для перехода от микро- к нанотехнологиям производства материалов и изделиям на их основе (т. е. создания макроскопических продуктов на основе генеративной сборки на уровне атомов и молекул), рис. 7.3, а, недостаточно только уменьшения размеров элементов, необходимо достижение прецизионности в изготовлении, т. е. создание методик манипуляции элементарными объектами нанотехнологий с целью получения изделий с наперед заданными функциональными свойствами.

Уникальное решение проблемы манипулирования индивидуальными атомами и молекулами для производства наращиванием продуктов с заданной атомарной структурой предложил Э. Дрекслер (1986 г.), см. п. 7.6.

Согласно его идее, для осуществления атомно-молекулярной сборки необходим робот-сборщик (ассемблер, от англ. *assemble* — собирать).

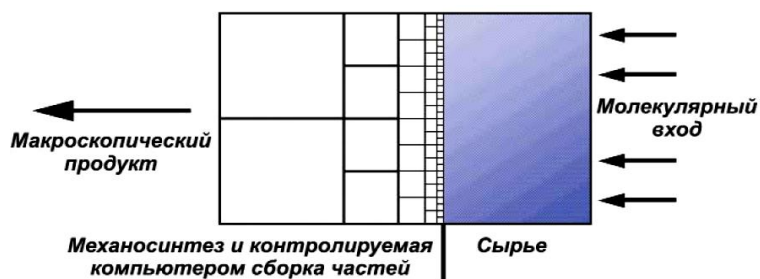
Ассемблер – это молекулярная машина, которая может быть запрограммирована строить практически любую молекулярную структуру или устройство из более простых химических строительных блоков, т. е. поатомной сборкой, рис. 7.3, б-г.

Главная задача ассемблера – соединение атомов и молекул в определенном порядке. Он должен уметь строить наносистемы любого назначения – двигатели, станки, вычислительные устройства, средства связи и т. д., вплоть до самокопирования.

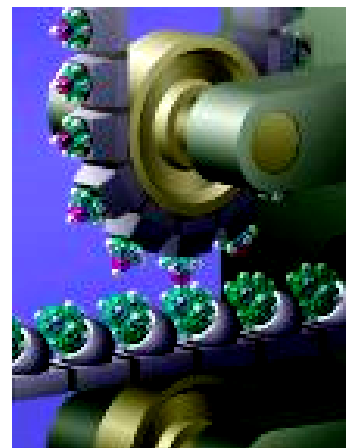
Ассемблер включает в себя нанокomпьютер, комплекс наноманипуляторов и наносенсоров.

Однако, несмотря на гениальную идею, сегодня промышленных наномашин-ассемблеров, способных создавать реальные функциональные материалы, не существует.

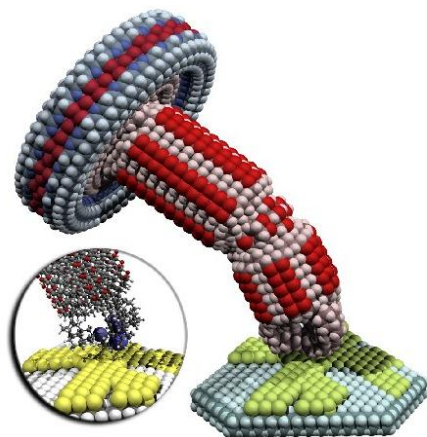
Одной из причин невозможности реализации этой идеи является наличие интерфейса «человек-компьютер-манипулятор», поэтому сама процедура сборки не может быть автоматизирована на наноуровне. Возможно, в будущем будет получена система «нанокomпьютер-наноманипулятор», и процесс сборки может быть осуществлен без участия человека (эксперты прогнозируют это во второй половине XXI в.).



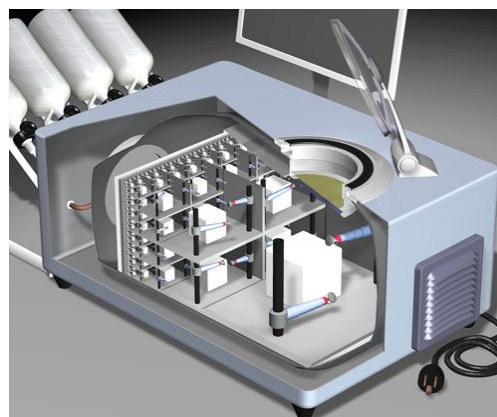
а



б



в



г

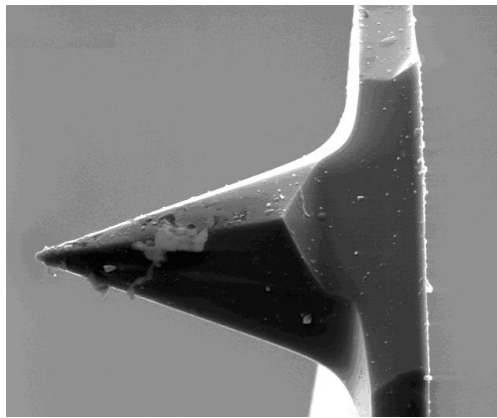
Рисунок 7.3 – Атомно-молекулярная сборка изделий с помощью ассемблера:

- а – схема процесса генеративной сборки продукции на наноуровне;
- б – предполагаемая производственная линия наносборки;
- в – наноманипулятор;
- г – возможный вид нанофабрики

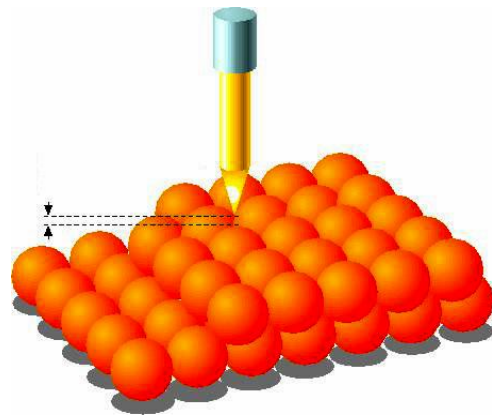
В настоящее время процесс конструирования наращиванием структур за счет манипуляции отдельными атомами возможен при помощи **сканирующих зондовых микроскопов (СЗМ)** – основного инструмента исследования наноразмерных структур, рис.7.4.

Общим у методов зондовой сканирующей микроскопии является наличие зонда, рис. 7.4, а – чаще всего, заостренной иглы с радиусом при вершине  $\sim 10$  нм и сканирующего механизма (3D-пьезосканера), способного перемещать зонд над поверхностью образца в трех измерениях

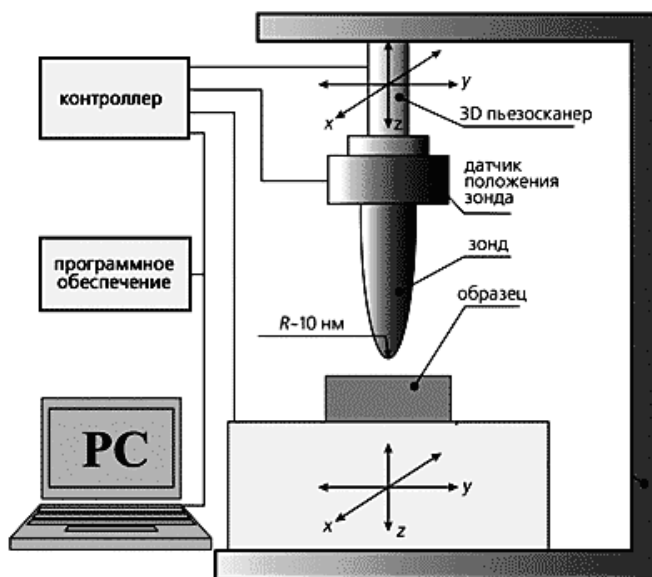
с высокой точностью – по оси  $z$  до тысячных долей нанометра, в плоскости образца – на уровне сотых долей нанометра, рис. 7.4, в.



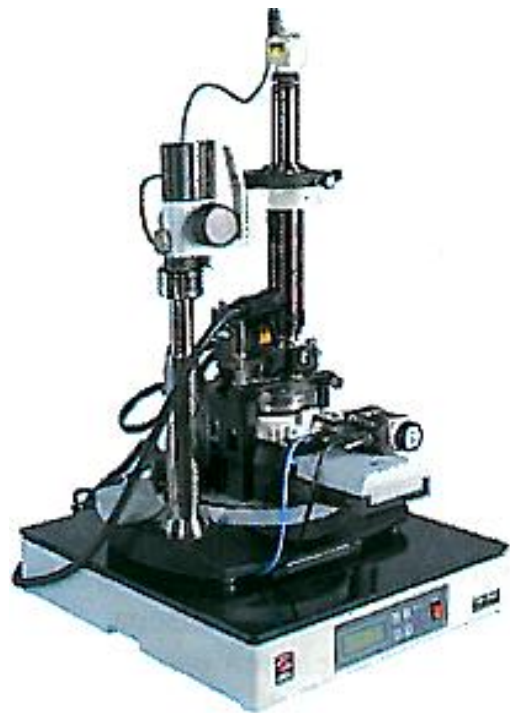
*а*



*б*



*в*



*г*

Рисунок 7.4 – Атомно-молекулярное конструирование структур наращиванием с помощью сканирующих зондовых микроскопов:

- а* – электронная микрофотография зонда СЗМ; *б* – расположение иглы сканирующего туннельного микроскопа над слоями атомов исследуемой поверхности; *в* – типовая схема зондовых сканирующих микроскопов; *г* – общий вид атомно-силового микроскопа

В основе работы зондовых микроскопов лежат различные виды взаимодействия зонда с поверхностью.

Так, принцип действия *туннельного микроскопа* основан на явлении протекания между металлической иглой и образцом туннельного тока, величина которого изменяется в зависимости от состояния изучаемой поверхности, например, наличия впадин и выступов; в *атомном силовом микроскопе* используются силы межатомного (межмолекулярного) взаимодействия между поверхностью и диэлектрической иглой; в *магнитно-силовом микроскопе* зонд, сканирующий поверхность, является магнитным и позволяет чувствовать локальную магнитную структуру (подобно считывающей головке винчестера или магнитофона).

В работе всех сканирующих зондовых микроскопов используется принцип ближнего поля, который реализуется при размещении зонда малого размера на столь же малом расстоянии от образца ( $\sim 0,1 \dots 10$  нм). Если размер острия зонда соответствует диаметру атома и расстояние до исследуемой поверхности таких же малых размеров, то и разрешение прибора оказывается равным одному атому.

Важным достоинством данных микроскопов является то, что с их помощью возможно не только получение трехмерной картины объекта на атомарном уровне без разрушений и почти без искажений, исследование топографии поверхности, состава, магнитных и электрических свойств, твердости наноструктурированных объектов. СЗМ позволяют также перемещать и комбинировать отдельные атомы, а значит, *осуществлять модификацию поверхности в нанометровых областях, реализовать сверхточную «сборку», т. е. являются вполне реальными инструментами для создания наращиванием наноструктур из отдельных атомов.*

Изготовление наноструктур и наноприборов с помощью СЗМ называют *механическим синтезом (механосинтезом)*.

В данном случае нанообъектами – отдельными атомами или молекулами – можно манипулировать с помощью зонда, который обеспечивает захват атомов и перенос их в новую позицию, т.е. реализует атомарную сборку. Таким образом, СЗМ позволяют конструировать требуемые наноструктуры поатомно, шаг за шагом, прибавляя необходимые атомы, «выращивая» объект. Данная методика получила название атомного переключения («*atomic switch*»).

Вначале необходимые атомы осаждают на подложку, например, из газовой фазы, а затем с помощью игольчатого электрода производится атомная сборка наращиванием по заранее намеченной программе.

Кстати, надпись «IBM» из отдельных атомов ксенона на поверхности монокристалла никеля, занявшая 22 часа, ставшая своеобразным рекордом в методах миниатюризации записи «текста» и первой практической демонстрацией возможности атомной сборки материала в 1989 г. (см. п. 7.6; рис. 2 Приложения А1), была выполнена именно данным методом.

Рассмотрим процесс механосинтеза с помощью сканирующего туннельного микроскопа (СТМ) подробнее.

Допустим, что на поверхности материала имеется адсорбированный атом (под адсорбцией понимают поглощение вещества из газовой или жидкой среды поверхностным слоем твердого тела или жидкости), удерживаемый в определенной позиции теми или иными связями, например, электростатическими, Ван-дер-Ваальсовыми, с атомами подложки, рис. 7.5.

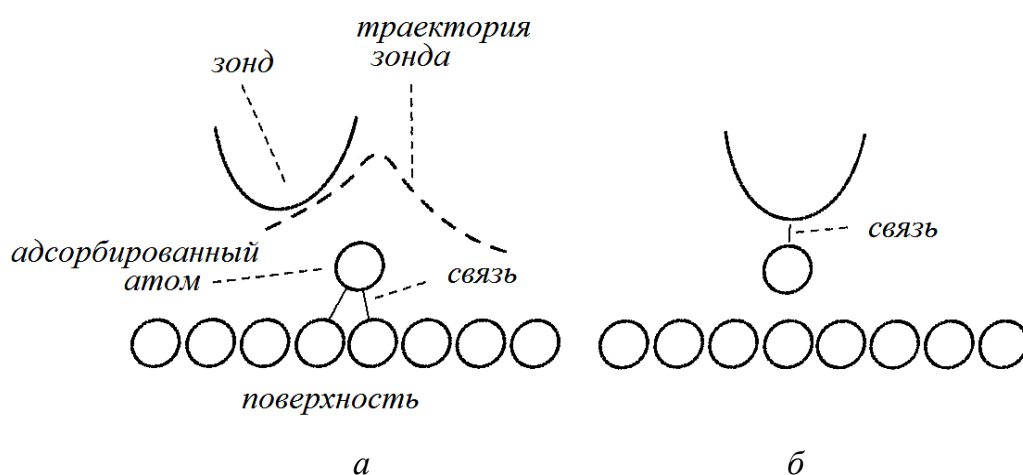


Рисунок 7.5 – Иллюстрация траектории острия зонда СТМ над адсорбированным на поверхности материала атомом:

*а* – режим изображения; *б* - режим манипуляции

Когда в процессе сканирования зонд подходит к этому атому, его траектория искажается, см. рис. 7.5, *а*, что и служит источником информации о рельефе поверхности. На определенном расстоянии между острием и адсорбированным атомом силы взаимодействия между ними начинают превышать силы, связывающие атом с поверхностью, так что острие тянет атом за собой, см. рис. 7.5, *б*.

Захваченный атом можно оставить в любой точке поверхности путем увеличения расстояния между острием и подложкой.

Процессы захвата и сброса атома с зонда можно сделать более надежными путем изменения приложенного к нему напряжения.

Адсорбированные на поверхности материала атомы можно таким способом перегруппировать и поатомно строить на поверхности различные наноструктуры.

Сегодня с помощью основных инструментов нанотехнологий – СЗМ достигнуты существенные успехи по атомарной сборке путем захвата отдельных атомов и переноса их в заданную позицию, т. е. путем формирования поверхности с заданными структурой и свойствами.

Некоторые примеры формирования поверхностного слоя с помощью СЗМ (примеры «атомного дизайна») приведены на рис. 2 Приложения А1.

*Использование сканирующей зондовой микроскопии для локального переноса атомов является, по-видимому, единственным путем получения предельной микроминиатюризации при создании наноустройств.*

Сборка поверхности с помощью сканирующего зонда путем перемещения отдельных атомов или молекул при последовательном наращивании объекта весьма «элегантна» и демонстративна, применима в научных исследованиях, однако слишком дорога и длительна при промышленном применении для построения массивного материала по атому. Поэтому СЗМ-манипуляции не могут пока считаться технологией, пригодной для крупномасштабного производства наноструктур.

Даже при сборке с нереально высокими скоростями  $\sim 10^6$  ат/с потребуется  $\sim 10^{17}$  с для построения горсти полезного материала.

Эти работы находятся в самой начальной стадии развития, и потребуется еще много усилий для доведения методов механосинтеза до уровня промышленного производства.

### 7.3.3 Самосборка

В настоящее время идет интенсивный поиск новых принципов, технологий и методик, позволяющих создавать трехмерно упорядоченные структуры из нанообъектов на промышленном уровне.

*Достаточно перспективными и реальными для практического применения являются технологии создания нанообъектов по принципу наращивания «снизу-вверх», основанные на явлении самосборки и принципе самоорганизации.*

Под **самосборкой** понимают способность атомов и молекул при определенных условиях самопроизвольно соединяться в наперед заданные молекулярные образования.

*Принцип самоорганизации предполагает коллективное взаимодействие атомов с созданием сложных упорядоченных структур*



*на более высоком иерархическом уровне организации, чем тот, который наблюдался в исходной системе.*

*Самосборка, основанная на принципе самоорганизации, является идеальным вариантом создания материалов на атомно-молекулярном уровне, в том числе формирования поверхности с заданными свойствами.*

Процесс самосборки структур на наноуровне основан на стремлении физической системы к термодинамическому равновесию, т. е. движущей силой процесса в данном случае является минимизация свободной энергии в системе наночастиц. Минимум энергии достигается при формировании объектов, подобных кристаллам, с той разницей, что роль атомов или молекулярных групп в таких образованиях играют наночастицы. Безусловно, отмеченная «самопроизвольность» инициируется технологом за счет определенного воздействия на систему.

В отличие от поэтапных методов организации системы при поатомной сборке, которые рассматривались в п. 7.3.2, в данном случае воздействие направлено не на конкретную частицу (атом), а на все сразу. Требуемую структуру не нужно выстраивать «вручную», помещая нанообъекты в требуемые точки пространства один за другим; создаваемые условия таковы, что нанообъекты делают это сами и одновременно.

Самосборка достаточно широко распространена в природе (рост кораллов, ракушек, зубной эмали, формирование снежинок, опалов...). Структура всех тканей определяется их самосборкой из клеток, структура самих клеток определяется самосборкой из отдельных молекул и т. д.

Механизм самосборки наносистем в природе подтолкнул исследователей к попытке скопировать его принципы для построения искусственных наноструктур.

Интерес к процессам самосборки и самоорганизации частиц обусловлен, прежде всего, тем, что если сами по себе наночастицы представляют главным образом академический интерес, то их ансамбли – это потенциальные рабочие элементы определенных устройств. При этом открывается возможность создания принципиально нового поколения наноустройств, многоуровневая архитектура которых базируется именно на присущем наночастицам свойстве самопроизвольно объединяться в упорядоченные ансамбли.

*Строительными элементами при самосборке являются уже не отдельные атомы («нанокирпичики»), см. п. 7.3.2, а компоновочные элементарные блоки – наноблоки (нанокластеры, наночастицы, см. п. 7.2), состоящие из группы связанных атомов или молекул с размерами до 100 нм.*

Это весьма важный момент, т.к. построение вещества на уровне атомной сборки, как уже указывалось, весьма неэффективно и требует достаточно длительного времени.

При этом главной целью самосборки является создание из наноразмерных элементов *макро- и мезоскопических структур*.

Предполагается, что именно наносборка станет предпочтительным методом создания больших наноструктурных массивов, таких, как компьютерные запоминающие устройства и логические схемы.

При самосборке наноконструктор вводит определенные наноблоки на поверхность или на ранее собранную наноструктуру. Затем молекулы выравнивают себя в определенных положениях, иногда формируя слабые связи, например, водородные или Ван-дер-Ваальсовы, а иногда – сильные ковалентные связи, минимизируя общую энергию.

В зависимости от характера взаимодействия между частицами (электростатические, капиллярные, Ван-дер-Ваальсовы силы, биоспецифическое распознавание) и поставленной цели используют разные методы конструирования упорядоченных структур из наночастиц. При этом создают как двухмерные, так и трехмерные ансамбли частиц, пористые структуры, агрегаты частиц специфической формы, композиционные материалы.

Подобно атомам в кристаллах, наночастицы (кластеры, «суператомы») также способны спонтанно собираться в упорядоченные агрегаты и формировать *упорядоченные массивы наночастиц*.

Чем однороднее исходные наночастицы, тем “правильнее” их упаковка в массиве. Теория и эксперимент в этой области показывают, что структурно-упорядоченные материалы обладают характеристиками существенно более высокими, чем аналогичные композиции с хаотичным расположением частиц. Кроме того, структурный порядок наночастиц в ряде случаев инициирует появление качественно новых свойств материала.

Именно на основе *упорядоченных наноструктур* возможно создание оптоэлектронных устройств, фотонных материалов, биосенсоров, носителей памяти нового поколения, ферромагнитных материалов и т. д.

Тип организации наночастиц и структура образующегося массива зависят от условий синтеза, диаметра частиц, природы внешнего воздействия на структуру.

Явления образования упорядоченных структур и самоорганизации происходят обычно как отклик сложной системы на сильное внешнее воздействие. Для создания особых условий, при которых в конкретной

системе происходит самосборка, могут быть использованы гравитационное, электрическое или магнитное поле, капиллярные силы, игра на смачиваемости-несмачиваемости компонентов системы и другие приемы.

Создавать «самоорганизующиеся» структуры можно не только с использованием однородных, но и разнородных наночастиц с определенным соотношением их размеров. Синтезированы двух- и трехмерные организованные массивы нанокристаллов Pt, Pd, Ag, Au, Fe, Co, сложные организованные структуры, подобные атомным решеткам кристаллических соединений, рис. 7.6.

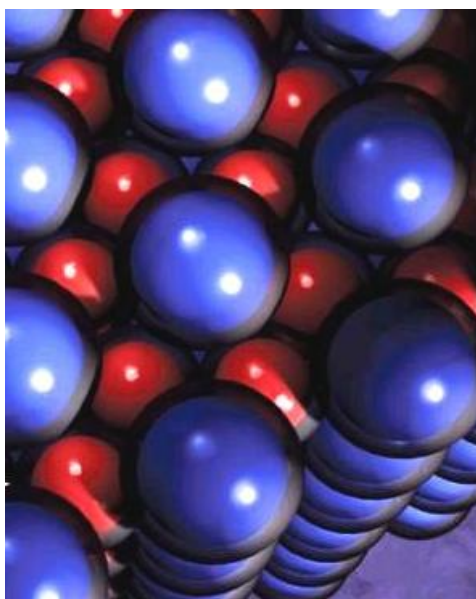


Рисунок 7.6 – Трехмерная наноструктура, сформированная в результате самосборки кластеров разного состава

Использование «модульной самосборки» разных по природе наночастиц [является основой новой технологии создания композитов из самых разных веществ и материалов.](#)

Программное управление модульной самосборкой позволяет получать изделия заданной формы, что, безусловно, является весьма перспективным для практического применения с целью изготовления сложных по форме изделий, в том числе деталей машин и приборов.

*Самосборка представляет собой основу принципиально новой перспективной технологии будущего – молекулярной электроники – направления, целью которого является создание электронных устройств, компьютеров, дисплеев на основе отдельных молекул, см. далее п. 7.5.5.*

Самособирающиеся структуры можно использовать также для формирования поверхностных слоев и материалов с требуемыми функциональными свойствами, например, с высокой коррозионной стойкостью, с высокими гидрофильными (хорошей смачиваемостью) или гидрофобными (плохой смачиваемостью) свойствами; с высокой износостойкостью, твердостью, с требуемыми электрическими и магнитными свойствами, с высокими каталитическими свойствами и т. д.

Немаловажным является возможность применения структур, полученных самосборкой, в биологии и медицине.

Некоторые примеры «самособранных» структур, имеющих прикладной характер, приведены на рис. 3 Приложения А1.

*Как уже указывалось, самосборка – это, пожалуй, самая важная из всех технологий нанопроизводства из-за ее универсальности, способности создавать структуры на различных масштабах длины и относительно низкой стоимости. Важно то, что получаемые самосборкой структуры имеют не только научный интерес, но и предполагают широкое практическое применение в различных областях.*

*Исследование и применение феномена самосборки признано ключевым направлением развития нанотехнологий и магистральным направлением технологического развития в целом.*

#### **7.3.4 Атомные кластеры как элементарный объект нанотехнологий**

Целенаправленное формирование нового класса атомарно сконструированных макроструктур с высокой степенью упорядочения на основе явлений самосборки и самоорганизации, рассмотренных в п. 7.3.3, предполагает использование в качестве элементарного объекта *наночастиц или нанокластеров*, которые являются уникальными образованиями и с научной, и с прикладной точки зрения.

*Нанокластеры*, см. п. 7.2, могут рассматриваться как самостоятельные единицы, обладающие определенными свойствами.

Являясь наиболее типичным представителем наноматериалов, атомные кластеры проявляют истинно наноразмерные эффекты, в том числе квантовомеханической природы, и свойства, не присущие тому же материалу в объеме. Например, кластеры, состоящие из немагнитных атомов, могут проявлять магнетизм; кластеры металлов обладают аномально высокой реакционной способностью, имеют обычно правильную форму – октаэдров, кубооктаэдров, икосаэдров и т. д.

Физико-химические свойства кластеров (цвет, реакционная способность, стабильность, магнитные свойства) в значительной мере зависят от количества атомов  $N$ , составляющих кластер, которое может рассматриваться в качестве критического параметра, соответствующего проявлению «наномасштабности».

Наличие определенной периодичности в зависимости характеристик кластеров от числа образующих их атомов является основанием для попыток создания электронной и геометрической таблицы кластеров по аналогии с периодической системой элементов Д.И. Менделеева.

Существует достаточно большая группа различных методов получения изолированных атомных кластеров – *физических*, основанных на испарении атомов с поверхности материала при облучении лазерным лучом или пучком заряженных частиц (электронов, ионов) с большой кинетической энергией; *химических*, основанных на восстановлении, разложении соединений, в том числе в жидких средах.

Например, для получения металлических кластеров возможно применение метода лазерного испарения в потоке инертного газа, рис. 7.7, а.

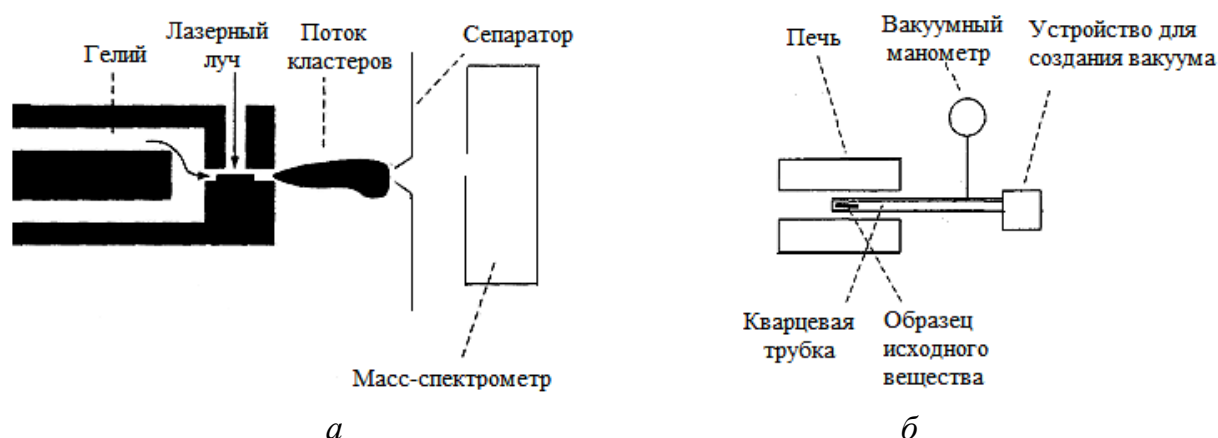


Рисунок 7.7 – Схемы установок для получения металлических атомных кластеров:

- а – получение кластеров лазерным испарением (физический метод);
- б – получение кластеров термолизом (химический метод)

Лазерный луч высокой интенсивности падает на металлический стержень, см. рис. 7.7, а, вызывая испарение атомов с поверхности металла, которые затем уносятся потоком несущего газа (например, гелия) через сопло. Расширение потока приводит к его охлаждению, конденсации и образованию кластеров металла, которые далее через сепаратор направляются в

специальный прибор – масс-спектрометр, позволяющий определить их распределение по массам, то есть по числу частиц в кластере.

Методы химической группы являются наиболее перспективными в плане крупномасштабного производства атомных кластеров.

На рис. 7.7, б представлен процесс термолиза, т. е. разложения при высокой температуре твердых веществ, содержащих катионы металлов, молекулярные анионы или металлоорганические соединения.

Исходное вещество (например, нитрид лития  $\text{LiN}_3$ ) помещается в кварцевую трубку, в которой создан вакуум, см. рис. 7.7, б, и нагревается до температуры  $\sim 400$  °С. При температуре около 370 °С нитрид разлагается с выделением газообразного азота  $\text{N}_2$ , что можно определить по увеличению давления в вакуумированном пространстве с помощью манометра. Падение давления до первоначального уровня означает, что весь азот удален. Оставшиеся атомы лития объединяются в кластеры, минимальный размер которых составляет  $\sim 5$  нм.

При формировании нанокластеров чаще всего встречаются образования, состоящие из определенного числа атомов. Это означает, что подобные структуры наиболее устойчивы, стабильны. Данные числа называют «магическими», рис. 7.8.

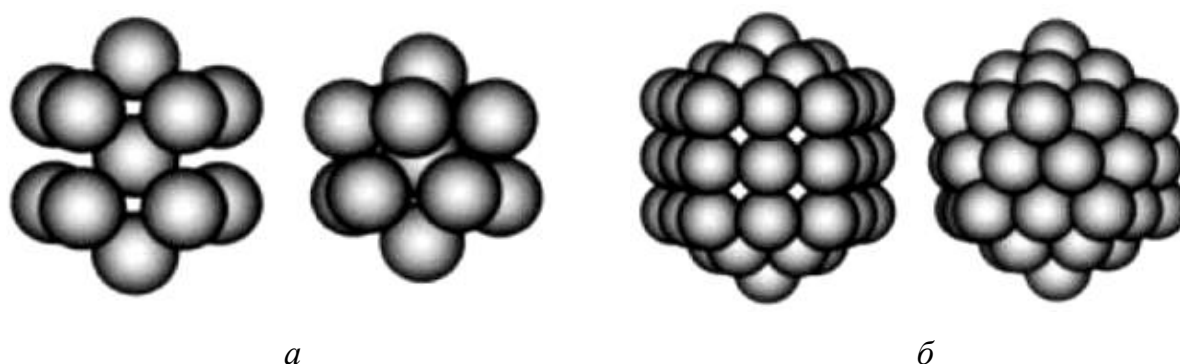


Рисунок 7.8 – Атомные кластеры с числом атомов («магическими» числами)

13 (а) и 55 (б)

Размерами кластеров можно управлять при их синтезе, например, за счет изменения температуры или времени роста.

Изолированные кластеры представляют интерес, прежде всего, как элементы микроэлектронных приборов.

Другой, достаточно важный аспект изучения данных атомных образований связан с тем, что они имеют огромный потенциал использования на практике, являясь *универсальной элементарной основой*

для целого класса атомарно сконструированных наращиванием материалов с широким спектром свойств.

Синтезировать наноматериалы из кластеров возможно либо за счет самоорганизации и самосборки, см. п. 7.3.3, например, кристаллизации на наноуровне, либо принудительным путем, в частности, компактированием с применением высокого давления.

Особый прикладной интерес вызывает перспектива формирования наращиванием следующих типов наноструктур на основе кластеров: упорядоченных «самособранных» моно- и мультислоев, осажденных на подложках из широкого класса веществ; «самоорганизованных» наноструктур из кластеров (наночастиц), сформированных в коллоидных растворах; полимер-неорганических (гибридных) нанокомпозитов и т. д.

В указанных структурах кластеры проявляют новые, отличные от индивидуальных образований, «коллективные» свойства и эффекты.

### **7.3.5 Наноориентированные технологии конструирования поверхности**

Разработка технологий конструирования (инженерии) поверхности применительно к созданию функциональных покрытий в настоящее время является одной из наиболее важных задач науки о материалах.

Методы, связанные с созданием (путем наращивания на поверхности объектов) модифицированных слоев, достаточно изучены и широко применяются на практике, см. п. 6. Усовершенствованные варианты данных технологий могут рассматриваться как методы нанотехнологии, так как позволяют создавать наноструктурные покрытия на поверхности материалов, а также наноматериалы в виде нано- и микроизделий.

**Наноструктурные покрытия** классифицируют по размерности структурных элементов следующим образом, см. п. 7.2:

◆ *нанослойные (нанослоистые) покрытия* – покрытия наноразмерной толщины, т.е. имеющие нанометровый размер в одном направлении;

◆ *нанокристаллические покрытия* – покрытия с нанометровым размером кристаллитов. Композиционные нанокристаллические покрытия состоят из нанозерен различных фаз.

В отдельную группу могут быть выделены *многослойные наноструктурные покрытия* – мультислои микронной толщины, представляющие собой материалы типа «сэндвич», характеризующиеся

наличием градиента химического состава и свойств по толщине покрытия, сформированные как чередованием нанослоев различных материалов, так и последовательным наращиванием покрытий разного состава с нанокристаллической структурой.

### 7.3.5.1 Нанослойные покрытия

Для создания **нанослойных покрытий** используют различные методы, основанные на формировании структуры посредством выстраивания атом за атомом («*atom by atom processing*»).

Формирование нанослойных покрытий основано на нанотехнологическом подходе генеративного формообразования.

В качестве технологий создания поверхностных наноструктур широко применяют, например, пленочные технологии, позволяющие выращивать плоские молекулярные *монослои* (пленки толщиной в одну молекулу) с высочайшей, атомарной точностью на монокристаллических подложках.

Более того, осаждая монослой за монослоем, можно создавать однородные по площади нанослои, сложные гетероструктуры (выращенные на подложке слоистые структуры с толщиной каждого слоя в несколько нанометров и точностью до долей атомного монослоя), а также квантоворазмерные структуры – квантовые ямы, проволоки, точки, см. п. 7.2.

Один из современных и перспективных методов создания монослоев – **молекулярно-лучевая эпитаксия – МЛЭ** (*Molecular Beam Epitaxy – MBE*), представляющая собой усовершенствование способа осаждения металлических пленок в вакууме.

Под эпитаксией понимают ориентированный рост одного монокристалла на поверхности другого (подложки), т. е. наследование растущим кристаллом структуры подложки. При этом физико-химические свойства наращиваемого эпитаксиального слоя существенно отличаются от свойств подложки.

Метод МЛЭ основан на испарении и конденсации вещества из молекулярных или атомных пучков в сверхвысоком вакууме ( $\sim 10^9 \dots 10^7$  Па).

Упрощенная схема установки для проведения молекулярно-лучевой эпитаксии представлена на рис. 7.9.

Для осаждения эпитаксиальных слоев используется управляемое испарение элементов (с помощью резистивного нагрева, т. е. нагрева джоулевым теплом, или испарения электронным лучом) из одного или



нескольких источников – ячеек основных компонентов пленки 4 и легирующих примесей 5.

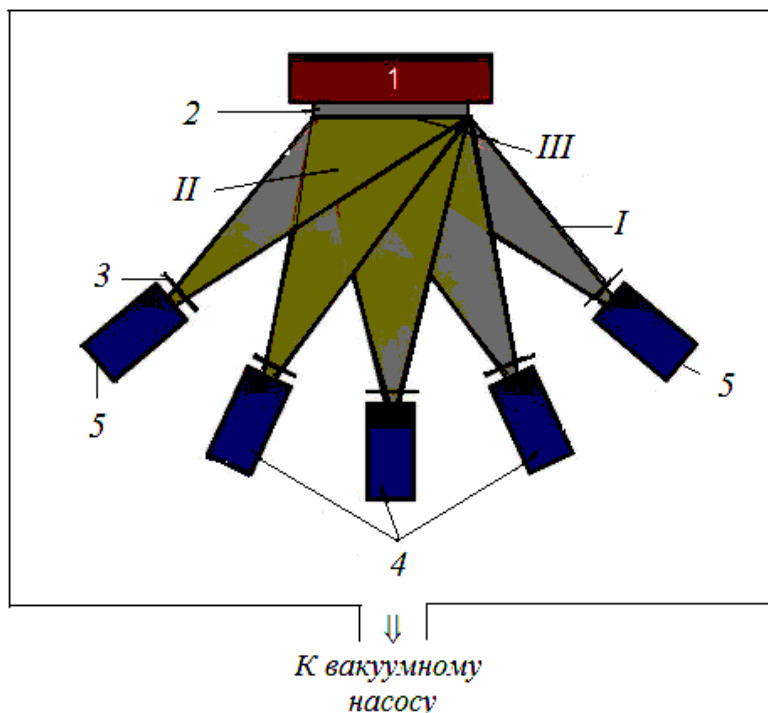


Рисунок 7.9 – Схема установки молекулярно-лучевой эпитаксии:

- I* – зона генерации молекулярных пучков; *II* – зона смешивания испаряемых элементов; *III* – зона кристаллизации на подложке;
- 1* – блок нагрева; *2* – подложка; *3* – заслонка отдельной ячейки;
- 4* – ячейки основных компонентов пленки;
- 5* – ячейки легирующих примесей

Поверхность подложки 2 (полупроводниковой, диэлектрической) обрабатывается несколькими молекулярными пучками одновременно; эпитаксия осуществляется на подложке в результате реакции между молекулярными пучками различной интенсивности и состава.

Управление составом основного материала и легирующих примесей осуществляется с помощью заслонок 3, перекрывающих тот или иной поток.

Температура подложки в процессе молекулярно-лучевой эпитаксии поддерживается относительно низкой (на уровне 600...800 °С). Этого вполне достаточно, чтобы атомы и молекулы смогли мигрировать по поверхности, образуя кристаллическую решетку.

Сверхвысокий вакуум и малая скорость поступления атомов (примерно  $10^{14} \dots 10^{15}$  атомов в секунду) приводят к эпитаксиальному росту

пленок посредством *практически монослойного заполнения растущей поверхности*.

Важной особенностью молекулярно-лучевой эпитаксии является недостижимая другими методами высокая точность контроля химического состава и толщины эпитаксиальных слоев, которая может составлять всего несколько нанометров.

Таким образом, *молекулярно-лучевая эпитаксия позволяет «сконструировать» эпитаксиальный слой нужного химического состава и кристаллической структуры из отдельных «кирпичиков» – атомов и молекул.*

Для создания поликристаллических нанослойных покрытий могут быть использованы различные технологии, основанные на физическом осаждении из паровой фазы (*PVD*).

Нанослойные покрытия и структуры на их основе с точно заданными геометрическими размерами, высокими электрическими и оптическими свойствами применяются в микро- и наноэлектронике, опто- и акустоэлектронике, в устройствах интегральной оптики, в вычислительной технике и других областях, основной тенденцией развития которых является использование функциональных объектов малых размеров, см. п. 7.5.

### **7.3.5.2 Нанокристаллические покрытия**

*Нанокристаллические покрытия* обладают комплексом физико-механических, эксплуатационных характеристик, существенно превышающих соответствующие показатели покрытий того же состава, но обладающих обычной микроструктурой.

По сравнению с нанослойными нанокристаллические покрытия имеют определенные преимущества: более изотропную структуру; низкотемпературные условия нанесения; возможность осаждения покрытий различных материалов (металлов, сплавов, химических соединений) на практически неограниченный круг материалов подложки; возможность нанесения покрытий на изделия сложной формы и т. д.

Нанокристаллические покрытия имеют вполне реальные области применения уже сегодня и весьма широкие перспективы для будущего применения в самых различных сферах.

Среди всех наноориентированных технологий конструирования поверхности, связанных с формированием нанокристаллических покрытий, наиболее перспективными являются технологии, основанные на физическом осаждении из паровой фазы (*PVD*), в том числе с использованием

термического испарения (электродугового, лазерного, электронно-лучевого, индукционного), катодного и магнетронного распыления, ионного осаждения, ионного плакирования, ионной имплантации, а также технологии химического осаждения из паровой фазы (*CVD*), см. п. 6.

Наиболее распространены методы *PVD*, поскольку в методах *CVD* необходим нагрев изделий, на которые наносится покрытие, до высоких температур, что, с одной стороны, оказывает отрицательное влияние на механические свойства и структуру подложки, а с другой, вызывает дополнительные проблемы при получении наноструктурного состояния самого покрытия.

Основными технологиями, позволяющими управлять размерами зерен покрытий, осаждаемых *PVD*-методами, и создавать нанокристаллическую структуру, являются низкоэнергетическая ионная бомбардировка и процесс смешивания (модифицирования).

*Ионная бомбардировка* заключается в управлении механизмом роста формирующихся покрытий при помощи воздействия на поверхность энергии ионов, что приводит к локальному нагреву, экстремально быстрому охлаждению (со скоростью  $\sim 10^{14}$  К/с), способствует увеличению центров зародышеобразования и подвижности атомов.

*Процесс смешивания* заключается в добавлении одного или нескольких элементов в основной материал покрытия, которые не растворяются в базовом веществе и сегрегируются на границах зерен основного компонента в виде ультразернистого или аморфного слоя, препятствуя росту основной фазы, т. е. формируются *нанокомпозитные покрытия*.

Высокая объемная доля границ раздела, практическая бездефектность нанокристаллитов в покрытии, контролируемое соотношение объемных долей различных фаз – все эти факторы приводят к уникальным свойствам нанокомпозитных покрытий, их *многофункциональности*, что проявляется в высоких значениях твердости, величины упругого восстановления, прочности, устойчивости к ударным воздействиям, термической стабильности, жаростойкости и коррозионной стойкости.

Огромные перспективы, связанные с созданием поверхностных структур на атомном уровне, открываются в области *целенаправленного конструирования граничных слоев покрытий и формирования трехмерной*

*топографии*, обеспечивающей требуемые физические, химические и другие свойства изделий.

Так, управление технологическими параметрами процесса наращивания покрытий позволяет не только регулировать их толщину, но и целенаправленно формировать необходимую структуру и *ориентацию кристаллитов*. Это означает, что, создавая ту или иную текстуру, можно контролировать не только свойства приповерхностного слоя, но и собственно поверхности, то есть управлять значениями интенсивности съема, поверхностной энергии, трещиностойкости, коэффициентом трения в достаточно широком диапазоне.

### **7.3.5.3 Многослойные наноструктурные покрытия**

Формирование многослойной наноразмерной структуры в покрытии приводит к возникновению качественно новых свойств по сравнению с однослойными покрытиями.

К числу таких свойств, прежде всего, нужно отнести более интенсивное возрастание прочности, твердости по сравнению с аддитивной прочностью и твердостью отдельных компонентов, что обусловлено большой удельной долей межфазных поверхностей раздела с присущими для них явлениями, связанными с несоответствием решеток, двусторонней диффузией, торможением дислокаций на межфазных поверхностях и т. д.

Кроме возрастания прочности и твердости, многослойные структуры из пленок нанометровой толщины проявляют ряд других необычных свойств (химических, физических) и, в зависимости от сочетания материалов слоев, могут быть интересны для различных практических применений, в том числе в качестве самостоятельных изделий.

Получение *многослойных наноструктурных сверхтвердых покрытий на основе чередующихся нанослоев тугоплавких соединений* (TiN/NbN, TiN/ZrN, (TiAl)N/CrN и т. д.), наиболее перспективных для повышения стойкости режущих инструментов, износостойкости различных изделий машиностроения, основано на применении методов физического осаждения вещества в вакууме.

Число слоев в многослойных наноструктурных покрытиях может варьироваться в больших пределах (от 10 до 200), выбирается в зависимости от решаемых технологических задач. При этом от их количества (т. е. от толщины каждого слоя) существенно зависят механические свойства, в частности, микротвердость, рис. 7.10.

С уменьшением толщины слоев твердость многослойных покрытий увеличивается и достигает, например, для TiN/NbN и TiN/ZrN  $\sim 70$  ГПа при толщине слоев  $\sim 10$  нм. Твердость однослойных покрытий этих же материалов составляет 20...30 ГПа.

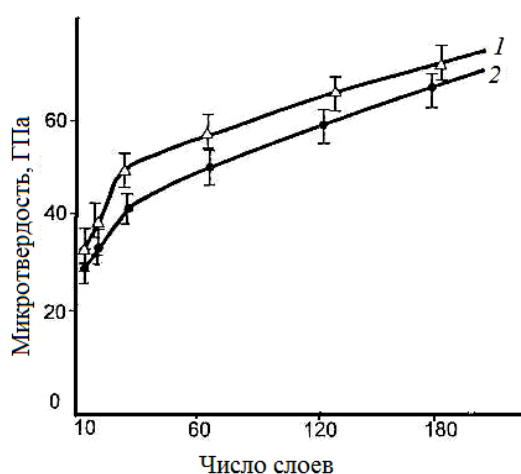


Рисунок 7.10 – Зависимость микротвердости многослойных покрытий толщиной  $2 \pm 0,3$  мкм TiN/NbN (1), TiN/ZrN (2) от количества слоев в покрытии (толщины слоя)

### 7.3.6 Углеродные наноматериалы и их получение

Особая роль среди различных групп наноматериалов принадлежит углеродным многоатомным образованиям – фуллеренам, нанотрубкам.

Данные структуры как индивидуальные частицы особенно ярко демонстрируют различные наноэффекты, проявляют целый ряд весьма необычных свойств.

Важно также и то, что фуллерены и нанотрубки представляют собой элементарный объект нанотехнологий, на основе которого возможно создание целого ряда имеющих практическое значение макрообъектов – материалов и устройств.

### 7.3.6.1 Фуллерены

*Фуллерены* как новая аллотропная форма существования углерода в природе в твердом состоянии (наряду с давно известными алмазом и графитом) были обнаружены сначала в космосе астрофизиками при изучении межзвездной пыли, а затем получены в 1985 г., п. 7.6, при исследовании масс-спектров паров графита после лазерного облучения твердого образца.

*Фуллерены* представляют собой сферические и сфероидальные полые внутри кластеры, см. п. 7.2, замкнутая поверхность которых образована правильными многогранниками из атомов углерода.

Эта форма углерода является новой по существу. В противоположность графиту и алмазу, структура которых представляет периодическую решетку атомов, третья форма чистого углерода является молекулярной, рис. 7.11.

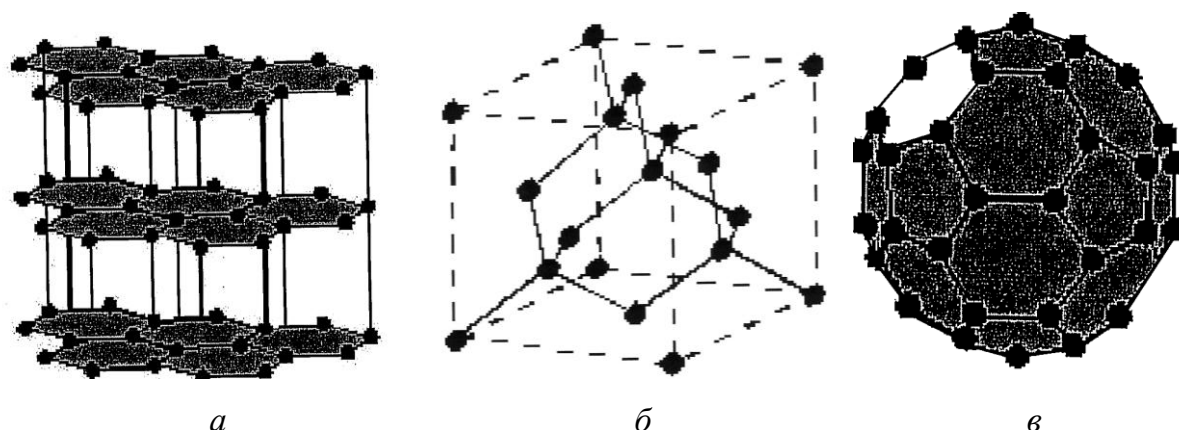


Рисунок 7.11 – Структура аллотропных модификаций углерода:

*a* – графит; *б* – алмаз; *в* – фуллерен

Наиболее стабильная молекула фуллерена  $C_{60}$  состоит из 60-ти атомов углерода, расположенных на сфере диаметром  $\sim 1$  нм (радиус  $C_{60}$ , установленный рентгеновским методом, составляет 0,357 нм), связанных между собой ковалентными связями. Атомы углерода в молекуле  $C_{60}$  образуют 12 правильных пятиугольников и 20 правильных шестиугольников, см. рис. 7.11, *в*.

*Отличительной особенностью фуллерена является высокая степень симметрии. По-видимому, молекула  $C_{60}$  наиболее симметрична из*

известных к настоящему времени в трехмерном мире, наиболее близка к сферической форме.

В настоящее время понятие «фуллерен» применяется к широкому классу многоатомных молекул углерода с общей формулой  $C_n$  ( $n$  – четное число от 20 до 1840).

Молекулы фуллерена могут иметь не только сферическую форму, но и форму эллипсов, рис. 4 Приложения А1. Возможно формирование многослойных сфер и эллипсов («луковичные» структуры). Однако во всех случаях размер молекул фуллерена составляет  $\sim 1$  нм, и в растворе они обладают свойствами броуновской частицы.

Свободных связей у молекул фуллерена нет, и этим объясняется их достаточно высокая химическая и физическая устойчивость. Наиболее исследованный фуллерен  $C_{60}$  устойчив в инертной среде до температур  $\sim 1700$  К, однако в присутствии кислорода окисление этой формы углерода наблюдается уже при существенно более низких температурах – порядка 500 К.

Для получения углеродных наноструктур с разнообразными размерами и свойствами разработано много методов, суть которых сводится к химическим превращениям углеродсодержащих материалов в условиях повышенных температур.

*Основными методами получения фуллеренов являются:*

◆ возгонка (термическое испарение) графита с последующей десублимацией (переходом из газовой фазы в твердое состояние);

◆ пиролиз (разложение при высоких температурах) углеводородов.

*Метод возгонки графита* состоит в выделении фуллерена из графитовой сажи, образующейся при термическом разложении (испарении) графита в результате нагрева с помощью электрической дуги, лазерного воздействия, резистивного нагрева, нагрева плазменной струей и т. д.

Одним из наиболее распространенных и достаточно простых методов получения фуллеренов является использование дугового разряда между стержнями из химически чистого (пиролитического) графита в вакууме с подачей инертного газа (гелия), рис. 7.12. Данный метод, разработанный немецкими учеными В. Кретчмером и Д. Хаффманом в 1990 г., получил название «фуллереновая дуга».

При пропускании тока в месте контакта электродов возникает электрическая дуга, в которой испаряется графит (анод). В результате образуется два продукта – фуллереносодержащая сажа (30...40 % возгоняемого углерода), которая осаждается на стенках камеры, и плотно спеченный осадок на торцевой поверхности катода, в котором

формируются углеродные нанотрубки (вначале эти структуры рассматривались как побочные продукты синтеза фуллеренов), см. п. 7.3.6.2.

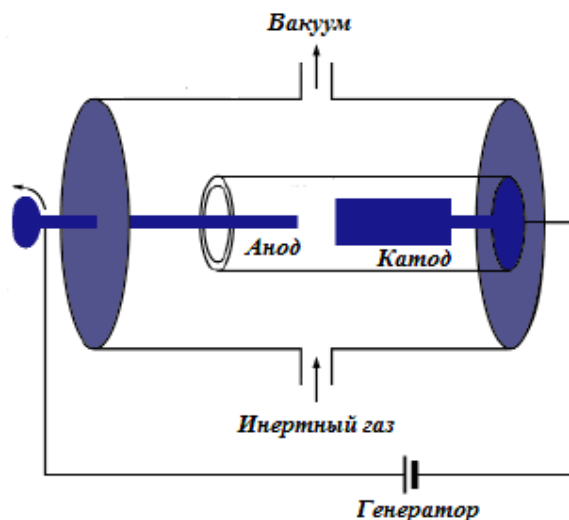


Рисунок 7.12 – Схема установки для получения фуллерена путем термического испарения графита

Далее фуллерен выделяется (экстрагируется) из сажи различными методами, например, путем ее растворения в органической жидкости (бензоле, толуоле и т. п.) и последующего испарения при нагреве с формированием кристаллического осадка – фуллерена.

Гелий играет роль «буферного» газа, атомы которого «гасят» колебательные движения возбужденных углеродных фрагментов, препятствующие их объединению в стабильные структуры.

*Пиролиз углеводородов* с образованием фуллерена реализуется при их нагревании с использованием микроволновой плазмы, лазерного излучения либо при частичном сжигании углеводородов.

Метод частичного сжигания углеводородов в последние годы интенсивно развивается и является серьезным конкурентом всем другим методам промышленного производства фуллеренов. Как правило, пиролизу подвергают ароматические углеводороды (например, бензол).

В качестве перспективного промышленного метода получения фуллеренов рассматривается его производство из природного углеродсодержащего материала шунгита, запасы которого в земных недрах значительны, а содержание фуллерена  $\sim 0,1\%$ .



Фуллерены являются перспективным «сырьевым» материалом для создания наноструктур («фуллереновых веществ») с разнообразными свойствами – кристаллов, покрытий, полимеров. Число вариантов фуллереновых материалов уже сегодня насчитывает более 10000.

♦ Одна из наиболее интересных и заманчивых проблем в этом направлении – внедрение внутрь молекулы фуллерена атомов различных элементов без нарушения ее целостности. Такие фуллерены называют *эндофуллеренами* или *легированными фуллеренами*, рис. 7.13.

Внедрение атомов разных металлов может существенно изменить электрические свойства фуллеренов и даже превратить фуллерен-изолятор (или полупроводник с очень низкой проводимостью) в проводник, что позволяет использовать фуллереновые молекулы для создания приборов и устройств нанoeлектроники на новых физических принципах, п. 7.5.5.

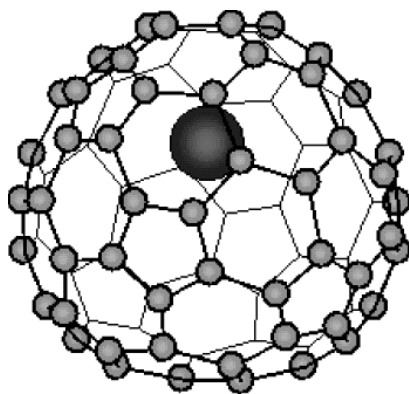


Рисунок 7.13 – Структура легированного фуллерена

Фуллерен, внутри которого расположены атомы редкоземельных элементов (тербий Tb, гадолиний Gd, диспрозий Dy), обладает свойствами магнитного диполя, ориентацией которого можно управлять внешним магнитным полем. При этом возникает перспектива использования фуллеренов в качестве основы для создания магнитной запоминающей среды со сверхвысокой плотностью информации – до  $10^{12}$  бит/см<sup>2</sup>.

Легированные фуллерены проявляют также ферромагнетизм, сегнетоэлектрические свойства.

Кроме эндофуллеренов, фуллерены способны образовывать экзоэдрические соединения (*экзофуллерены*), в которых атомы других элементов, ионы или молекулы находятся снаружи углеродной оболочки.

Возможно также частичное замещение атомов углерода на атомы других элементов (*гетерофуллерены*).

◆ При воздействии высокого давления или лазерного облучения может происходить полимеризация исходной структуры фуллерена и формирование *полимеров* на его основе.

◆ Вероятным направлением использования фуллеренов как элементарного объекта нанотехнологий является формирование *фуллереновых и металл-фуллереновых нанокристаллических покрытий*. Так, уже при малых концентрациях фуллеренов в покрытиях титан-фуллерен, осаждаемых в вакууме, структурообразующие частицы имеют округлую форму и размеры 15...40 нм. Подобные покрытия могут быть применены в качестве антифрикционных материалов, в качестве аккумуляторов электрической энергии и т. д.

◆ В перспективе предполагается добавление фуллеренов в сплавы для создания нанокристаллических объемных материалов.

◆ Другой путь использования фуллеренов в качестве элементарного нанобъекта связан с возможностью синтеза на их основе *кристаллических структур*.

При определенных условиях происходит упорядочение молекул  $C_{60}$  в пространстве с образованием молекулярного кристалла – *фуллерита*, в котором расстояние между центрами ближайших молекул фуллерена, удерживаемых слабыми силами Ван-дер-Ваальса, составляет  $\sim 1$  нм.

При комнатной температуре ( $T \sim 300$  К) формируется гранцентрированная кубическая решетка (ГЦК), рис. 7.14, *а, б*. При понижении температуры ( $T < 260$  К) происходит изменение кристаллической структуры (фазовый переход) с формированием примитивной кубической решетки и далее, при  $T \sim 86$  К, состояние кристалла становится стеклоподобным.

Поскольку 60-атомная молекула фуллерена имеет диаметр  $\sim 0,71$  нм, размеры элементарной ячейки ГЦК-решетки весьма внушительны: каждая сторона куба равна 1,42 нм, а расстояние между ближайшими соседями составляет около 1 нм. В обычных кристаллах, состоящих из атомов и имеющих ГЦК-решетку, сторона куба обычно не превышает 0,4 нм, а расстояние между ближайшими соседями – 0,3 нм.

Молекулы  $C_{60}$ , занимая определенные места в гранцентрированной решетке, при комнатной температуре вращаются вокруг положения равновесия с частотой  $10^{12}$  с<sup>-1</sup>. По мере понижения температуры вращение молекул замедляется вплоть до полного прекращения.

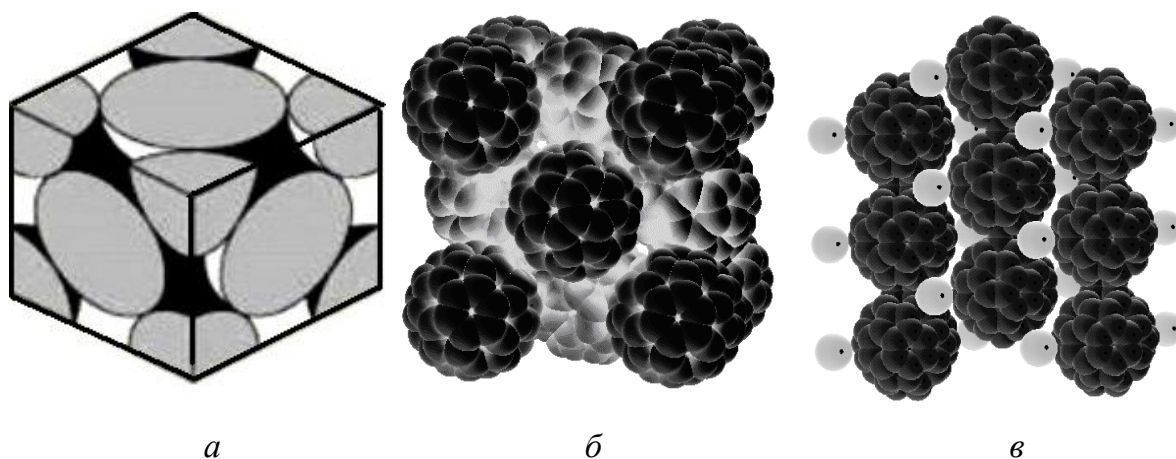


Рисунок 7.14 – Структура фуллерита:

*a* – схематическое изображение элементарной ячейки ГЦК-решетки фуллерита; *б* – представление элементарной ячейки фуллерита с помощью молекул  $C_{60}$ ; *в* – структура легированного рубидием фуллерита

Логично предположить, что вещество, состоящее из столь удивительных молекул, будет обладать и необычными свойствами.

Кристалл фуллерита имеет плотность  $1,7 \text{ г/см}^3$ , что значительно меньше плотности графита ( $2,3 \text{ г/см}^3$ ) и тем более алмаза ( $3,5 \text{ г/см}^3$ ). Это обусловлено тем, что молекулы фуллеренов полые.

Твердый фуллерит является полупроводником и обладает фотопроводимостью. При облучении видимым светом его электрическое сопротивление уменьшается.

В результате легирования, т.е. заполнения междоузлий, рис. 7.14, *в*, возможно формирование на основе фуллерита новых материалов (*фуллеридов*) с широким диапазоном свойств, а значит, и возможностей.

Так, при легировании (например, щелочными металлами – литием Li, натрием Na, калием K, рубидием Rb, цезием Cs) фуллериты становятся электропроводными с возможным переходом в сверхпроводящее состояние при определенной критической температуре  $T_c$  (от 18 до  $42,5 \text{ К}$  в зависимости от металла). Таким образом, металлофуллерены при достаточно простом составе являются одними из самых высокотемпературных сверхпроводников.

Исследования показали, что поликристаллический фуллерит может служить сырьем для синтеза самого твердого и самого дорогого материала – алмаза. При этом для перевода фуллерита в алмаз требуются менее «жесткие» условия, чем для превращения поликристаллического графита в алмаз: давление  $P \sim 0,2 \text{ ГПа}$  и комнатная температура; для перехода

графит-алмаз необходимы следующие параметры:  $P = 4,5 \dots 6,5$  ГПа и  $T \sim 1500 \dots 2000$  К. Давление, требуемое для превращения фуллерена в алмаз, снижается с ростом температуры.

### 7.3.6.2 Углеродные нанотрубки

Другая форма углеродного наноматериала – **углеродные нанотрубки (УНТ)** представляют собой протяженные структуры в виде полого цилиндра, состоящие из одного или нескольких свернутых в трубку графитовых слоев с гексагональной организацией углеродных атомов, рис. 7.15.

Диаметр УНТ изменяется от одного до нескольких десятков нанометров, а длина измеряется десятками микрометров и постоянно увеличивается по мере усовершенствования технологии их получения.

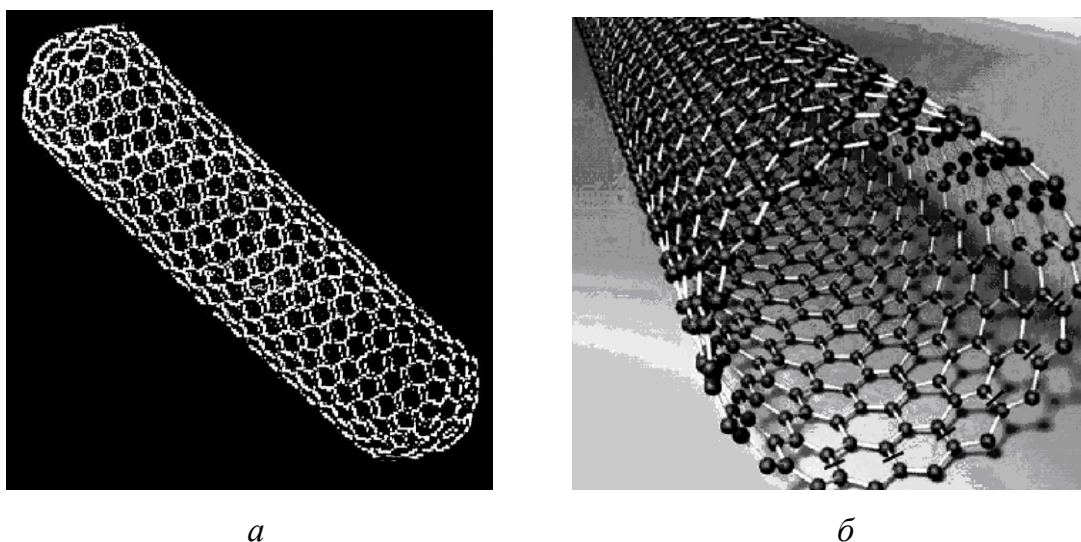


Рисунок 7.15 – Схематическое изображение углеродной нанотрубки (а) и расположение атомов на ее поверхности (б)

На поверхности трубки атомы углерода расположены в вершинах правильных шестиугольников. Концы трубки закрыты с помощью шести пятиугольников. Фактически нанотрубки представляют собой фуллерены, вытянутые в трубки.

*Рассматриваемая форма углерода занимает по своей структуре промежуточное положение между графитом и фуллереном. Однако многие свойства нанотрубок не имеют ничего общего с указанными структурами. Это позволяет рассматривать данные углеродные образования как самостоятельный материал.*

Наряду с однослойными трубками имеется возможность создавать и многослойные трубки, имеющие по сравнению с однослойными диаметр и длину в 10...100 раз больше. Помимо прямых нанотрубок существуют и спиральные.

В настоящее время выращивают в достаточных количествах не только одиночные нанотрубки, но также их упорядоченные связки (*bundles*), колонии (*arrays*) и тросы (*ropes*), которыми можно манипулировать и создавать на их основе новые классы материалов и устройств.

Некоторые структуры на основе углеродных нанотрубок представлены на рис. 4 приложения А1.

Благодаря особенностям своего строения нанотрубки имеют уникальные физико-химические, механические свойства: они практически бездефектны, проявляют необычайно высокие, близкие к теоретическим, значения прочности и удельной прочности; имеют большой диапазон проводимости (от диэлектрических свойств до сверхпроводимости в зависимости от геометрии и типа легирования), магнитных свойств (от идеального диамагнетика до ферромагнетика), теплофизических характеристик (теплопроводность и теплоемкость могут иметь значения от аномально малых до аномально высоких); обнаруживают электромеханический эффект (изменение проводимости при изгибе); эффект свечения при пропускании электрического тока; проявляют квантовые свойства; обладают электронной эмиссией; допускают возможность легирования и, таким образом, изменения свойств в широком масштабе; проявляют капиллярные свойства и т. д.

Кроме углеродных нанотрубок, возможно также формирование нанотрубок неорганических материалов – боридов, карбидов, нитридов, оксидов и т. д., обладающих уникальными, отличными от массивных материалов, свойствами.

Необычные свойства определяют широкое практическое применение нанотрубок – и как самостоятельного материала (микроэлектроника, электротехническая, химическая промышленность, биологические и медицинские применения), и как элементарного объекта нанотехнологий при создании покрытий, композиционных материалов предельной прочности (машиностроение, строительство, медицина и т. д.).

Гораздо больший интерес исследователей к нанотрубкам, нежели к фуллеренам, объясняется тем, что они намного более технологичны – с

протяженными объектами легче работать, чем с наноскопическими «шариками» фуллеренов.

Основной проблемой широкого практического применения данного класса наноматериалов является сложность и дороговизна методов их производства, а также ограничение размеров трубок (трубки сантиметровой длины и сегодня являются уникальными).

По аналогии с фуллеренами углеродные нанотрубки получают преимущественно возгонкой графита с последующей десублимацией, а также пиролизом углеводородов, см. п. 7.3.6.1.

По выбору исходных реагентов и способам ведения процессов вторая группа методов имеет значительно большее число вариантов, чем процесс возгонки и сублимации графита. Кроме того, в данных методах обеспечивается более четкое управление процессами образования нанотрубок. Технологии, основанные на пиролизе углеводородов, в большей степени подходят для крупномасштабного производства и позволяют производить не только сами углеродные наноматериалы, но и определенные структуры на подложках, имеющие практическое применение, макроскопические волокна из нанотрубок, а также композиционные материалы, армированные углеродными нанотрубками.

Фуллерены и углеродные нанотрубки сегодня являются уже вполне доступными материалами, производство которых реализуется в промышленных масштабах. Основные поставщики фуллеренов на мировом рынке – фирмы и компании США, Германии, Японии и Швейцарии.

#### **7.4 Основные свойства наноматериалов**

*Вещество наносистем по сравнению с традиционными объектами с микроскопическими характеристическими размерами имеет следующие особенности:*

- ◆ нанометровый размер кристаллитов;
- ◆ дискретный характер атомно-молекулярной структуры;
- ◆ высокую долю поверхностных атомов;
- ◆ множество границ раздела;
- ◆ квантовые закономерности поведения;
- ◆ доминирование над процессами искусственного упорядочения явлений самоупорядочения и самоорганизации;
- ◆ увеличение быстродействия протекания разнообразных процессов в наносистеме;

- ◆ потенциальную многофункциональность;
- ◆ предпосылки к минимизации, снижению энергоемкости, материалоемкости изготовления изделий и т.д.

*Основными причинами проявления указанных и других особенностей в условиях наномира являются:*

- ◆ дополнение обычных физико-химических представлений, включающих понятия «состав-свойства», понятиями «размер», «самоорганизация»;
- ◆ особая роль размера частиц как активной термодинамической переменной;
- ◆ изменение соотношения вклада поверхности частиц и их объема в различные процессы при переходе к наносистемам;
- ◆ энергетическая, полевая и «вещественная» неравновесность поверхности, охватывающая значительные объемы наночастиц;
- ◆ усиление роли различных видов размерных эффектов из-за значительной площади границ раздела;
- ◆ проявление в условиях больших коллективов энергетически активных наночастиц нетрадиционных механизмов упорядочения, пластичности;
- ◆ энергетическая и пространственная доступность транспорта заряда, энергии, обусловленная малыми характеристическими размерами частиц и особым характером их упорядочения.

*Если объект имеет наномасштаб в одном, двух или трех измерениях, то его химические, физические, механические и другие свойства могут резко отличаться от свойств традиционных массивных аналогов из того же вещества.*

#### **7.4.1 Особенности структуры наноматериалов**

Существенные изменения свойств наноматериалов по сравнению с традиционными аналогами связаны, в первую очередь, с особенностями их структурного состояния.

- ◆ При переходе от макрообъемов к нанообъектам происходит *изменение соотношения поверхностных и объемных атомов материала.*

Для наночастиц доля атомов, находящихся в тонком поверхностном слое (его толщину принимают, как правило, равной  $\sim 1$  нм, что соответствует 2...3 атомным слоям для большинства металлов), по сравнению с мезо- и микрочастицами заметно возрастает.

До определенного размера частиц доля поверхностных атомов мала,

их вкладом можно пренебречь. У наночастиц свойства поверхностных атомов становятся определяющими, рис. 7.16.

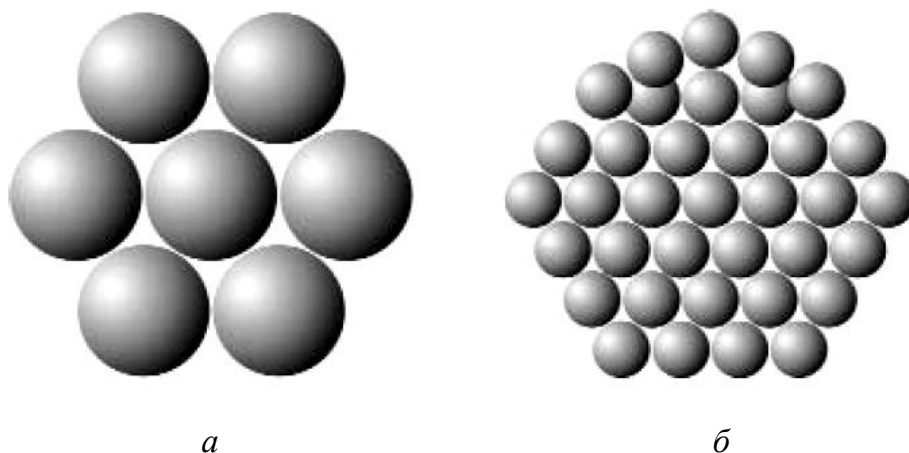


Рисунок 7.16 – Схема расположения атомов в наночастице (а) и в объемном материале (б)

Доля приповерхностных атомов  $a$  пропорциональна отношению поверхности  $S$  частицы к ее объему  $V$ :  $a \sim S/V$ . Если обозначить характерный размер частицы как  $R$  и принять, что частицы имеют сферическую форму, то по мере уменьшения их размера все большая доля атомов оказывается на свободных поверхностях:  $a \sim S/V \sim R^2/R^3 \sim 1/R$ .

Получаем следующие соотношения между диаметром зерна (частицы) и объемной долей поверхностного слоя:

Диаметр зерна (частицы), нм.....	100	50	25	20	10	6	4
Объемная доля поверхностного слоя, %.....	6	12	24	30	60	100	150

Таким образом, в нанокристаллических материалах, начиная с диаметра зерна 6 нм, объем поверхностного слоя становится больше объемной доли кристаллов.

Поверхностные атомы обладают свойствами, отличными от объемных, поскольку они связаны с «соседями» по-иному, нежели в объеме.

В общем случае поверхностные атомы находятся на более близких расстояниях друг от друга, чем атомы в объеме кристаллической решетки, обладают повышенным запасом энергии. Атомные связи поверхностных атомов оказываются частично нескомпенсированными.

В результате в приповерхностном слое может произойти атомная реконструкция и возникновение другого порядка расположения атомов, что приводит к искажениям кристаллической решетки и даже к изменению ее типа.



Поверхность даже самого идеального кристалла может считаться большим двумерным или даже объемным дефектом и служит стоком (почти бесконечной емкости) для большинства дефектов кристаллического строения, в первую очередь, вакансий и дислокаций. Установлено, что процессы деформации и разрушения протекают в тонком приповерхностном слое с опережением по сравнению с внутренними объемами кристаллического материала, что во многом определяет механические свойства (прочность, пластичность).

*Все это вместе взятое существенным образом изменяет механические, электрические, оптические и другие свойства и позволяет рассматривать приповерхностный слой как некое новое состояние вещества.*

*Если количество вещества на поверхности и в объеме становится соизмеримым, то роль поверхности как более активной составляющей существенно возрастает.*

*Для наноматериалов весь материал «работает» как приповерхностный слой.*

♦ «Аномалии» свойств наноматериалов, прежде всего, объемных (компактных), обусловлены также тем, что при уменьшении размера зерна увеличивается протяженность межзеренных границ и их вклад в механизмы прочности и пластичности материала.

Созданы особые структурные модели зерен и их границ в наноструктурных материалах. Главным в них является представление о неравновесных границах зерен с предельно высокой плотностью практически всех видов дефектов (вакансий, примесных атомов, дислокаций и т. д.), высокой избыточной энергией и далекодействующими упругими напряжениями. Неравновесность границ зерен вызывает возникновение высоких значений напряжений и искажения кристаллической решетки, появление значительных смещений атомов, вплоть до потери дальнего порядка.

В структуре наноматериалов выделяют относительно слабо искаженные центральные части зерен («внутризеренную фазу») и сильно искаженные зоны вдоль границ зерен шириной порядка нескольких нанометров («зернограничную фазу»). Количественное соотношение данных зон становится существенным при нанометровом масштабе зерен (менее 100 нм).

Так, с уменьшением размера зерна от 1 мкм до 2 нм объемная доля межзеренного вещества увеличивается от 0,3 % до 90 %. Объемные доли межзеренной (дефектной) и внутризеренной (совершенной) компоненты равны при размере зерна около 5 нм.

♦ Одна из причин специфики свойств наноматериалов – *совпадение размеров кристаллитов с «характерными» размерами для различных физических явлений и свойств*, поскольку «характерные» размеры лежат в диапазоне  $10^{-9} \dots 10^{-7}$  м, соответствующем средним размерам атомов и молекул в обычных материалах.

Так, при рассмотрении любого процесса переноса (протекания электрического тока, теплопроводности, пластической деформации и т. д.) носителям приписывают некоторую эффективную длину свободного пробега  $R_f$ . Если размер частицы вещества  $R \gg R_f$ , рассеяние (или захват и гибель) носителей происходит в объеме и слабо зависит от геометрии объекта. При  $R < R_f$  ситуация радикально меняется и все характеристики переноса начинают сильно зависеть от размеров образца.

В связи с этим правомерно ожидать влияние различных размерных эффектов на свойства наночастиц или наноструктур, размеры которых соизмеримы или меньше, чем характерный корреляционный масштаб того или иного физического явления или характерная длина, фигурирующая в теоретическом описании какого-либо свойства или процесса.

♦ В размерном интервале  $1 \dots 100$  нм *наночастицы находятся на границе квантового и классического микромиров*, и это метастабильное состояние во многом также определяет исключительный комплекс физико-химических свойств.

Многие физические явления в наномасштабе обусловлены волновой природой частиц (например, электронов), поведение которых подчиняется законам квантовой механики.

Если объект имеет атомарный масштаб в одном, двух или трех направлениях, его свойства могут резко отличаться от объемных для того же материала из-за проявления в поведении квантовых закономерностей. Например, когда хотя бы один из размеров объекта становится соизмеримым с длиной волны де Бройля для электронов  $\lambda_B$ , вдоль этого направления начинается размерное квантование.

Волны де Бройля связаны с любой микрочастицей и отражают их квантовую природу. Для металлов  $\lambda_B = 0,1 \dots 1$  нм, для полупроводников  $\lambda_B \sim 100$  нм.

*Таким образом, особенности структурного состояния наноматериалов заключаются в существенном вкладе поверхности, увеличении общей доли границ раздела (межзеренного вещества) и специфике их строения (наличии высокой плотности дефектов); в коллективном поведении и взаимодействии между отдельными зернами; в соизмеримости размера наночастиц с*

«характерными размерами» различных физических процессов и проявлении квантовых эффектов.

#### 7.4.2 Механические свойства

При различных схемах испытаний наноструктурные материалы демонстрируют значительно более высокие по сравнению с традиционными аналогами значения характеристик механических свойств – предела текучести, временного сопротивления, твердости, ударной вязкости, усталостной прочности и т. д.

Одним из важнейших механических свойств материалов, как известно, является прочность, которая определяется химическим составом и реальной атомарной структурой, т. е. наличием определенной кристаллической решетки (или ее отсутствием) и всем спектром ее несовершенств.

Высоких прочностных показателей можно добиться двумя прямо противоположными способами: снижая концентрацию дефектов структуры (в пределе приближаясь к идеальному монокристаллическому состоянию) или, наоборот, увеличивая ее вплоть до создания мелкодисперсного нанокристаллического или аморфного состояния, рис. 7.17.

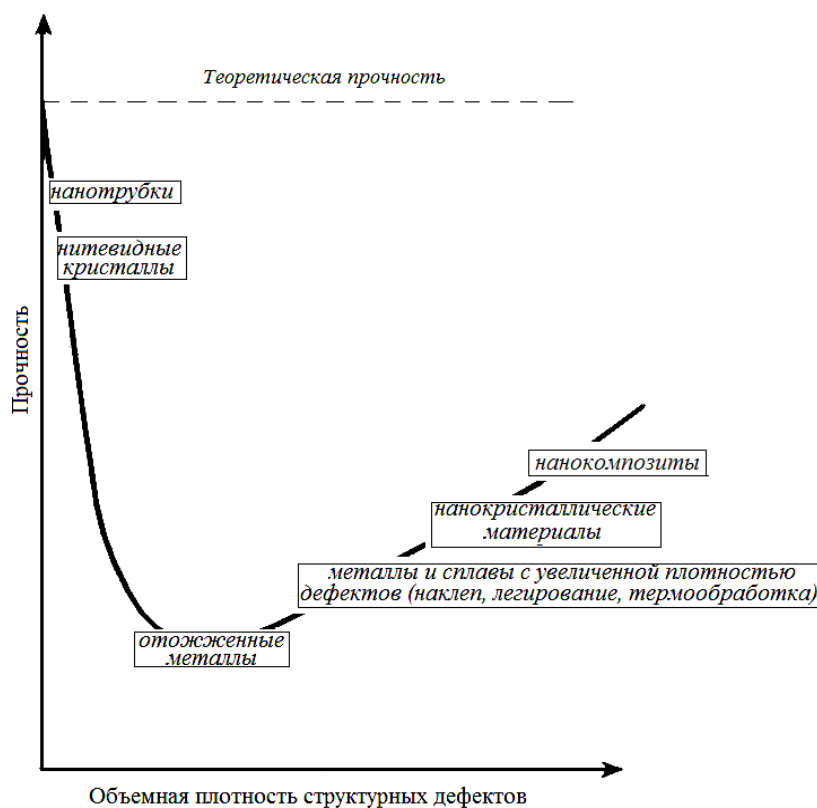


Рисунок 7.17 – Схематическая зависимость прочности от плотности атомарных дефектов в материале

Один из основных механизмов упрочнения в этом случае обусловлен эффектом скопления дислокаций вблизи препятствий, которыми при уменьшении размеров зерен являются их границы.

Оба пути широко используют в современном физическом материаловедении, и в обоих направлениях существовавшие до недавних пор пределы преодолены на основе использования наноматериалов, см. рис. 7.17.

Некоторые механические свойства различных групп наноматериалов – объемных, нанослойных и нанокристаллических покрытий, углеродных нанотрубок приведены в табл. 7.1, 7.2, 7.3, 7.4.

Таблица 7.1 – Усредненные механические свойства некоторых объемных материалов в крупно- и нанокристаллическом состоянии

Материал		Предел прочности (временное сопротивление) $\sigma_B$ , МПа	Предел текучести $\sigma_T$ (условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ ), МПа	Микротвердость, $HV$ , МПа
Медь техническая М1	КК	200	60	600
	НК	850	350	1250
Титан технический ВТ1-0	КК	430	360	1700
	НК	1000	690	2500
Деформируемый титановый сплав ВТ6	КК	1050	980	3270
	НК	1500	1460	-
Сталь высоколегированная коррозионностойкая 12Х18Н10Т	КК	550	240	2000
	НК	-	1340	-

КК – крупнокристаллическое состояние;  
НК – нанокристаллическое состояние

Таблица 7.2 – Механические свойства углеродных нанотрубок

Материал	Модуль Юнга $E$ , ТПа	Предел прочности (временное сопротивление) $\sigma_B$ , ГПа
Углеродные однослойные нанотрубки	1,3...1,8	45
Углеродные многослойные нанотрубки	0,6...1,3	7
Сталь высокопрочная	0,2	2...3

Таблица 7.3 – Прочность металлических нанослойных покрытий (тонких пленок) по сравнению с массивными крупнокристаллическими аналогами и сталью

Материал		Прочность св, МПа	Марка стали (крупнокристаллическое состояние )	Прочность стали
				после термообработки (закалка+отпуск) $\sigma_b$ , МПа
Никель	КК	450	Сталь 45	980
	НП	2000		
Медь	КК	200	Сталь 65Г	1670
	НП	1700		
Серебро	КК	140	Сталь ШХ15	2350
	НП	1200		

КК – массивное крупнокристаллическое состояние;

НП – нанослойное покрытие

Таблица 7.4 – Характеристики нанокристаллических покрытий

Состав	Толщина покрытия, мкм	Размер зерна, нм	Микротвердость $HV$ , ГПа
TiN	1...2	5...30	35...50 (21...26)*
TiB <sub>2</sub>	1...4	2...8	50...70
Ti(B,N,C) <sub>x</sub>	2...5	1...5	60...70
TiN/Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	2	9	50
TiN/NbN	2	10	78
TiN/NbN	2	10	70 (34)*
TiC/TiB <sub>2</sub>	3	1...2,5	71

\*В скобках указаны значения микротвердости для покрытий с микрокристаллической структурой

Как видно из указанных таблиц, основные механические свойства наноматериалов (предел текучести  $\sigma_T$ , временное сопротивление  $\sigma_B$ , микротвердость  $HV$ ) могут существенно превышать аналогичные показатели крупно- и микрокристаллических аналогов, что обусловлено

влиянием совокупности размерных эффектов, см. п. 7.4.1, характерных для материала в наносостоянии.

Наиболее эффективно проявляется повышение механических характеристик в бездефектных *углеродных однослойных нанотрубках*, см. рис. 7.17, прочность которых может более чем в 20 раз превышать соответствующий показатель для высокопрочных сталей, см. табл. 7.2.

Для пластичных металлов и сплавов переход в нанокристаллическое состояние сопровождается, как правило, повышением механических свойств в 4...8 раз по сравнению с традиционными крупнокристаллическими объектами, см. табл. 7.1, 7.3, что связывают, прежде всего, с влиянием границ зерен как барьеров для дислокационных сдвигов.

Значения прочности металлических пленок никеля, меди, серебра при уменьшении их толщины до наноразмеров сопоставимы с прочностью конструкционных сталей после термообработки, см. табл. 7.3.

Для хрупких материалов (нитридов, карбидов, боридов) увеличение показателей механических свойств, например, твердости, см. табл. 7.4, происходит в 1,5...2 раза, что также весьма существенно.

Как видно из табл. 7.4, функциональные покрытия  $TiN$ ,  $TiB_2$ ,  $Ti(B,N,C)_x$ , и т. д. при размере кристаллитов 1..10 нм и толщине 1...5 мкм имеют значительно более высокие по сравнению с традиционными покрытиями того же состава значения твердости, соизмеримые с твердостью компактов алмаза после динамического прессования (63...68 ГПа).

Благодаря нанометровой толщине и низкой дефектности слоев возможна реализация практически «теоретической» прочности и создание покрытий, обеспечивающих максимальное повышение эффективности и надежности изделий.

Уникальной особенностью наноматериалов является то, что *присущая им высокая прочность дополняется зачастую и высокой пластичностью или даже сверхпластичностью*, рис. 7.18.

Это обстоятельство весьма важно, поскольку в традиционных материалах увеличение прочности ведет к снижению пластичности. Наилучшим соотношением этих свойств обладают металлические материалы, прежде всего, стали.

Уменьшение структурных элементов (размеров зерен) ниже критических приводит к проявлению специфических недислокационных механизмов пластической деформации, т. к. благодаря малому размеру зерен вероятность появления подвижных дислокаций в зерне чрезвычайно мала. «Включается» особый механизм деформации в виде зернограничного

некристаллографического скольжения, уже при низких температурах конкурирующий с действием стандартного кристаллографического внутриверного дислокационного скольжения и двойникования.

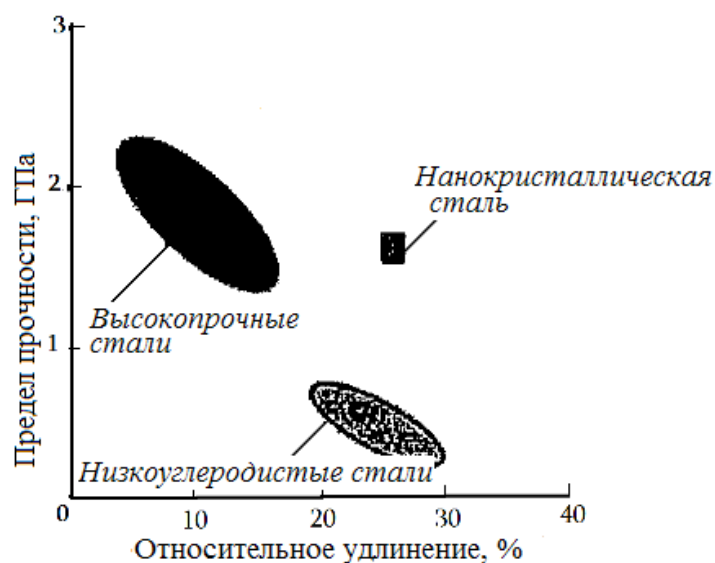


Рисунок 7.18 – Соотношение между прочностью и пластичностью для сталей

О возможности реализации недислокационных механизмов пластичности свидетельствует также свойство наноматериалов проявлять *сверхпластичность* при достижении степеней деформации 1000 % и более. Как известно, для реализации эффекта структурной сверхпластичности одним из необходимых условий является наличие мелкозернистой структуры, а основным механизмом сверхпластичности является зернограничное скольжение.

Многие наноструктурные материалы проявляют *высокотемпературную сверхпластичность* в результате зернограничного проскальзывания при более высоких скоростях деформации и меньших температурах, чем обычные поликристаллические сплавы тех же составов в режиме сверхпластичности.

Наряду с увеличением механических характеристик наблюдается также рост многих показателей эксплуатационных свойств наноматериалов.

Так, на рис. 7.19 показано повышение *износостойкости* нанокристаллических материалов по сравнению с традиционными аналогами на примере алюминиевых сплавов.

Нанокристаллические материалы имеют высокие *демпфирующие свойства*, что важно для уменьшения вредных воздействий циклических

нагрузок, которым подвергаются различные конструкции, для уменьшения шумов, связанных с вибрацией механизмов, повышения точности измерений и т. д.

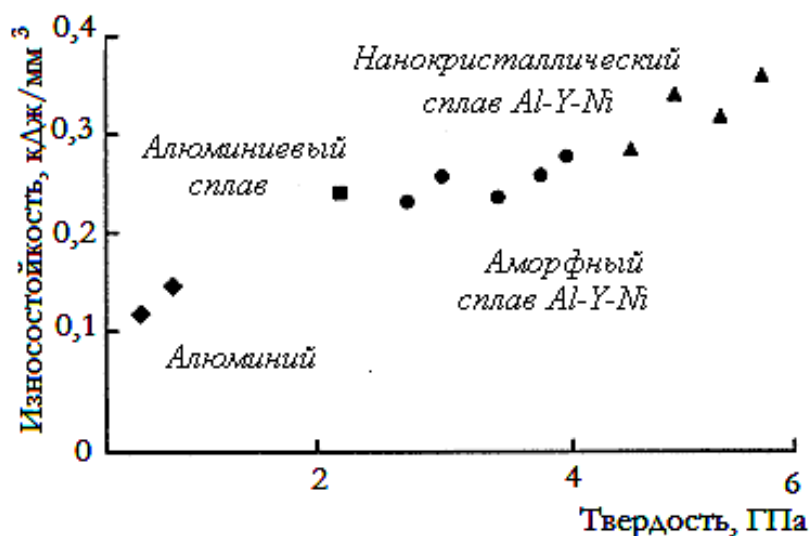


Рисунок 7.19 – Повышение износостойкости алюминиевых сплавов при переходе к нанокристаллическому состоянию

Увеличение демпфирующей способности в наноматериалах связано с неоднородным распространением упругих колебаний и существенным их рассеянием из-за различия модулей упругости самих зерен и граничных слоев. Например, у нанокристаллической меди уровень фона внутреннего трения, являющегося мерой демпфирующей способности, в 2...3 раза выше, чем у серого чугуна, который считается хорошим демпфером.

### 7.43 Физические свойства

Как указывалось в п. 7.4.1, особенностью наноматериалов является совпадение размеров наночастиц с «характерными» (критическими) размерами для многих физических явлений и свойств. Если размер частиц меньше определенной для каждого свойства характеристической длины, возможно появление новых физических свойств.

По сравнению с обычными материалами в наноматериалах изменяются такие фундаментальные характеристики, как модуль упругости, удельная теплоемкость, температура плавления, коэффициент диффузии, магнитные и электрические свойства. Становится иной физическая сущность многих процессов.



В качестве примера можно привести следующие данные.

- При переходе к наноразмерному состоянию происходит существенное снижение температуры плавления  $T_{пл}$ . В зависимости от материала и размера элементов наноструктуры уменьшение  $T_{пл}$  может составлять сотни градусов по шкале Кельвина. Размерная зависимость  $T_{пл}$  сказывается на диаграммах состояния с участием наноконпонентов, на температуре фазовых превращений.

- Для многих металлов в наноструктурном состоянии наблюдается повышение теплоемкости и увеличение коэффициента термического расширения, уменьшение теплопроводности.

- Уменьшение элементов структуры до нанокристаллических размеров существенно изменяет диффузионные процессы. Например, коэффициент граничной диффузии в наноматериалах значительно выше, чем в крупнозернистых аналогах (на 3 порядка и более), что позволяет их легировать нерастворимыми или слабо растворимыми в обычных условиях элементами за счет более развитой зеренной структуры.

- Нанометровый размер приводит к изменению электронных состояний и изменению электропроводности материалов. Удельное электросопротивление металлических наноматериалов существенно повышается, а диэлектрическая проницаемость снижается при уменьшении размера зерна.

Наноструктуры на основе углерода демонстрируют широкий диапазон электрических свойств – от диэлектрических до сверхпроводимости.

- Размерная зависимость характерна и для магнитных свойств наноматериалов. В частности, с уменьшением размера зерна до нанометрового диапазона наблюдается рост коэрцитивной силы, магнитосопротивления, явление супермагнетизма, что позволяет синтезировать новые магнитные материалы и устройства.

- Физические аспекты специфики наноматериалов, включая возможность проявления квантовых эффектов, определяют особые электронные свойства частиц с размерами порядка квантовой длины волны носителей проводимости (электронов, дырок) и позволяют создавать особые квантоворазмерные структуры – квантовые ямы, проволоки, точки, см. рис.1 Приложения А1.

Так, в трехмерных электронных системах макроскопических размеров электроны проводимости делокализованы и свободно движутся по всей проводящей среде. При уменьшении одного или нескольких размеров образца до величин, всего лишь в несколько раз превышающих

расстояния между атомами (т. е. до нанометрового диапазона), электроны оказываются локализованными в одном (квантовые ямы), двух (квантовые проволоки) либо в трех (квантовые точки, «искусственные атомы») пространственных направлениях.

Интерес к изучению подобных структур связан как с реализацией принципиально новых физических явлений, так и с перспективами создания на основе этих явлений совершенно новых квантовых устройств и систем с широкими функциональными возможностями.

#### **7.4.4 Химические свойства**

Существуют многочисленные экспериментальные свидетельства наличия у веществ в наноразмерном состоянии отличных от макро- и микроструктурных аналогов химических свойств.

Можно выделить следующие особенности их проявления:

▼ Большинство методов синтеза приводит к получению наночастиц в неравновесном метастабильном состоянии, что, с одной стороны, усложняет их изучение и практическое использование в нанотехнологических процессах, а, с другой, позволяет осуществлять необычные и невозможные в равновесных условиях химические превращения.

▼ Наночастицы представляют собой системы, обладающие избыточной энергией и высокой химической активностью. Частицы размером ~ 1 нм практически без энергии активации вступают в процессы агрегации и в реакции с другими химическими соединениями, в результате которых получают вещества с новыми свойствами. «Запасенная» энергия таких объектов определяется нескомпенсированностью связей поверхностных и приповерхностных атомов.

В частности, аномально высокую реакционную способность проявляют металлические нанокластеры.

Углеродные кластеры (фуллерены), обладая высокой электроотрицательностью (способностью в соединениях притягивать к себе электроны), выступают в химических реакциях как сильные окислители. Присоединяя к себе радикалы различной химической природы, данные наночастицы могут образовывать широкий класс химических соединений с разнообразными физико-химическими свойствами (магнитными, электрическими, оптическими).

▼ Большая кривизна поверхности наночастиц и изменение характера связи атомов на поверхности приводит к изменению их химических потенциалов. Вследствие этого существенно иной будет растворимость и каталитическая, в том числе биокаталитическая, способность наночастиц и их компонентов.

▼ Высокая удельная поверхность (в расчете на единицу массы) наноматериалов увеличивает их способность к адсорбции (т. е. поглощению веществ из растворов или газов), капиллярные свойства (способность втягивать внутрь жидкости под действием сил поверхностного натяжения).

Например, углеродные нанотрубки имеют высокие сорбционные характеристики (поглощают водород, азот, кислород, пары воды, углекислый газ, органические примеси из водных растворов и т. д.) и являются своеобразными высокочастотными аккумуляторами и нанофильтрами; проявляют капиллярные эффекты (в том числе по отношению к расплавам или растворам металлов – железа, никеля, кобальта, свинца и т. д.).

▼ Для многих наноструктурных материалов (покрытий, объемных материалов) характерна повышенная стойкость к окислению, что объясняется большим количеством границ зерен и высокими скоростями диффузии, и высокая коррозионная стойкость.

#### 7.4.5 Классификация наноматериалов

В настоящее время существует несколько подходов к классификации наноматериалов: по геометрическим параметрам их структуры; по составу, распределению и форме структурных составляющих; по физическому принципу; по происхождению и топологии и т. д.

Одним из наиболее распространенных является *геометрический принцип (мерность)*. Данный подход важен не только с формальной стороны, но также связан с тем, что геометрические параметры наноматериалов существенно влияют на их свойства, см. п. 7.4.1.

Согласно геометрическому принципу, нанообъекты можно классифицировать с разных точек зрения. Одни исследователи предлагают характеризовать мерность объекта количеством измерений, в которых объект имеет макроскопические размеры. Другие берут за основу количество наноскопических измерений. Общая классификация наноматериалов, интегрирующая оба подхода, приведена в табл. 7.5.

Достаточно весомыми классификационными признаками *объемных наноматериалов* являются **химический состав, форма кристаллитов, расположение границ раздела** (классификация Г. Глейтера), табл. 7.6.

Таблица 7.5 – Классификация наноматериалов по геометрическому принципу

Характеристики объекта	Мерность материала с точки зрения наноскопических измерений	Мерность материала с точки зрения макроскопических измерений	Примеры материалов
Все три размера менее 100 нм	3-мерный	0-мерный	Атомные кластеры и частицы, фуллерены, нанопорошки, квантовые точки
Два размера менее 100 нм	2-мерный	1-мерный	Нанотрубки, нановолокна, квантовые проволоки
Один размер менее 100 нм	1-мерный	2-мерный	Нанослойные покрытия, квантовые ямы
Все три размера более 100 нм	0-мерный	3-мерный	Нанокристаллические покрытия, объемные материалы с размером зерна нанометрового диапазона, нанокомпозиты

По *форме кристаллитов* наноструктурные материалы (НСМ) делят на три группы: слоистые, волокнистые и равноосные, см. табл. 7.6, для которых соответственно толщина слоя, диаметр волокна или размер зерна менее 100 нм.

По *химическому составу* кристаллитов можно выделить четыре группы НСМ, см. табл. 7.6.


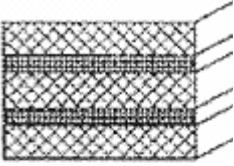
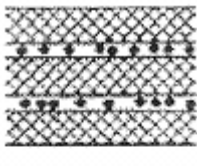
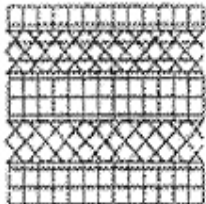
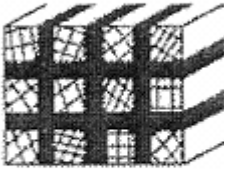
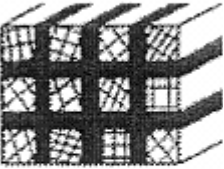
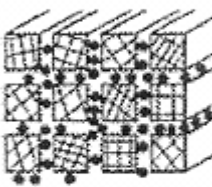
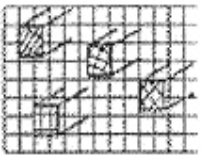
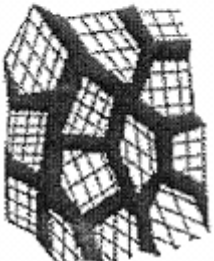
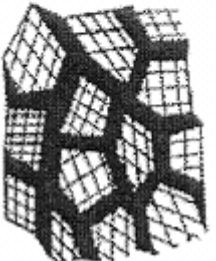
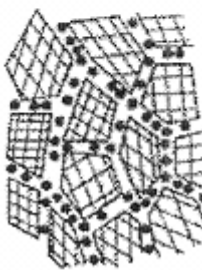
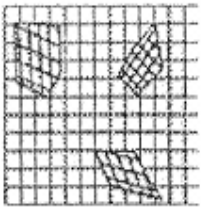
Наиболее простым является вариант, когда химический состав кристаллитов и границ зерен одинаков, например, в чистых однородных металлах с нанокристаллической равноосной структурой.

Вторая группа представляет НСМ с кристаллитами различного химического состава, в частности, многослойные структуры.

Для материалов третьей группы химический состав зерен и границ раздела различен.

Четвертую группу НСМ составляют материалы, в которых наноразмерные компоненты (слои, волокна, равноосные кристаллиты) распределены (диспергированы) в матрице другого химического состава, см. табл. 7.6.

Таблица 7.6 – Классификация объемных наноматериалов по составу, распределению и форме структурных составляющих

Форма кристаллитов	Химический состав кристаллитов			
	Однофазный материал	Многофазный материал		
	Состав кристаллитов и границ раздела одинаковый	Состав кристаллитов различный	Состав кристаллитов и границ раздела различный	Кристаллиты диспергированы в матрице различного состава
Слоистая				
Волокнистая				
Равноосная				

В соответствии с *физическим принципом* материалы классифицируют по «характерному» (предельному) структурному размеру, определяющему конкретное физическое свойство, см. п. 7.4.1. Например, критерием «наноразмерности» для прочностных свойств является размер бездефектного кристалла, для электропроводности – длина свободного

пробега электронов, для магнитных свойств – размер однодоменного кристалла и т. д.

В связи с тем, что значения «характерных» размеров отличаются для разных свойств и материалов, данный принцип не получил широкого признания.

Еще одним примером классификации наноструктурных материалов является принцип, в котором учтено *происхождение наноструктурных материалов (нанобазис), а также их топология (непрерывность)*, рис. 7.20.

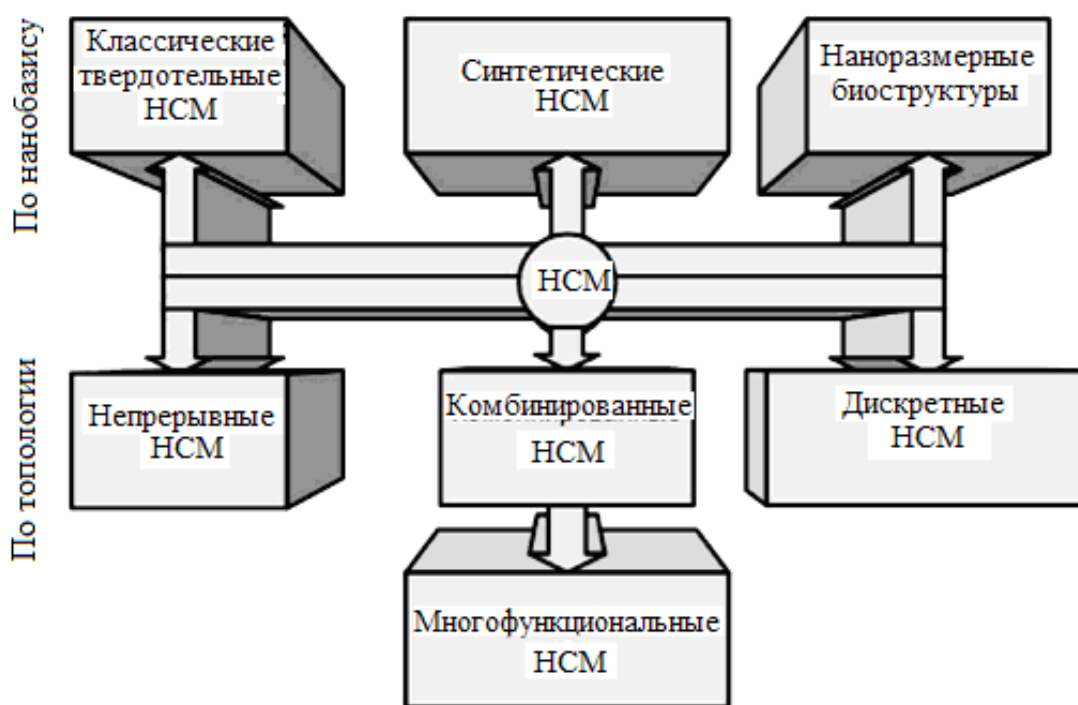


Рисунок 7.20 – Классификация наноструктурных материалов в соответствии с происхождением (нанобазисом) и топологией (непрерывностью)

Так, в соответствии с классификацией *по происхождению* (по нанобазису) различают следующие виды наноматериалов:

– классические твердотельные НСМ: наночастицы, нанотрубки; металлические, полупроводниковые и диэлектрические тонкие пленки; нанокристаллы и т. д.;

– синтетические НСМ: нанополимеры, синтетические нановолокна и тонкие пленки, нанокolloиды и т. д.;

– наноразмерные биоструктуры: биомолекулярные комплексы, модифицированные вирусы, органические наноструктуры и т. д.

*По топологии (непрерывности)* наноструктурные материалы делят на следующие группы:

– непрерывные НСМ: многослойные материалы, нанопленки, нанотрубки и т. д.;

– дискретные НСМ: наночастицы, квантовые ямы, квантовые точки, наноразмерные точечные дефекты и т. д.;

– комбинированные НСМ: периодические многокомпонентные структуры, гетерогенные структуры, многообъектные сложные структуры.

## **7.5 Основные области применения наноматериалов и нанотехнологий**

### **7.5.1 Создание нового поколения конструкционных материалов**

Одной из наиболее важных областей применения нанотехнологий и наноматериалов является создание принципиально нового класса конструкционных материалов – с предельно высокой прочностью, сочетающих высокую прочность и пластичность, обладающих высокой удельной прочностью, способных изменять свою структуру и свойства в зависимости от внешних воздействий и т. д. *Это направление сегодня является одной из наиболее востребованных областей нанотехнологий.*

*В отличие от существовавших ранее направлений увеличения прочности конструкционных материалов путем легирования и изменения фазового состава нанотехнологический подход основан на формировании у материалов нанокристаллического строения, обеспечивающего существенное увеличение механических свойств и формирование благоприятного соотношения между прочностью и пластичностью, см. п. 7.4.2.*

На основе создания наноматериалов возможно расширение диапазона прочности конструкционных материалов, см. п. 7.4.2, рис. 7.17, как за счет объемных (компактных) наноструктурированных материалов с высокой плотностью дефектов кристаллического строения на границах зерен, получаемых в основном методами интенсивной пластической деформации, так и за счет создания практически бездефектных наноматериалов (нанотрубок).

*С учетом того, что плотность однослойных углеродных нанотрубок в 5 раз меньше плотности стали, а прочность более, чем в 20*

раз выше, см. п. 7.4.2, табл. 7.2, удельная прочность нанотрубок может более, чем в сто раз превышать аналогичный параметр для стали. Это открывает широкие перспективы для использования данного материала в качестве конструкционного в тех областях, где проблемы повышения весовой эффективности наиболее актуальны – авиации, космической технике, строительстве и т. д.

Сочетание высокой прочности и пластичности, а также проявление эффекта сверхпластичности в наноматериалах, см. п. 7.4.2, обеспечивает возможность их эффективной обработки давлением и получения на их основе деталей и изделий сложной формы для применения в различных отраслях.

Перспективным направлением в области конструкционного материаловедения является также создание **композиционных материалов (наноккомпозитов)** с различного рода нанопропрочнителем в виде наночастиц (дисперсно-упрочненных), нановолокон, нанотрубок (волоконистых), нанослоев (слоистых), распределенных в матрице из полимеров, керамики, металлов и сплавов. При этом достигаются свойства, которые не могут быть получены с другими наполнителями.

Кроме того, наноматериалы в качестве наполнителя композитов многофункциональны. Их введение повышает не только механические характеристики, что чрезвычайно важно для конструкционного материала, но также электропроводность, теплопроводность, расширяет диапазон рабочих температур композита.

Данные материалы уже применяются, например, для изготовления деталей аэрокосмического назначения, для изготовления космических антенн, оптики, зеркал, антирадарных покрытий; в качестве деталей конструкции автомобиля; в военной промышленности; в качестве материала бытовой электронной техники; для изготовления шлангов и труб для подачи горючих газов и жидкостей и т. д.

Предполагается создание принципиально нового класса композиционных материалов на основе комбинации различных групп наноматериалов – фуллеренов, нанотрубок и нанопроволок, нанопокровтий, рис. 5 Приложения А1. Эти материалы перспективны для микро- и наноэлектроники, для создания аккумуляторов водорода, высокотемпературных сверхпроводников и т. д.



## 7.5.2 Создание нового класса инструментальных наноматериалов

Наноматериалы представляют интерес с точки зрения использования их в качестве инструментальных. Предпосылками для этого являются их высокие механические свойства (в частности, твердость), более высокая по сравнению с традиционными материалами износостойкость, см. п. 7.4.2.

Например, нанопорошки уже применяются в качестве абразива для сверхтонкой механической обработки поверхностей деталей. Так, нанопорошки металлов с включениями карбидов используют в качестве шлифующего и полирующего материала на конечных стадиях обработки полупроводников, диэлектриков.

Составы на основе наноалмазов применяются для полировки материалов для электроники, оптики, медицины, машиностроения, ювелирной промышленности и позволяют получить бездефектную зеркальную поверхность твердых тел любой геометрической формы с высотой неровностей поверхности до 2...8 нм.

Весьма перспективны в качестве инструментальных керамические материалы в наноструктурном состоянии на основе оксида алюминия  $Al_2O_3$ , оксида циркония  $ZrO_2$ , карбидов тугоплавких металлов.

Например, на основе нанопорошков карбида вольфрама WC и кобальта Co, а также на основе TiC/Fe разработаны нанокompозитные металлокерамические материалы, значительно превосходящие по износостойкости, прочности и ударной вязкости аналоги с обычной микроструктурой.

Повышенные эксплуатационные характеристики данных материалов обусловлены образованием при спекании нанопорошков специфических нитевидных структур, формирующихся в результате трехмерных контактов между наночастицами разных фаз.

Основные области применения данных материалов – износостойкие инструменты для различных технологий обработки, например, режущие инструменты (сверла, фрезы), инструменты для обработки давлением (прокатные валки, штампы), горнорудное оборудование и т. д.

Если учесть, что повышение твердости инструмента в 1,3...1,5 раза обеспечивает увеличение его стойкости в десятки раз, то можно представить, какова будет экономическая эффективность от внедрения наноструктурных инструментальных твердых сплавов в промышленность.

Возможно также создание новых высокотвердых инструментальных материалов и прецизионных инструментов на основе углеродных

кластеров – фуллеренов, нанотрубок для испытания материалов. Например, на основе фуллеренов созданы пирамидальные инденторы для измерения твердости алмазов и алмазных пленок; нанотрубки используются в качестве игл (диаметром порядка нескольких атомов) сканирующих зондовых микроскопов и т. д.

### 7.5.3 Функциональные покрытия

Перспективным направлением генеративного формообразования является создание наноструктурных функциональных покрытий.

Благодаря применению высокотвердых *нанокристаллических износостойких покрытий* на основе нитридов, карбидов, боридов тугоплавких металлов, многослойных наноструктурных покрытий сложного состава, см. п. 7.3.5, п. 7.4.2, может быть существенно увеличена стойкость различных видов режущих инструментов и обеспечен значительный прогресс в направлении создания высокоэффективных *инструментальных материалов*, повышена стойкость деталей, работающих на трение и износ.

Разработаны составы и технологии нанесения *сверхтвердых наноструктурных покрытий* (имеющих микротвердость 40...80 ГПа), а также ультратвердых (с твердостью более 80 ГПа), уступающих по твердости только алмазу.

*Многофункциональные наноструктурные покрытия* находят успешное применение для защиты поверхности изделий и инструмента, подвергающихся одновременно различным видам износа, воздействию высоких температур, агрессивных сред. Это, прежде всего, режущий и штамповый инструмент, прокатные валки, детали авиационных двигателей, газовых турбин и компрессоров, подшипники скольжения, сопла для экструзии стекла и минерального волокна и т. д.

Многофункциональные наноструктурные покрытия также незаменимы для создания нового поколения биосовместимых материалов.

Другими примерами реального применения наноструктурных покрытий могут быть следующие:

- ◆ использование многофазных составов (например,  $TiB_2/MoS_2$ ) в качестве самосмазывающихся покрытий для космической техники;
- ◆ применение нанопокровтий (например, на основе  $TiO_2$  и полимерного связующего) для обеспечения водо- и маслоотталкивающих свойств поверхностей ряда изделий – автомобильных стекол, остекления

самолетов, корпусов резервуаров для хранения жидкостей, строительных конструкций и т. д.;

◆ применение керамических многофункциональных (износостойких, коррозионностойких) нанопокровов для повышения износостойкости валов винтов и перископов подводных лодок, в других узлах механизмов, работающих в условиях коррозионных сред. Планируется нанесение керамических нанопокровов на реактивные и дизельные двигатели для повышения их рабочих характеристик. Предполагается использование данных покровов также в медицине – в стоматологии и для имплантатов в ортопедии.

#### **7.5.4 «Интеллектуальные» материалы**

В последние годы особое внимание уделяется созданию так называемых «интеллектуальных» материалов и интеллектуализации промышленных технологических процессов производства.

«Интеллектуальные» материалы представляют собой логический результат исторического развития материалов в ряду: конструкционный материал → композиционный материал → функциональный материал → «интеллектуальный» материал.

Формирующиеся в настоящее время концепции «интеллектуальных» материалов связывают его функциональные свойства с качествами, присущими живому организму, т. е. со способностью объекта при внешнем воздействии распознавать возникшую ситуацию, реагировать на изменение окружающей среды (сенсорная функция); вырабатывать стратегию поведения, т. е. оценивать ситуацию и делать выводы (процессорная функция); возбуждать необходимую реакцию, т. е. проявлять исполнительное свойство, при котором материал совершает действие или подает сигналы (эффекторная функция). Подобные классы «интеллектуальных» материалов позволяют реализовать новые подходы в создании материалов с заранее заданными свойствами.

Предполагается, что существенный вклад в разработку и развитие указанной концепции, в формирование физических представлений, необходимых для создания данного класса материалов, должны внести нанотехнологии.

*В нанотехнологии «интеллект» материала, т. е. встроенная возможность реагировать на определенные внешние воздействия и*

*изменять в зависимости от этого свои свойства, проектируется на атомном и молекулярном уровне.*

Примерами проявления «интеллектуальности» материалов, формируемой с помощью нанотехнологий, могут быть следующие свойства.

◆ *Самодиагностика и самовосстановление* поврежденных структур в наномасштабе (выявление различного рода дефектов и их устранение); данное свойство уже частично реализовано для конструкционных полимеров.

◆ *Перестройка наноструктур при внешнем воздействии.* Например, под действием механических напряжений, превышающих критические значения, происходит не разрушение, как это наблюдается в традиционных материалах, а лишь перестройка структуры (углеродные кольца стенок нанотрубок в виде почти правильных шестиугольников меняют свою структуру, но не рвутся).

◆ *Молекулярное распознавание*, т. е. реакция материала на определенные химические, механические, электромагнитные возмущения или раздражители. Примером подобных материалов могут быть композиты с наполнителем из углеродных трубок, проявляющие высокую прочность при механическом нагружении. Другая возможность реализации данного свойства – создание наноматериалов с миниатюрными видеодатчиками и светоизлучающими элементами, обеспечивающими визуализацию невидимых в обычных условиях объектов. Применение подобных материалов возможно в медицине, военно-промышленном комплексе, бытовой промышленности.

◆ *Избирательная реакция* на различные внешние воздействия на молекулярном уровне. Например, присутствие в материале (кристаллическом, полимерном) пор наноскопического размера позволяет проходить молекулам или небольшим атомным кластерам одного вещества и задерживает молекулы другого, т. е. происходит нанофильтрация, которая находит применение в очистке воздуха, воды, создании тканей для производства одежды и т. д.

◆ *Проектируемый катализ*, т. е. контроль химической активности веществ на наноуровневом локальном масштабе, что позволяет значительно экономить сырье и получать заданную структуру материала.

Возможно создание «интеллектуальных» наноматериалов, которые обладают сочетанием нескольких из перечисленных свойств.

*Таким образом, проектирование на наноуровне позволяет создавать материалы, которые могут динамически реагировать на внешнее*

*воздействие, их поведением можно управлять по заранее созданной программе, и в этом плане они являются «интеллектуальными».*

### **7.5.5 Молекулярная и наноэлектроника**

Электронные приборы и устройства широко используются сегодня в технических средствах связи, автоматике, телемеханики, микропроцессорной и измерительной техники. Электроника как наука о взаимодействии заряженных частиц с электромагнитными полями и методах создания электронных приборов и устройств, используемых в основном для передачи, обработки и хранения информации, является одной из динамично развивающихся областей науки и техники и, несомненно, во многом определяет научно-технический прогресс.

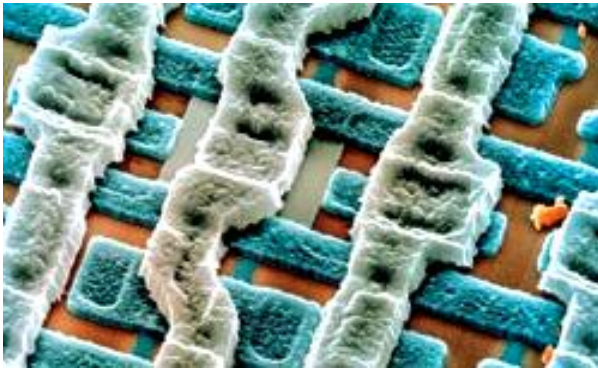
С начала XX в. развивалась главным образом вакуумная электроника, с начала 50-х гг. XX в. – твердотельная (преимущественно, полупроводниковая), на смену ей в начале 60-х гг. пришла микроэлектроника – направление электроники, связанное с созданием приборов и устройств в микроминиатюрном исполнении с использованием групповой (интегральной) технологии их изготовления. Микроэлектроника развивается в направлении уменьшения элементов, содержащихся в интегральных схемах (электронных «микрочипах», от англ. *chip* – тонкая пластинка), повышения их интеграции, плотности упаковки, а также использования различных по принципу действия приборов (опто-, акусто-, криоэлектронных, на магнитных доменах и т. д.).

*Микроэлектроника – яркий пример области, где уменьшение размеров элементов выступает основным средством прогресса технологии.*

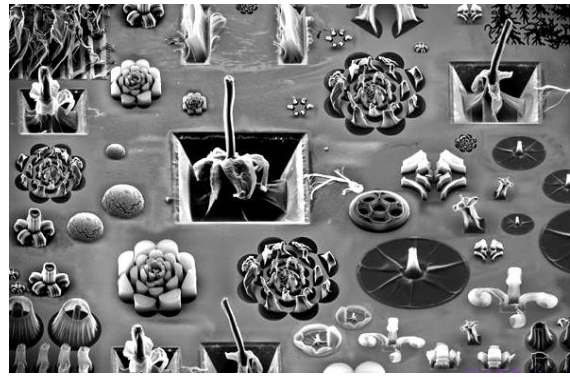
*Сегодня уже с полным правом можно говорить о молекулярной электронике и наноэлектронике как о принципиально новом этапе развития.*

*Оба направления связаны с применением нанотехнологий, которые позволяют улучшить в тысячи и миллионы раз быстродействие, объем памяти и функциональность электронных устройств и в такой же степени снизить их размеры, массу, энергоемкость, тепловыделение. Кроме того, нанотехнологии обеспечивают создание широкого спектра электронных приборов, производство которых иными средствами невозможно.*

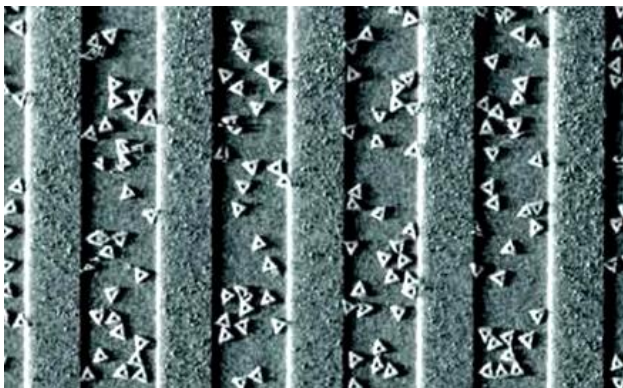
Именно в области электроники сделаны наиболее заметные практические шаги нанотехнологии, рис. 7.21.



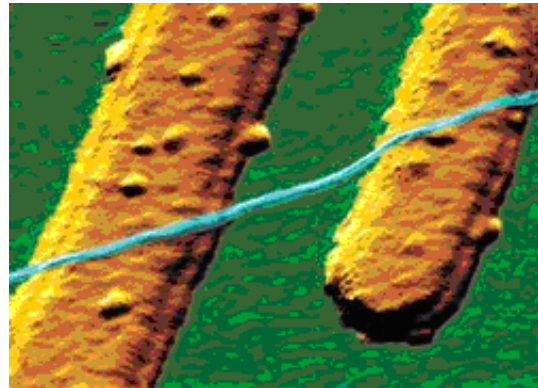
а



б



в



г

Рисунок 7.21 – Примеры применения нанотехнологий в электронике:  
 а – фрагмент микросхемы на наноструктурах; б – массив выращенных нанотрубок для создания электронных микросхем;  
 в – самосборка молекул ДНК (треугольные структуры), используемых в качестве «каркаса» для создания микросхем; г – самый тонкий в мире провод из углеродных нанотрубок толщиной ~ 10 атомов на фоне платиновых электродов

*Главной целью молекулярной электроники является создание сложных молекулярных систем, реализующих одновременно несколько различных эффектов и выполняющих сложные задачи. Роль функциональных элементов электронных устройств (сопрягающих элементов – проводов, переключателей и изоляторов, сборочно-монтажных установок, элементов памяти) выполняют отдельные молекулы.*

Не случайно основное внимание в этой области сосредоточено именно на молекулярных системах. Во-первых, молекула представляет собой идеальную квантовую структуру, состоящую из отдельных атомов, движение электронов в которой задается квантовомеханическими законами и является естественным пределом миниатюризации.

Другой, не менее важной, особенностью молекулярной технологии является то, что создание подобных структур возможно на принципе самоорганизации и самосборки, см. п. 7.3.3. *Именно с принципом самосборки связывают возможность проектирования завершенных технологических процессов для создания молекулярных электронных систем и дешевого производства их в промышленном масштабе.*

В настоящее время процессы самосборки (в том числе с использованием молекул ДНК, см. рис. 7.21, в) для производства элементов микроэлектроники уже начинают активно использоваться и в производстве. В частности, известная компания *IBM* внедряет эти процессы для создания компьютерных интегральных схем нового поколения, что, как ожидается, позволит существенно улучшить их характеристики.

Значительный эффект в области молекулярной электроники может быть достигнут в связи с *интеграцией фуллереноподобных структур и нанотрубок в электронные устройства.*

*Широкий спектр электрических свойств фуллеренов обеспечивает возможность получения электронных схем на их основе и создание в будущем «фуллереновой электроники». Фуллерены имеют шанс стать самой маленькой микросхемой в компьютерном процессоре.*

Благодаря разнообразным электрическим, оптическим и магнитным свойствам, высокой механической прочности и химической стабильности, а также связи между геометрической структурой и электронными характеристиками углеродные нанотрубки являются уникальным материалом для производства рабочих элементов электронных устройств нанометрового (молекулярного) размера, электронных логических схем, элементов памяти с рекордно малыми размерами, см. рис. 7.21, б.

В ближайшие 10...15 лет может начаться массовый переход с кремния (основного материала в производстве полупроводниковых устройств), возможности которого в плане дальнейшей миниатюризации электронных схем практически исчерпаны, на углеродные нанотрубки, которым отводится бесспорно лидирующее положение среди перспективных «претендентов».

Технология «нанотрубных» транзисторов позволит перейти на терабитный уровень плотности элементов ( $\sim 10^{11}$  транзисторов на  $1 \text{ см}^2$ ).

Использование нанотрубок в виде миниатюрных электрических проводников для изготовления микросхем, см. рис. 7.21, г, обеспечит решение проблемы тепловыделения, которая является доминирующей при повышении информационной мощности «чипов». Это объясняется тем, что

электрический ток протекает по нанотрубкам практически без выделения тепла, плотность тока достигает рекордных значений  $\sim 10^7$  А/см<sup>2</sup>, при которых традиционно применяемые медные проводники испаряются.

На основе углеродных нанотрубок возможно создание полупроводниковых гетероструктур, т. е. структур типа металл-полупроводник, используемых для создания одного из основных элементов электронных схем – выпрямляющего диода, а также транзисторов, сложных электронных приборов, состоящих из нескольких элементарных электронных устройств на одной трубке и т.д.

Технология изготовления подобных структур, см. п. 7.3.5.1, может быть существенно упрощена благодаря уникальному свойству углеродных трубок изменять электропроводность при изменении геометрии, в частности, при изгибе (замене двух углеродных шестиугольников в структуре нанотрубки пяти- и семиугольником), рис. 7.22. В результате одна часть изогнутой трубки оказывается металлической, другая – полупроводниковой, что и представляет собой молекулярный гетеропереход металл-полупроводник.

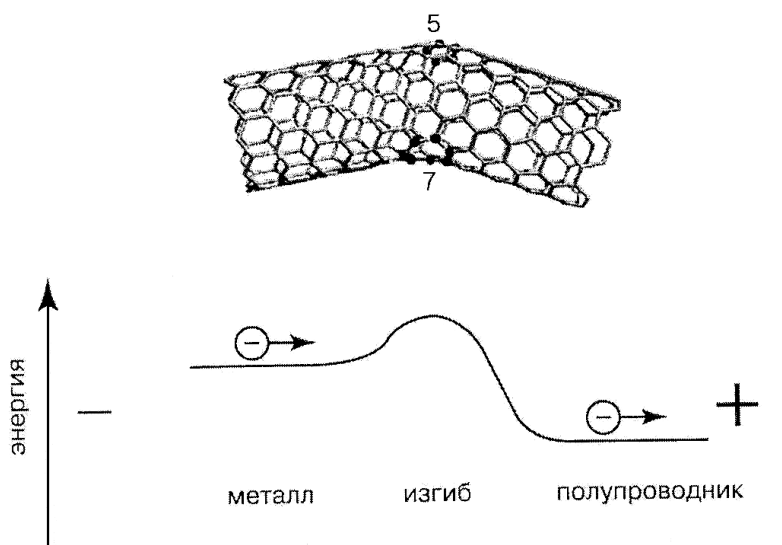


Рисунок 7.22 – Влияние изгиба углеродной нанотрубки на энергию подвижных электронов (электропроводность)

Перспективным направлением применения углеродных наноструктур в области электроники является также создание сложных электронных микросхем «наращиванием» с помощью сочетания генеративной технологии трехмерной печати (*3D Printing*) и нанотехнологии. Суть этого процесса состоит в том, что микросхемы с



требуемой «структурой» создаются с помощью струйного принтера, заправляемого содержащим нанотрубки раствором и «печатающего» проводящие слои из нанотрубок.

Существуют прогнозы по конструированию на основе углеродных нанотрубок энергонезависимых запоминающих устройств («*nonvolatile memory*»), способных сохранять свои молекулярные характеристики без внешнего физического контроля, в данном случае, без подачи напряжения. На базе подобных устройств планируется создание персональных компьютеров с «мгновенным запуском».

Новые возможности в повышении мощности, температурной и радиационной стойкости, расширении диапазона частот, улучшении эргономических характеристик электронных приборов открывает направление, в котором синтезируются идеи вакуумной и твердотельной электроники, – **наноэлектроника**. Именно в этой области ожидаются наиболее революционные достижения, приближающиеся к квантовым пределам, когда «работает» один электрон, один спин, квант магнитного потока, энергии и т. д.

Характерной особенностью развития микроэлектроники является закон Мура, согласно которому плотность монтажа элементов электронных устройств, определяющая быстродействие и мощность вычислительных систем, должна удваиваться каждые два года.

В соответствии с этим прогнозом отдельные элементы должны иметь размер в 2012 г. ~ 50 нм (в данный момент уже освоена технология ~ 45 нм и даже менее), в 2020 г. ~ 10 нм, а к 2035 г. элемент микросхемы будет состоять из нескольких атомов, а его размер окажется ~ 1 нм.

Таким образом, для обеспечения дальнейшего прогресса вычислительной техники на основе миниатюризации элементов микросхем в соответствии с критериями закона Мура необходимо привлечение нанотехнологий. При этом определяющее влияние на функционирование устройств электроники будут оказывать квантовомеханические эффекты.

Значительные перспективы развития наноэлектроники связывают со сверхтонкими слоями кристаллических веществ и многослойными полупроводниковыми гетероструктурами, полученными, например, методом молекулярно-лучевой эпитаксии, см. п. 7.3.5.1, благодаря которым сформировалось новое направление твердотельной электроники и появился целый ряд новых приборных направлений, в том числе приборов на квантовых ямах и квантовых точках.

Развитие нанотехнологии позволит сконструировать принципиально новые элементы интегральных схем, такие, например, как одноэлектронные запоминающие устройства на базе квантоворазмерных структур, одноэлектронные транзисторы, потребляющие предельно малые энергии на переключение. Применение подобных устройств позволит реализовать быстроедействие систем  $\sim$ ТГц, т. е.  $\sim 10^{12}$  операций в секунду, плотность записи информации  $\sim 10^3$  Тбит/см<sup>2</sup>, что на несколько порядков выше достигнутых сегодня параметров, а энергопотребление – на несколько порядков ниже. Наиболее распространенный процессор конца XX – начала XXI века *Pentium<sup>®</sup>Pro* имеет производительность  $\sim 3 \cdot 10^8$  операций в секунду.

Уменьшение до предельных значений элементов электроники способствует и миниатюризации электронных устройств на их основе, в том числе созданию сверхминиатюрных компьютеров.

Следующим этапом развития наноэлектроники и нанотехнологий в целом является создание *квантовых компьютеров*, позволяющих фантастически повысить быстроедействие, объем памяти и другие характеристики.

Идея создания квантовых компьютеров основана на применении квантовых вычислений с использованием в качестве логических констант квантовых свойств частиц, в частности, спина – собственного момента вращения электрона. При этом электрон является носителем одного бита информации; локализация электронов реализуется с помощью квантовых точек; ячейкой хранения информации является квантовый бит, или кубит (*quantum bit – qubit*).

Квантовые компьютеры смогут решить задачу моделирования нанообъектов, имеющую не только теоретическое, но и практическое значение, поскольку, как известно, компьютерное моделирование позволяет существенно сократить время и расходы на стадии разработки нового изделия, что весьма важно для нанотехнологического производства.

Первые попытки создать квантовый компьютер уже реализованы, рис. 6, а,б Приложения А1.

### **7.5.6 Нанофотоника**

В последние годы фотоника (*наука о генерации и управлении фотонами, т. е. квантами электромагнитного излучения, в узком смысле слова, света*) все чаще рассматривается в качестве альтернативы

электронике во многих областях науки и техники, связанных с коммуникационными или информационными технологиями. Эта тенденция объясняется тем, что использование фотонов вместо электронов в процессах передачи и переработки информации создает существенные преимущества, прежде всего, вследствие быстродействия и помехоустойчивости фотонных каналов связи.

Приборными применениями фотоники являются оптические, волоконно-оптические, оптоэлектронные устройства.

Последние годы отмечены быстрой миниатюризацией множества оптических устройств – резонаторов, волноводов, интерферометров и т. д. На этой основе уже возникла отрасль производства, позволяющая выпускать различные приборы подобного типа с размером структур менее 100 нм. Причем зачастую используются те же идеи и тенденции, на основе которых происходит миниатюризация и электронной техники.

Развитие нанофотоники осуществляется главным образом за счет сочетания фотонных и электронных компонент. Так, размеры многих оптических устройств могут быть значительно уменьшены при замене традиционно применяемых в этой области материалов (стекло, ниобат лития) на материалы полупроводниковой техники – кремний, арсенид галлия и т. д. Такие сверхмалые элементы могут быть в дальнейшем объединены в единую систему, что позволит создать высокоэффективные и многофункциональные оптические устройства переработки информации на одной микросхеме для последующей разработки гибридных электронно-фотонных систем со сложной структурой для информационных технологий.

Важным направлением миниатюризации фотонных устройств и их интеграции в сложные вычислительные системы является использование фотонных кристаллов – искусственно созданных периодических наноструктур, в которых электромагнитные волны некоторых частот (или диапазонов частот) не могут распространяться. На основе фотонных кристаллов могут быть созданы миниатюрные мощные нанорезонаторы, позволяющие локализовать электромагнитные поля в малых объемах в течение длительного времени, высокоэффективные светодиоды и лазеры, оптоволоконные волноводы, оптические переключатели и фильтры, биодатчики новых типов и т. д.

Развитие нанотехнологий способствует прогрессу волоконно-оптических систем связи, которые основаны на направленной передаче

световой энергии с помощью оптических волокон, состоящих из источника светового сигнала – излучателя, среды распространения – оптоволокну, приемника излучения – светочувствительного элемента, рис. 7.23.



Рисунок 7.23 – Схема волоконно-оптической линии связи

Увеличение пропускной способности волоконно-оптических каналов связи подразумевает, прежде всего, создание высокоэффективных излучающих и фотоприемных устройств.

Применяемые лазерные диоды в качестве излучателей и фотоприемные устройства являются типичным продуктом нанотехнологий, поскольку представляют квантоворазмерные гетероструктуры с характерной толщиной в несколько нанометров.

Перспективным направлением в развитии быстродействующих оптоволоконных линий связи для передачи информации является также использование атомных кластеров, которые позволяют создавать лазерные устройства с регулируемой длиной волны за счет изменения размера кластера. Развитие этого направления связано с нанотехнологией квантовых точек.

Дальнейшее совершенствование основного элемента волоконно-оптических каналов – оптоволокну также связывают с наноструктурами.

Важным прикладным направлением использования нанoeлектроники и нанофотоники является *существенное увеличение удельного веса использования электронных и оптоэлектронных компонентов в машиностроительных, химических, биологических и медицинских технологиях.*

Благодаря возможности создания с помощью нанотехнологии веществ и структур с заданным оптическим спектром можно «настраивать» источники и приемники излучения и селективно воздействовать на материалы и процессы; использование компактных мощных источников на основе наноструктур позволит развить высокоточные, экономичные и экологически чистые технологии обработки материалов.

### 7.5.7 МЭМС и НЭМС – технологии

В настоящее время одной из общих тенденций развития современной техники является миниатюризация функциональных устройств. В наиболее явном виде эта тенденция проявилась в процессе эволюции электронных компонентов, см.п. 7.5.5.

Вслед за электронными компонентами миниатюризация затронула и электромеханические устройства, т. е. устройства, преобразующие электрические величины – силу тока, напряжение в соответствующее линейное, угловое перемещение.

*Микроэлектромеханические системы (МЭМС) представляют собой трехмерные микрообъекты и микромашины: моторы, насосы, турбины, микророботы, микродатчики.* Промышленное производство МЭМС (технология их получения аналогична технологии производства микросхем) началось в конце 90-х годов, сейчас эти системы уже достаточно широко используются в различных сферах деятельности – телекоммуникации, транспорте, автомобилестроении, медицине и т. д.

*Одной из основных тенденций развития МЭМС является дальнейшая миниатюризация, уменьшение энергопотребления и увеличение числа функций системы, что во многом связано с возможностью использования в составе систем элементов, созданных на основе нанотехнологии.*

*Таким образом, следующий шаг развития – перенос электромеханических систем в наномир, т. е. создание наноэлектромеханических систем (НЭМС), рис. 7.24.*

*Наноэлектромеханические системы представляют собой совокупность электронных и механических элементов, выполненных в наноразмерном исполнении на основе интегрированных технологий. Эти объекты развивают «наносилы» под действием электрического поля или света, или, наоборот, при приложении внешней силы создают электромагнитный отклик.*

Приборы НЭМС, как правило, включают наночувствительный элемент, схему преобразования сигнала, системы управления, системы хранения и передачи информации.

*Создание НЭМС является новым этапом в создании устройств, интегрирующих сенсорную, логически-аналитическую, двигательную и исполнительную функции.*

Интеграция в одном устройстве МЭМС электроники и чувствительных наноэлементов породила огромное многообразие научных

проектов и прогнозов применения, многие из которых уже воплощаются в жизнь.

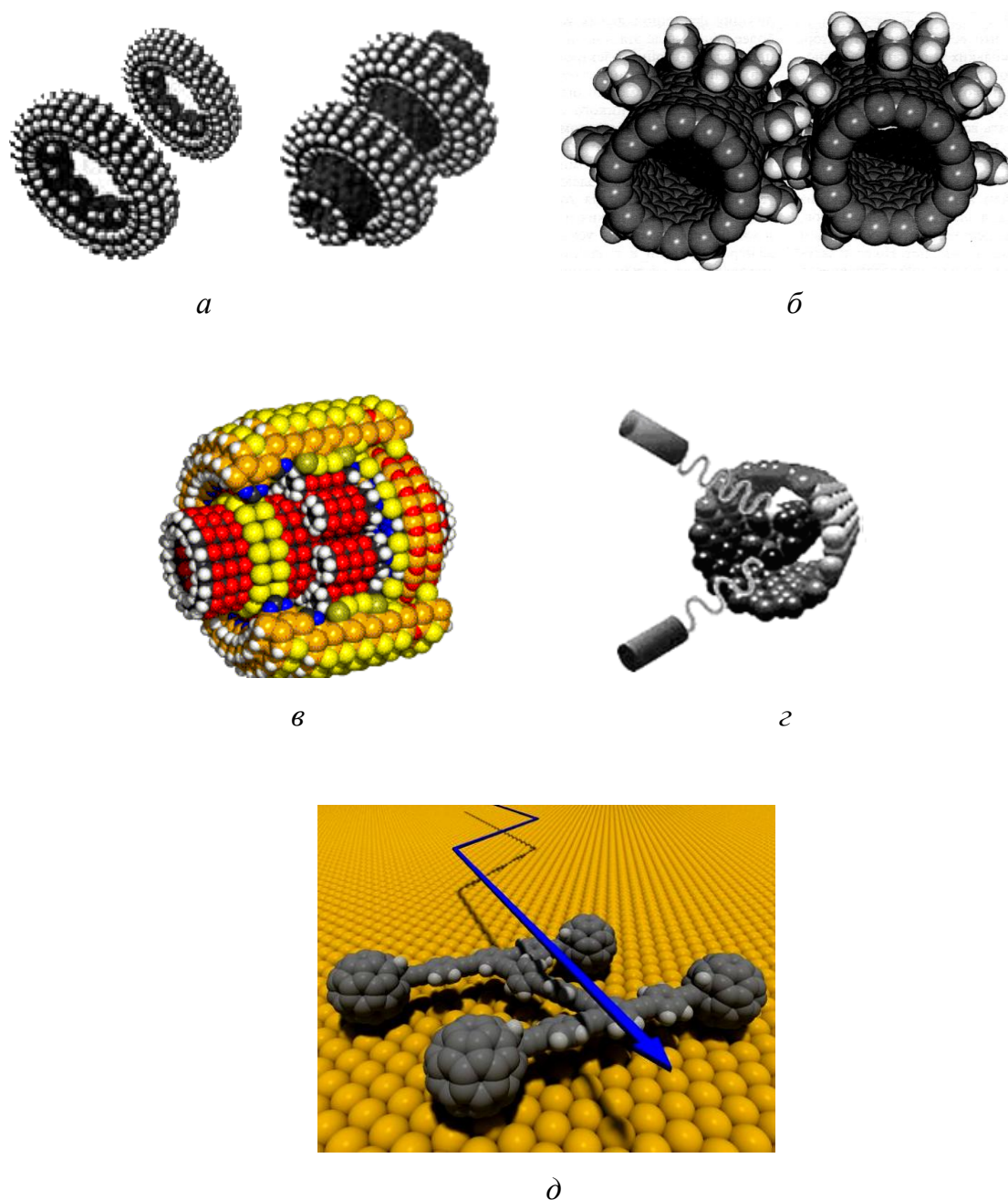


Рисунок 7.24 – Некоторые примеры НЭМС на основе наноматериалов:  
*а* – наноподшипники; *б* – наносшестеренки на основе углеродных нанотрубок;  
*в* – молекулярный редуктор; *г* – наномотор, приводимый в движение светом;  
*д* – «наноавтомобиль» из 300 атомов с колесами из молекул фуллерена, связанных химическими связями с «каркасом», ширина автомобиля ~ 4 нм

Именно на базе МЭМС и НЭМС планируется создание наноманипуляторов и нанороботов, нанокomпьютеров, целых нанолабораторий на кремниевой подложке для применения в вычислительной, телекоммуникационной, аэрокосмической технике и автомобилестроении, для создания средств обеспечения безопасности, в медицине, в бытовой технике.

Как ожидается, НЭМС произведут революцию в области *метрологии*, особенно при измерении чрезвычайно малых сил и смещений на молекулярном уровне.

Высокие скорости отклика системы на внешние силы позволят создавать на основе НЭМС чрезвычайно чувствительные измерительные устройства. Уже разработаны нанорезонаторы с фундаментальной частотой колебаний выше 10 ГГц ( $10^{10}$  Гц), которые нашли применение в качестве кантилеверов (упругой микроконсоли, по изгибу которой регистрируют силу взаимодействия зонда с поверхностью) в сканирующей зондовой микроскопии, см. п. 7.3.2, нановесов (с возможностью регистрации материала весом до  $10^{-14} \dots 10^{-15}$  г), нанотермометров, нанопинцетов и т. д.

К одному из важнейших перспективных классов НЭМС можно отнести также и наноактюаторы – молекулярные моторы с размерами до нескольких квадратных нанометров, которые могут использоваться в робототехнике, в управляющих устройствах, в космической технике, в биомедицине, в автомобилестроении и т. д.

Наибольший интерес в применении наноактюаторов представляет их использование в наноробототехнике, поскольку нанороботы можно рассматривать не только как целевой объект производства, но и оборудование для производства наноматериалов и наноконструкций, см. п. 7.3.2. В настоящее время активно развивается несколько проектов подобных нанодвигателей, в том числе с использованием биологических структур.

Очевидно, что для движения какого-либо объекта нужно подвести к нему и затратить некоторое количество энергии. В микро- и наносистемах вместо электромагнитного принципа преобразования энергии, используемого повсеместно в «макроэлектронике», часто используют пьезо- и сегнетоэлектрический, электростатический, туннельный эффекты; в зависимости от выбора принципа работы наноустройств подвод энергии к микро- или наноэлектромеханической системе может осуществляться электрически, термически или химически.

Одним из эффективных применений НЭМС является создание датчиков (сенсоров) различных величин – химических, биологических, радиационных, действие которых основано на наномасштабных эффектах.

Разработаны миниатюрные датчики (по сути, химические лаборатории, размещающиеся на пластине  $\sim 1 \text{ см}^2$ ), способные работать автономно в любых условиях и с помощью радиоволн объединяться в локальные сети для передачи собранной информации центральному компьютеру – самоорганизующиеся сенсорные сети.

Сенсоры могут использоваться для контроля состояния окружающей среды, мониторинга транспортных и коммуникационных систем (включая космические), поиска месторождений нефти и газа, получения информации о состоянии зданий и сооружений, дорог, загрязнения водоемов, в биологических, медицинских и военных целях и т. д., рис. 6, в–д Приложение А1.

Работы по внедрению подобных датчиков уже начаты, в ближайшие годы процесс их производства приобретет массовый характер.

### **7.5.8 Нанобиотехнология и наномедицина**

Одним из перспективных направлений применения нанотехнологий является биотехнология, т. е. совокупность методов для придания биологическим объектам заданных свойств с целью их использования в различных отраслях производства.

Сформировалось новое направление – **нанобиотехнология**, достижения которой уже используются в различных отраслях, например:

◆ *в машиностроении* – биомолекулы и микроорганизмы уже сегодня составляют основу примитивных наномашин, синтезирующих по заданной программе сложные полимеры и свои копии; молекулы ДНК собирают наночастицы в трехмерные структуры;

◆ *в электронике* – биологические объекты служат элементами микросхем и датчиков; на основе нейронов стало возможным соединение живых нервов с интегральными микросхемами;

◆ *в энергетике* – бактерии вырабатывают горючие газы и ликвидируют последствия нефтяных загрязнений; на основе бактерий уже создана «живая» нанобатарейка;

◆ *в экологии* – бактерии поглощают вредные вещества, очищают сточные воды, используются для утилизации отходов;



♦ в сельском хозяйстве – используются трансгенные (генетически измененные) растения и животные, биологические средства защиты растений и т. д.;

♦ в пищевой, фармацевтической, химической промышленности – бактерии производят многие продукты, пищевые добавки, синтезируют сложные вещества и контролируют состав растворов и т. д.

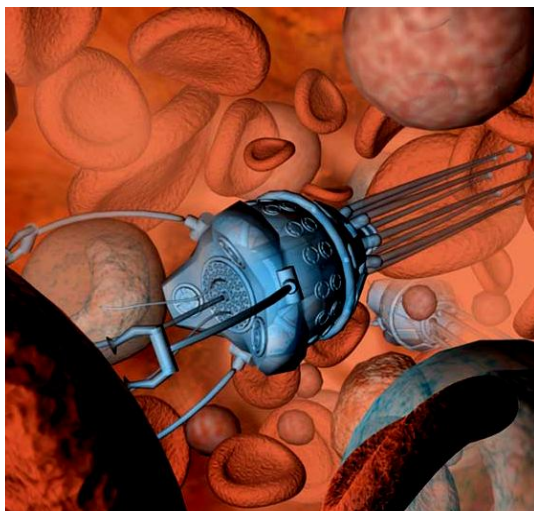
С развитием нанобиотехнологии тесно связана качественно новая область медицинской науки – **молекулярная наномедицина**, основными направлениями развития которой являются следующие:

♦ Создание диагностических лабораторий для биохимических анализов на «чипе» (*lab-on-chip*), способных заменить целый комплекс оборудования, см. рис. 6, в Приложения А1. Подобные продукты с использованием методов изготовления микросхем и МЭМС-НЭМС – технологий уже созданы, например, для проведения генетических анализов.

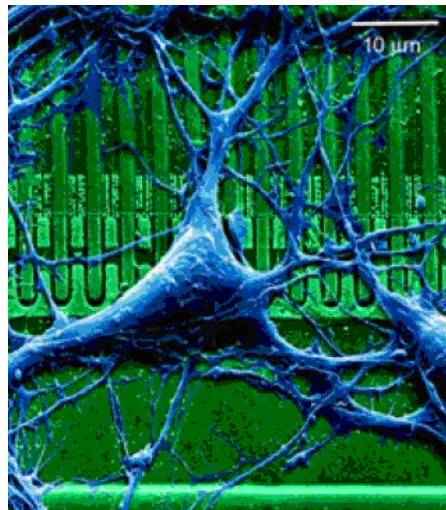
♦ Адресная доставка лекарств к пораженным органам и клеткам на основе создания молекулярных транспортеров.

♦ Диагностика заболеваний с помощью квантовых точек, обладающих флуоресцентными свойствами, гораздо более безопасными по сравнению с применяемыми для этих целей маркерами.

♦ Нанороботы для «ремонта» поврежденных клеток, диагностики и лечения заболеваний, рис. 7.25, а.



а



б

Рисунок 7.25 – Наноробот в кровеносной системе (а) и «нейрочип» (б)

◆ Новые лекарственные препараты, бактерицидные и противовирусные средства на основе наноматериалов. Например, на основе наночастиц созданы бактерицидные препараты для эффективного заживления ран, противовирусные аэрозоли, самодезинфицирующая одежда и т. д. Нанопорошки лекарственных препаратов используются в медикаментах быстрого усвоения и действия для экстремальных условий (ранения при катастрофах, боевых действиях).

◆ Наноимплантаты. В данном направлении уже достигнут значительный прогресс. Например, в качестве материала имплантатов, протезов, в травматологических устройствах уже используется наноструктурный титан, что обусловлено сочетанием его высоких механических свойств с высокой биологической совместимостью.

Перспективны для использования протезов, имплантатов также наноструктурные покрытия углерода, композиционные нанопокртия на основе углерода, кремния, соединений  $\text{SiO}_x$ ,  $\text{SiN}_x$ , титан-фуллереновые покрытия, обладающие высокой биосовместимостью, химической, термической и механической стойкостью.

◆ Нейроэлектронные интерфейсы, т. е. устройства, позволяющие соединять компьютеры с нервной системой, рис. 7.25, б.

## **7.6 Хронология создания и развития нанотехнологий**

*Нанотехнологии, безусловно, сегодня являются «передовой линией» развития цивилизации, ключевым понятием начала XXI века, символом новой, третьей, научно-технической (наноиндустриальной) революции, результаты которой обещают в будущем преобразить окружающий мир.*

Вместе с тем структуры и устройства нанометровых размеров существуют с незапамятных времен – в живой и неживой природе. Есть много примеров того, как человек только начинает открывать для себя явления и свойства наномира, которые природа давно освоила.

Например, фуллерены обнаружены в небольших количествах в природных минералах (шунгитовые породы, сформировавшиеся около 2-х миллиардов лет назад), метеоритах и межзвездных газах. Предполагается, что газонаполненные фуллерены сыграли определенную роль в эволюции атмосферы Земли.

Клетки живых организмов растут и делятся благодаря тому, что в них непрерывно идут взаимосвязанные процессы в наномасштабе. Если эти процессы останавливаются, клетки перестают быть живыми. Кстати, по одной из гипотез жизнь на Земле зародилась миллиарды лет назад в первичной субстанции из нанообъектов – липосом. Сегодня липосомы широко используют в нанотехнологиях.

Растение лотос замечательно тем, что его листья всегда остаются чистыми – в некоторых странах Востока это растение даже считают символом чистоты. Когда идет дождь, капли воды просто скатываются с листьев лотоса, увлекая за собой частицы грязи. Это свойство получило название «эффект лотоса», оно связано с уникальным строением поверхности листьев, содержащих многочисленные нановолоски. Именно эта структура во многом обеспечивает самоочистку листа и его водоотталкивающие свойства. Сейчас нанотехнологи стремятся использовать «эффект лотоса» в своих разработках самоочищающихся стекол, красок и тканей.

Моллюски, относимые к типу беспозвоночных животных, способны выращивать высокопрочные раковины на основе наночастиц мела, склеенных особой природной смесью белков с углеводами. При этом наноструктурированные «кирпичики» блокируют развитие трещин, появляющихся на внешней стороне.

Ящерица геккон перемещается, не догадываясь, что ей помогают законы наномира. На лапах ящерицы находится до миллиарда тончайших нановолосков особой формы, которые, соприкасаясь с поверхностью, притягиваются к ней за счет Ван-дер-Ваальсовых сил, действующих между молекулами (подобно «наноклею»). Эти крошечные силы в сумме удерживают вес геккона. Нанотехнологи уже создали экспериментальные аналоги таких «нанолипучек» на основе углеродных нанотрубок.

Примером естественного «интеллектуального» материала, способного работать на атомном и молекулярном уровне, является такой биологический объект, как человеческая кожа, способная самовосстанавливаться после порезов, травм, ранений.

Неосознанно элементы нанотехнологий используются человеком с давних времен.

В частности, исследованиями подтверждено, что нанотехнологические принципы использовали еще за 300 лет до н. э. древние индийские мастера, изготавливавшие из особой булатной стали (*wootz steel*) с большими присадками углерода (до 1,5 %) дамасские клинки, поверхность которых, как выяснили с помощью электронного микроскопа, содержит углеродные нанотрубки и нановолокна из цементита (карбида железа).

Римские стеклодувы (IV в. н. э.) в состав исходной массы стекла добавляли наночастицы серебра и золота, что изменяло цвет изделий при освещении (знаменитые рубиновые кубки), т. е. использовались необычные оптические свойства наночастиц благородных металлов, зависящие от их размера.

В состав витражных стекол, украшавших средневековые соборы, в качестве компонента также входили наночастицы металлов и оксидов.

К нанотехнологиям в строительном материаловедении можно отнести использование опыта древних римлян в применении вулканического пепла для повышения водостойкости известковых материалов.

Древнейшей областью применения нанотехнологий являются также медицина и косметология.

Подобных примеров можно привести бесчисленное множество.

*Предыстория современных нанотехнологий связана с многовековыми исследовательскими усилиями ученых многих стран мира.* Рассмотрим наиболее значимые этапы.

◆ ~ **2400 лет назад** впервые греческий философ Демокрит использовал слово «*атом*» для описания самой малой частицы вещества.

◆ **1661 г.** Ирландский физик и химик Р. Бойль, один из учредителей Лондонского Королевского Общества, в труде «Химик-скептик» указал на потенциальную важность *мельчайших частиц – кластеров* («корпускул»). Критикуя воззрение Аристотеля о материи, состоящей из четырех первооснов (земли, огня, воды и воздуха), автор предположил, что все материальные объекты состоят из сверхмалых корпускул, которые достаточно устойчивы и в разных сочетаниях образуют различные вещества и предметы. Впоследствии идеи Демокрита и Бойля были приняты научным сообществом.

◆ **1857 г.** Английский физик М. Фарадей, основоположник учения об электромагнитном поле, впервые получил устойчивые *коллоидные растворы* золота (жидкие системы с мельчайшими частицами дисперсной фазы, свободно и независимо друг от друга перемещающимися в процессе броуновского движения). Впоследствии коллоидные растворы стали широко использоваться для формирования наносистем.

◆ **1861 г.** Английский химик Т. Грэм ввел *деление веществ по степени дисперсности структуры* на коллоидные (аморфные) и кристаллоидные (*кристаллические*).

◆ **1883 г.** Впервые в современной истории нанотехнологический прорыв был достигнут американским изобретателем Д. Истменом, основателем известной компании *Kodak*, специализирующейся на производстве фото- и оптического оборудования и материалов. Д. Истмен создал рулонную фотопленку, представляющую собой нанесенную на прозрачную эластичную основу (например, из ацетата целлюлозы) эмульсию галогенида серебра, разлагающегося под действием света с образованием *наночастиц чистого серебра*, которые и являются пикселями изображения.

◆ **1900 г.** Немецкий физик М. Планк ввел понятие *кванта действия* (постоянная Планка) – исходного пункта для квантовой теории, положения которой существенны при описании поведения наносистем.

◆ **1905 г.** Первым ученым, использовавшим *измерения в нанометрах*, принято считать швейцарского физика Альберта Эйнштейна, который теоретически доказал, что размер молекулы сахара равен одному нанометру ( $10^{-9}$  м).

◆ **1924 г.** французский физик *Луи де Бройль* выдвинул идею о волновых свойствах материи, положив тем самым начало *квантовой механике*, изучающей движение микрочастиц. Законы квантовой механики особенно актуальны при создании наноразмерных структур.

◆ **1931 г.** Немецкие физики М. Кнолл и Э. Руска создали электронный просвечивающий микроскоп, ставший прообразом нового поколения устройств, которые позволили заглянуть в мир нанобъектов.

◆ **1939 г.** компания *Siemens* выпустила первый промышленный электронный микроскоп с разрешающей способностью  $\sim 10$  нм.

◆ **1959 г.** Американский физик, Нобелевский лауреат Р. Фейнман в знаменитой лекции в Калифорнийском технологическом институте, известной под названием «Там, внизу, еще много места» («*There's Plenty of Room at the Bottom*»), высказал идею управления строением вещества на атомарном уровне: «Научившись регулировать и контролировать структуры на атомном уровне, мы получим материалы с совершенно неожиданными свойствами и обнаружим совершенно необычные эффекты... Развитие техники манипуляции на атомарном уровне позволит решить многие проблемы». Эта лекция стала в определенном смысле стартовой площадкой для наноисследований. Многие идеи-предвидения, высказанные Р. Фейнманом, казавшиеся фантастическими (о гравировании линий шириной в несколько атомов посредством электронного пучка, о манипулировании отдельными атомами для создания новых малых структур, о создании электрических цепей нанометровых масштабов, о применении наноструктур в биологических системах), сегодня уже реализованы.

◆ **1968 г.** Сотрудники научного подразделения американской компании *Bell* А.Чо и Д. Артур разработали теоретические основы нанообработки поверхности.

◆ **1971 г.** Компаниями *Bell* и *IBM* получены первые полупроводниковые пленки одноатомной толщины – квантовые ямы, что послужило началом эпохи «практических» нанотехнологий.

◆ **1974 г.** Впервые термин «нанотехнология» введен японским физиком Н. Танигучи. Этот термин был использован для описания сверхтонкой обработки материалов с нанометровой точностью. Термином «нанотехника» было предложено называть механизмы размером менее одного микрометра.

◆ **1981 г.** Немецкие физики Г. Биннинг и Г. Рорер, сотрудники компании *IBM (International Business Machines Corporation)*, создали сканирующий туннельный микроскоп (Нобелевская премия 1986 г.) – первый прибор, позволяющий не только получать трехмерное изображение структуры из электропроводного материала с разрешением порядка размеров отдельных атомов, но и осуществлять воздействие на вещество на атомарном уровне, т. е. манипулировать атомами, а следовательно, непосредственно собирать из них любое вещество.

♦ **1985 г.** Коллектив ученых в составе Г. Крото (Англия), Р. Керла, Р. Смолли (США) и др. открыл *новую аллотропную форму существования углерода в природе – фуллерен* и исследовал его свойства (Нобелевская премия 1996 г.). Возможность существования сферических высокосимметричных молекул углерода была предсказана в 1970 г. японскими учеными Э. Осавой и З. Йошидой. В 1973 г. российские ученые Д.А. Бочвар и Е.Г. Гальперн теоретическими квантовохимическими расчетами доказали стабильность таких молекул.

♦ **1986 г.** Создан *сканирующий атомно-силовой микроскоп* (авторы – Г. Биннинг, К. Куатт, К. Гербер, сотрудники *IBM*, Нобелевская премия 1992 г.), позволивший, в отличие от сканирующего туннельного микроскопа, изучать атомарную структуру не только проводящих, но и любых материалов, в том числе органических молекул, биологических объектов и т. д.

♦ **1986 г.** Нанотехнологии стали известны широкой публике. *Базовая системная концепция*, осмыслившая предыдущие достижения, прозвучала в книге американского футуролога, сотрудника лаборатории искусственного интеллекта Массачусетского технологического института Э. Дрекслера «Двигатели созидания: наступающая эра нанотехнологии» («*Engines of Creation: The Coming Era of Nanotechnology*»). Автор предсказал активное развитие и практическое применение нанотехнологий. Этот прогноз, рассчитанный на многие десятилетия, оправдывается шаг за шагом с существенным опережением по времени.

♦ **1987 г.** Первый одноэлектронный транзистор создан американскими физиками Т. Футоном и Г. Доланом (компания *Bell Labs*).

♦ **1988-1989 гг.** Двумя независимыми группами ученых под руководством А. Фера и П. Грюнберга открыто явление гигантского магнитного сопротивления (*GMR*) – квантовомеханического эффекта, наблюдаемого в тонких пленках из чередующихся ферромагнитных и немагнитных слоев, проявляющегося в существенном уменьшении электрического сопротивления в присутствии внешнего магнитного поля. Использование данного эффекта позволяет производить запись данных на жестких дисках с атомарной плотностью информации (Нобелевская премия 2007 г.).

♦ **1989 г.** Продемонстрировано *первое практическое достижение нанотехнологии*: с помощью сканирующего туннельного микроскопа, произведенного фирмой *IBM*, американские исследователи Д. Эйглер, Э. Швейцер выложили три буквы логотипа компании («*IBM*») из 35 атомов ксенона путем их последовательного перемещения на поверхности монокристалла никеля.

♦ **1990 г.** Немецкие ученые В. Кретчмер и Д. Хаффман создали эффективную *технология синтеза фуллеренов*, что способствовало интенсивному изучению их свойств, определению перспективных областей их применения.

♦ **1991 г.** Японским физиком С. Ииджима открыта новая форма углеродных кластеров – *углеродные нанотрубки*, которые проявляют целый спектр уникальных свойств и являются основой для революционных преобразований в материаловедении и электронике.

♦ **1993 г.** В США организована *первая нанотехнологическая лаборатория*.

♦ **1994 г.** Впервые продемонстрирован *лазер на основе самоорганизованных квантовых точек* (Д. Бимберг, Германия).

♦ **1998 г.** Голландский физик С. Деккер создал *первый нанотранзистор на основе нанотрубок*.

♦ **1999 г.** Американские ученые М. Рид и Д. Тур разработали *единые принципы манипуляции как одной молекулой, так и их цепочкой*.

♦ **2000 г.** В США приступили к реализации *широкомасштабной программы исследований в области нанотехнологий*, названной Национальной нанотехнологической инициативой (*NNI*).

♦ **2002 г.** Сотрудники исследовательского центра компании *Hewlett Packard* (США) Ф. Кьюкес и С. Уильямс запатентовали *технология создания микросхем на основе пересекающихся нанопроводов со сложной логикой, реализованной на молекулярной уровне*.

♦ **2004 г.** В Манчестерском университете (Великобритания) создан *графен* – материал со структурой графита толщиной в один атом, перспективный заменитель кремния в интегральных микросхемах (За создание графена ученым А. Гейму и К. Новоселову в 2010 г. присуждена Нобелевская премия).



♦ **2005 г.** Компания *Altair Nanotechnologies* (США) объявила о создании *наноаккумулятора*.

♦ **2006 г.** Исследователи из Северо-Западного университета США разработали *первый «печатный станок» для наноструктур* – установку, позволяющую производить в наноразмерном диапазоне одновременно более 50 тысяч наноструктур с атомарной точностью и одинаковым молекулярным шаблоном на поверхности, что является фундаментом для будущего массового производства наносистем.

♦ **2006 г.** Американским ученым из *IBM* удалось впервые в мире создать *полнофункциональную интегральную микросхему на основе углеродной нанотрубки*.

♦ **2006 г.** Д. Тур из университета Райса (США) создал *первую движущуюся наносистему – молекулярную машину* размером ~ 4 нм.

♦ **2006 г.** Группа ученых из Портсмутского университета (Великобритания) разработала *первый электронный бионанотехнологический переключатель на основе ДНК*, который является перспективной основой для связи между «миром живых организмов» и «миром компьютеров».

♦ **2006 г.** Ученые из Калифорнийского технологического института (США) разработали *первый портативный биосенсор-анализатор крови* (портативную лабораторию, «*lab-on-chip*»).

♦ **2007 г.** Компания *Intel* (США) начала выпускать *процессоры, содержащие наименьший структурный элемент размером ~ 45 нм*.

Приведенные и другие исследования, открытия, изобретения дали мощный толчок применению нанотехнологических методов в промышленности. Началось бурное развитие *прикладной нанотехнологии*.

Появились первые коммерческие наноматериалы – нанопорошки, нанопокртия, объемные наноматериалы, нанохимические и нанобиологические препараты; созданы первые электронные устройства, сенсоры различного назначения на базе нанотехнологий; разработаны многочисленные методы получения наноматериалов.

Многие страны мира активно включились в исследования по проблемам нанотехнологий на уровне правительств и глав государств, оценив перспективы в будущем. В ведущих университетах и институтах мира (США, Германия, Япония, Россия, Англия, Франция, Италия,

Швейцария, Китай, Израиль и т. д.) созданы лаборатории и отделы наноструктур, которые возглавили известные ученые.

Нанотехнологии уже используются в наиболее значимых областях человеческой деятельности – радиоэлектронике, информационной сфере, энергетике, транспорте, биотехнологии, медицине, оборонной промышленности.

Сегодня в наноисследованиях задействовано более 50-ти стран мира. За уникальные результаты исследований в этой области присуждено 7 Нобелевских премий.

### **7.7 Потенциал и перспективы развития**

*Область нанотехнологий является самым финансируемым и наиболее динамично развивающимся видом научно-исследовательской деятельности в мире. Объемы капиталовложений в развитие нанотехнологий в промышленно развитых странах ежегодно удваиваются, в ряде стран и регионов (США, Япония, Россия, Китай, Европейский союз) создаются приоритетные целевые программы.*

Примером может быть долгосрочная программа США «Национальная нанотехнологическая инициатива» по развитию нанотехнологий с государственным финансированием в 3,4 миллиардов долларов ежегодно, долгосрочные нанотехнологические программы Японии, создание «Российской корпорации нанотехнологий» и т. д.

Быстрый рост вложений в нанотехнологии за последние годы обусловлен осознанием фактического прогресса в этой области исследований и разработок.

Уже сегодня мировая промышленность использует нанотехнологии в процессе производства как минимум 80 групп потребительских товаров и свыше 600 видов сырьевых материалов, комплектующих изделий и промышленного оборудования; в обороте находится более 5 тысяч товаров – продуктов наноиндустрии.

По прогнозам американской ассоциации *National Science Foundation*, в ближайшие 10...15 лет мировой рынок наноматериалов и нанотехнологий превысит 1 триллион долларов, около 50 % ВВП будет получено с помощью нанопродукции. Предполагается, что основными

секторами рынка продукции нанотехнологий станут следующие (миллиардов долларов в ближайшие 10 лет): наноматериалы – 350, наноэлектроника – 300, фармацевтика – 180, катализаторы – 100, экология – 100, транспорт – 70.

Развитие нанотехнологий и последствия их использования носят глобальный характер, затрагивают все сферы человеческой деятельности – промышленность, информационную среду, здравоохранение, экономику, социальную сферу.

Нанотехнологию можно, таким образом, рассматривать как технологию общего назначения, которая, возможно, приведет к радикальному изменению и промышленности, и всей человеческой жизни в целом.

Принципиальной особенностью нанотехнологии является **междисциплинарность**, и во всех своих проявлениях нанонаука выступает в качестве объединяющего начала в физике, химии, биологии, материаловедении, вычислительной технике, информационных технологиях, электронике и т. д. Такое «перекрытие» и наложение наук должно привести к синергетическому эффекту, т. е. их взаимодействию, усилению и созданию новых возможностей технологического развития.

Поэтому в ближайшем будущем человечеству придется, по всей видимости, пережить период бурного, экспоненциального роста новых технологий, связанного со слиянием целого ряда традиционных наук и их взаимным обогащением.

*Ведущие эксперты предсказывают грядущую интеграцию (слияние) технологий, в которой нанотехнологии, биотехнологии, информационные технологии и нейророботика создадут принципиально новую эволюционирующую промышленность будущего, полностью автоматизированную и развивающуюся по своим законам, рис. 7.26.*

Интеграция технологий позволит создать единую научно-техническую картину мира, основанную на сложном единстве материального мира (от нанопроцессов до макроскопических явлений), обусловленном иерархичностью, взаимосвязью и трансформацией его компонент.

Возможно, именно на основе конвергенции технологий будут разработаны новые процессы обработки материалов и создания конструкций, приборов, устройств, объединяющие нисходящие (*top-down*) и восходящие (*bottom-up*) технологии производства, а также технологии разного уровня (макро-, микро-, нано-).



Рисунок 7.26 - Интеграция технологий

Перспективные проекты в области развития нанотехнологий можно представить следующим образом.

◆ *Краткосрочная перспектива* (от 10 до 20 лет):

- промышленное производство наноматериалов композиционного и инструментального назначения, биологически совместимых;
- производство одномерных химических и биологических датчиков, портативных медицинских диагностических устройств;
- производство микро- и нанoeлектромеханических устройств (МЭМС-НЭМС).

◆ *Среднесрочная перспектива* (до 30 лет):

- создание новых типов композиционных материалов с новыми функциональными свойствами на основе сочетаний различных нанобъектов;
- появление иерархически структурированных наноматериалов и освоение самосборки в нанотехнологических процессах, в том числе с участием углеродных нанокластеров, биологических структур;
- использование наноизмерительной техники в производственных процессах;
- начало производства двумерных наноэлектронных устройств (устройств памяти, дисплеев, солнечных батарей);
- эффективное использование наноустройств для аккумуляции и преобразования энергии;

- развитие методов и средств адресной доставки лекарств в организме, производство имплантируемых медицинских наноустройств.

◆ *Далекая перспектива* (более 30 лет):

- развитие трехмерной электроники;  
- самосборка биологических структур для восстановления частей человеческого организма, создание искусственных органов на молекулярном уровне, разработка искусственных хромосом;

- создание управляемых биологических и биоподобных систем, наноробототехнических систем;

- использование квантовых компьютеров для расчета характеристик молекул и других нанообъектов;

- массовое производство нанотоваров.

*К наиболее смелым долгосрочным прогнозам практического применения нанотехнологий, сегодня воспринимаемым как фантастические, могут быть отнесены следующие:*

◆ Организация на основе системы «нанокomпьютер – наноманипулятор» сборочных автоматизированных комплексов, способных собирать любые макроскопические объекты по заранее разработанной трехмерной сетке расположения атомов. Это позволит упразднить имеющийся в настоящее время комплекс предприятий, производящих продукцию с помощью «объемной» технологии, достаточно будет спроектировать в компьютеризированной системе любой продукт – и он будет собран и размножен сборочным комплексом.

◆ *Создание дубликаторов материи.* Комплекс роботов (дизассемблер) будет разбирать на атомы исходный объект, а другой комплекс (ассемблер) будет создавать копию, идентичную, вплоть до отдельных атомов, оригиналу (реализация идеи Э. Дрекслера, см. п. 7.3.2).

◆ *Изменение на основе нанотехнологий принципа конструирования изделий,* что позволит создавать машины и механизмы, ранее недоступные человеку из-за отсутствия технологий сборки и конструирования. Механизмы будут состоять, по сути дела, из одной очень сложной детали.

◆ *Объединение нескольких ключевых элементов компьютеров (процессора, памяти, жесткого диска) в одно устройство,* что обеспечит уменьшение энергопотребления и увеличение скорости обработки информации. В перспективе данная технология позволит создать

мультимедийные устройства с одной микросхемой, в которой будет заложена вся вычислительная электроника и память.

◆ *Преобразование с помощью механоэлектрических нанопреобразователей любых видов энергии с большим КПД и создание эффективных устройств для получения электроэнергии из солнечного излучения с КПД ~ 90%.*

◆ *Существенное увеличение сырьевых запасов человечества благодаря глобальному контролю за рециркуляционными системами, за счет перевода промышленности и сельского хозяйства на безотходные нанотехнологические методы. Для постройки большинства объектов нанороботы будут использовать атомы самых распространенных элементов (углерод, водород, кремний, азот, кислород и т. д.).*

◆ *Глобальный экологический и климатический контроль за счет системы взаимодействующих нанороботов, работающих синхронно. Возможно будет осуществление детектирования и фильтрации бактерий и токсинов, очистка источников воды от тяжелых металлов и органических загрязнений и т. д., предупреждение природных катаклизмов.*

◆ *Совершенствование нейроинтерфейсов и имплантов, реализация их биологической совместимости с нервными тканями человека, что создаст условия для «настоящей» виртуальной реальности и полноценного взаимодействия с компьютерами через нервную систему человека. Благодаря этому компьютерная техника трансформируется в единую глобальную информационную сеть огромной производительности.*

◆ *Нанотехнологии станут неотъемлемой частью будущих космических проектов. Нанороботы способны будут воплотить в жизнь мечту фантастов о заселении иных планет. Освоению космоса будет предшествовать «работа» нанороботов, которые смогут соорудить из «подручных» материалов (метеоритов, комет) космические станции. Это будет намного дешевле и безопаснее существующих ныне методов. Исследователи из NASA и компания *LiftPort Inc.* предлагают упростить вывод крупных объектов на орбиту, используя систему, названную ими "космическим лифтом", на основе сверхпрочных углеродных нанотрубок (впервые идея создания подъемника такого рода была высказана в 1895 году К. Циолковским).*

◆ *Создание наномедицинских роботов и продление человеческой жизни*; перестройка человеческого тела для качественного увеличения естественных способностей; обеспечение организма дополнительной энергией. *Конструирование нанороботов-врачей*, которые способны "жить" внутри человеческого организма, устраняя все возникающие повреждения или предотвращая их возникновение. Теоретически нанотехнологии способны обеспечить человеку физическое бессмертие за счет того, что наномедицина сможет бесконечно регенерировать отмирающие клетки.

◆ За счет внедрения логических наноэлементов во все атрибуты окружающей среды она станет «разумной» и исключительно комфортной для человека. *Нанотехнологии кардинальным образом изменят все сферы жизни человека.*

Безусловно, прогноз – дело рискованное и неблагодарное, тем более в долгосрочной перспективе, поэтому, возможно, самые важные и интересные эффекты нанотехнологий еще подлежат открытию, что приведет к множеству непредсказуемых сегодня возможностей и применений.

## **7.8. Вопросы для самостоятельного контроля**

1. Какие размеры включает наномасштаб и какими факторами ограничен его диапазон?
2. Что подразумевают понятия «нанотехнологии» и «наноматериалы»?
3. В чем состоит принципиальная особенность генеративных интегрированных технологий наноуровня?
4. Какие элементарные объекты конструирования материалов и устройств на наноуровне Вам известны?
5. Каковы основные механизмы генеративных методов нанотехнологического производства?
6. В чем сущность механосинтеза с помощью сканирующей зондовой микроскопии как метода предельной миниатюризации при создании наноустройств?

7. Какую роль играют процессы самосборки как технологии создания материалов и устройств на атомно-молекулярном уровне?

8. Что представляют собой нанокластеры как элементарный объект нанотехнологий и каковы особенности конструирования материалов на их основе?

9. Дайте характеристику структуры и свойств углеродных нанокластеров (фуллеренов, нанотрубок). Каковы особенности их применения как элементарных объектов нанотехнологий?

10. В чем состоит сущность nanoориентированных технологий конструирования поверхности?

11. Какие особенности имеет нанотехнологический подход формообразования нанослойных и нанокристаллических покрытий?

12. Укажите специфику химических, физических, механических и эксплуатационных свойств наноматериалов по сравнению с традиционными аналогами.

13. Какие особенности структуры определяют «аномальные» свойства наноматериалов?

14. Каковы принципы классификации и основные группы наноматериалов?

15. Назовите основные перспективные области применения наноматериалов и нанотехнологий.

16. Какую роль играют наноматериалы в создании нового поколения конструкционных и инструментальных материалов?

17. Каковы свойства и основные направления практического применения наноструктурных покрытий?

18. Что представляют собой «интеллектуальные» материалы? Как формируется «интеллект» материалов на атомном и молекулярном уровне?

19. Каковы перспективы применения генеративных технологий наноуровня в развитии микроэлектроники, МЭМС-технологий, фотоники?

20. Какие направления развития биотехнологии и медицины связывают с применением наноматериалов и нанотехнологий?

21. Назовите основные хронологические события в создании и развитии нанотехнологий.

22. В чем состоит роль нанотехнологий в интеграции традиционных наук и технологий?



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Промышленное производство, осуществив переход от одной эпохи технических революций к другой, изменило тенденции своего развития, ориентируясь на новые ключевые технологии – информационные, коммуникационные, микро-, нано-, опто-, био- и гентехнологии. Именно эти ключевые технологии и составляют суть перехода от общества индустриального к научному, который сулит еще не до конца осознанные перемены.

Производственные технологии изготовления и в перспективе будут обязательно востребованы, поскольку постоянно подстраиваются к новым тенденциям с тем, чтобы, с одной стороны, обеспечить потребности людей, а с другой – заранее подготовить обеспечение, необходимое для ключевых технологий (миникомпьютеры, нанороботы, наноэлектроника, микроизделия, новые материалы, обладающие уникальными свойствами, новые механо-физико-химические эффекты и т. д.).

Повсеместный переход к высоким интегрированным технологиям требует соответствующего кадрового обеспечения. Глубокая специализация инженеров должна происходить на базе широкой интегрированной подготовки – конструкторско-технологическо-экономической. В качестве такого разносторонне одаренного инженера первый ректор первого инженерного вуза в Украине – Харьковского практического технологического института – Виктор Львович Кирпичев называл величайшую личность эпохи Возрождения – Леонардо да Винчи. К этому же образу был близок Герон – по прозвищу Механик, работавший в Александрии во времена Цезаря, спектр работ которого поражает своей широтой.

Разносторонней подготовкой должен обладать любой специалист, работающий в области интегрированных генеративных технологий, являющихся по своей сути междисциплинарным направлением. Это диктуется еще и тем, что существует очевидная диалектическая связь, с одной стороны, между техническими науками и естественными, материаловедческими, а, с другой стороны, между ключевыми процессами и производственными технологиями изготовления.

Станут доступными новые принципы конструирования поверхности и поверхностного слоя изделий, базирующиеся на таких достижениях, как:

- создание материалов с новым уровнем физико-механических свойств;

- создание наноматериалов и нанообъектов;
- прецизионные способы обработки;
- ультрапрецизионные способы обработки;
- технологическое управление состоянием материала поверхностного слоя;
- целенаправленное изменение состава и структуры материала поверхностного слоя локальным лазерным и другими видами воздействия;
- физико-химические способы формообразования (атомно-молекулярный уровень);
- синтез многослойных покрытий;
- 3D измерения поверхности;
- физические методы исследования материала поверхностного слоя;
- нанотехнологии и т. д.

Реализация этих принципов откроет новые возможности получения поверхностей, поверхностного слоя с наперед заданными функциональными свойствами принципиально нового уровня.

Сочетание возможностей лазерной, компьютерной, вакуумной техники, материаловедения, химии полимеров и порошковых процессов, 3D-моделирование обеспечили основу для создания абсолютно новых высокотехнологичных наукоемких генеративных методов изготовления (*Rapid Prototyping, Rapid Tooling, Rapid Manufacture*), занявших важную нишу в триаде макро- микро- нанометрического уровней изготовления. Появление микростереолитографических методов показало, что для *Rapid*-технологий деление на макро- и микрометрические уровни достаточно условно.

Устойчивые позиции, которые уже сейчас заняты генеративными технологиями, реализующими принцип «от малого к большому», в областях автомобиле- и машиностроения, в авиации, приборостроении, электронике, бытовой технике, медицине, истории, в сфере культуры, архитектуры, молекулярной биологии и т.д. можно рассматривать как свидетельство того, что использование потенциала технологий послойного выращивания изделий в будущем даст очень много нового.

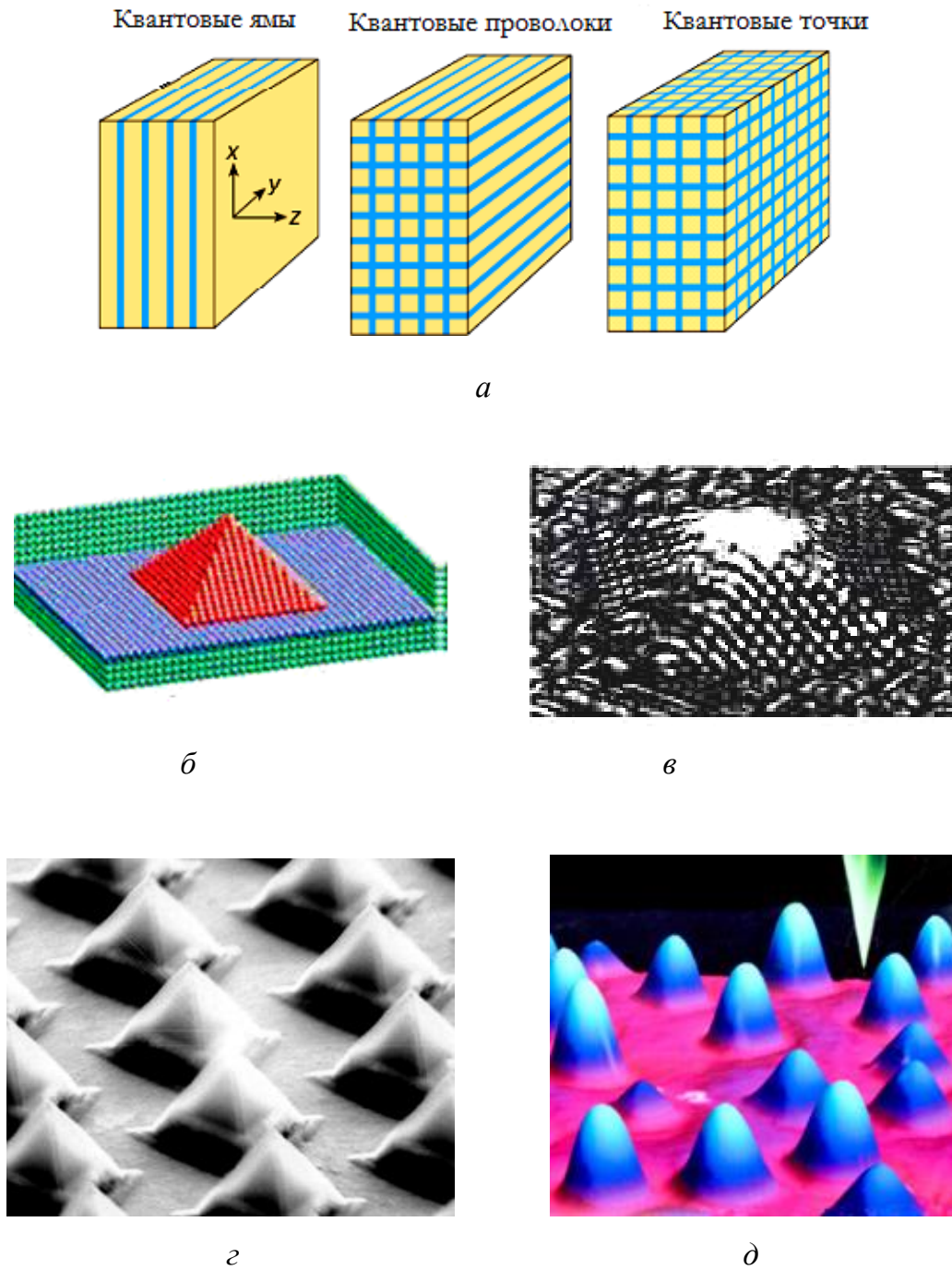
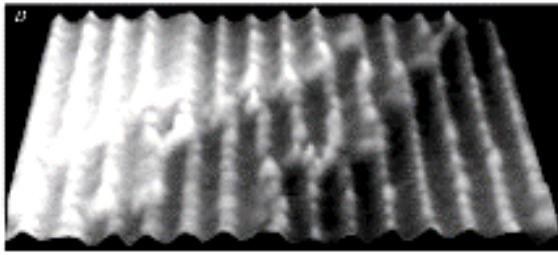
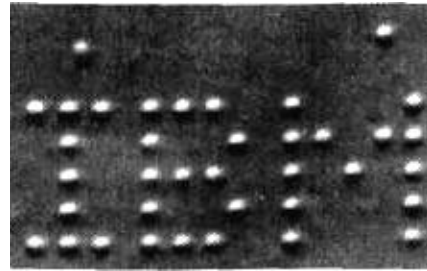


Рисунок 1 – Квантоворазмерные структуры на основе наноматериалов:

- a* – геометрические области квантования;
- б* – модель квантовой точки;
- в* – изображение квантовой точки, образованной самосборкой атомов германия (германиевая пирамида);
- г* – матрица пирамидальных квантовых точек из GaAs;
- д* – «атомный пейзаж» из квантовых точек



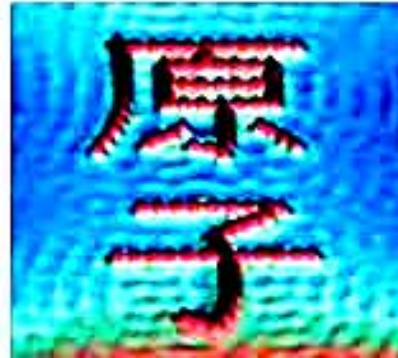
*а*



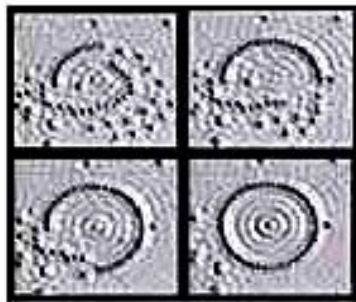
*б*



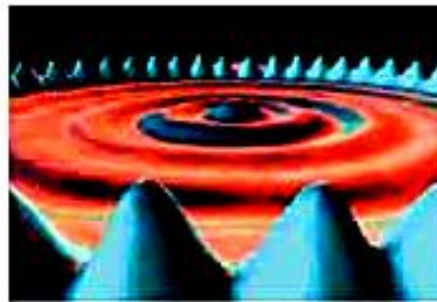
*в*



*г*



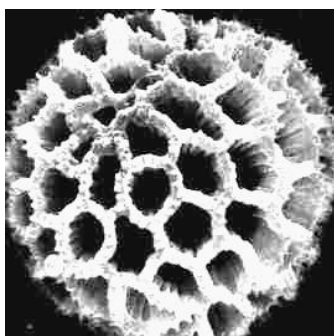
*д*



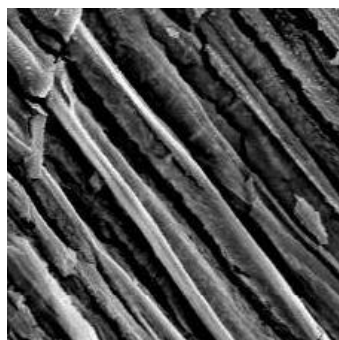
*е*

Рисунок 2 – Примеры «атомного дизайна» поверхности с помощью различных методов зондовой сканирующей микроскопии:

- а* – исторически первое СТМ-изображение с атомным разрешением: поверхность золота, на которой отчетливо видны ряды атомов;
- б* – первое практическое достижение нанотехнологии: надпись «IBM», выполненная 35-ю атомами ксенона на поверхности монокристалла никеля с помощью сканирующего туннельного микроскопа;
- в* – «пляшущий человечек», выложенный молекулами монооксида углерода;
- г* – иероглифы, выложенные атомами железа на поверхности меди;
- д* – поатомная сборка «квантового загона» для электрона из 48 атомов железа на поверхности кремния; *е* – в собранном «загоне» видны стоячие волны электронной плотности захваченного ловушкой электрона



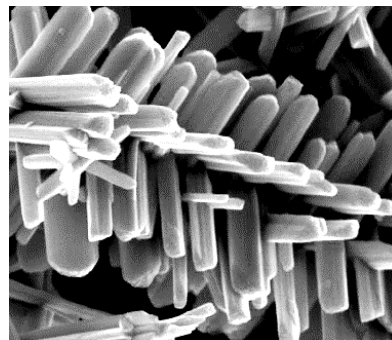
*a*



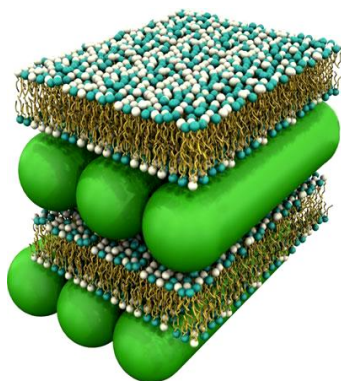
*б*



*в*



*г*



*д*

Рисунок 3 – Примеры структур, полученных самоорганизацией и самосборкой:  
*a* – керамический носитель катализатора для различных химических процессов;  
*б* – керамика с полыми каналами, которая может быть использована как компонент композита, как носитель катализатора, а так же как капиллярная среда для теплообменников; *в* – нитевидные кристаллы для создания высокопрочных композитов; *г* – массив самоупорядоченных «ветвистых» нанокристаллов двух полупроводников с разным типом проводимости для создания термоэлектрических элементов; *д* – слоистая биологическая структура, полученная на основе принципов самоорганизации и самосборки, для применения в биосенсорах и для точной доставки лекарственных препаратов

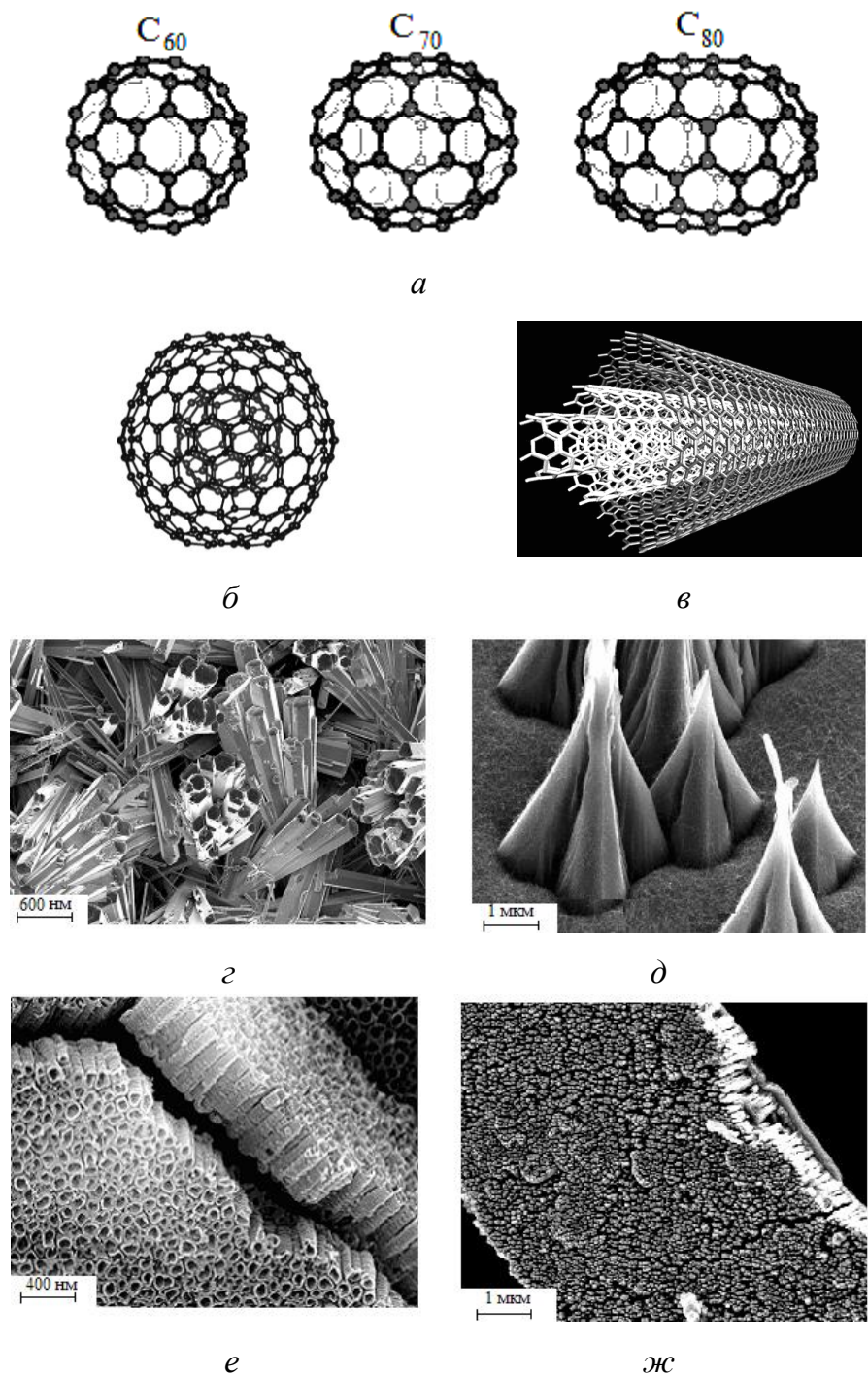


Рисунок 4 - Примеры структур на основе углеродных кластеров  
*a* – фуллерены  $C_{60}$ ,  $C_{70}$ ,  $C_{80}$ ; *б* – многослойный фуллерен  $C_{60}/C_{240}$ ;  
*в* – многослойная нанотрубка; *г* – «колонии» углеродных нанотрубок;  
*д* – «связки» углеродных нанотрубок на поверхности кремния; *е* – материал на  
основе множества слоев углеродных нанотрубок, наполненных золотом,  
предназначенный для преобразования радиационной энергии в электрическую;  
*ж* – «наноковер» из углеродных нанотрубок одинакового размера,  
используемый в качестве фильтра

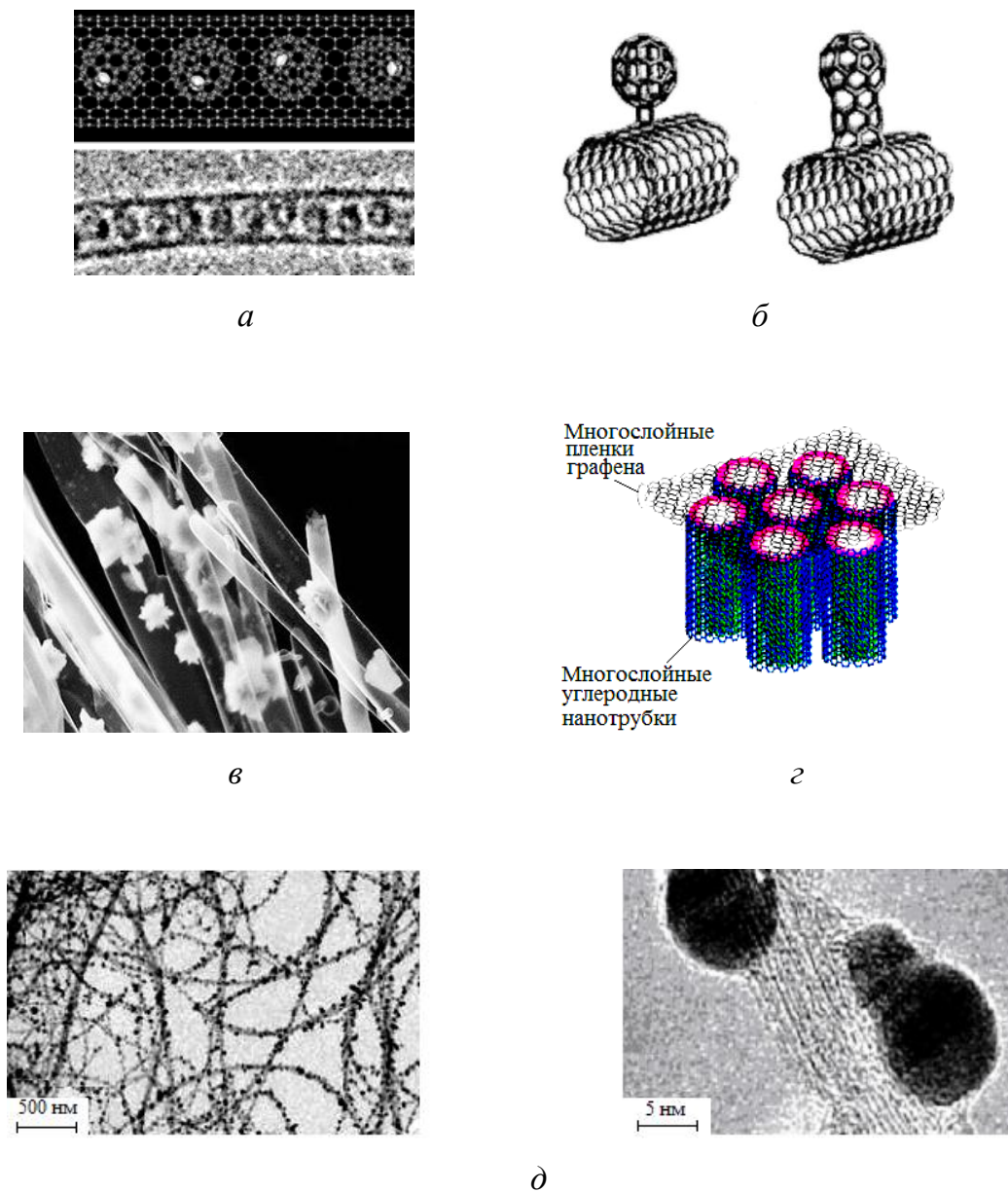
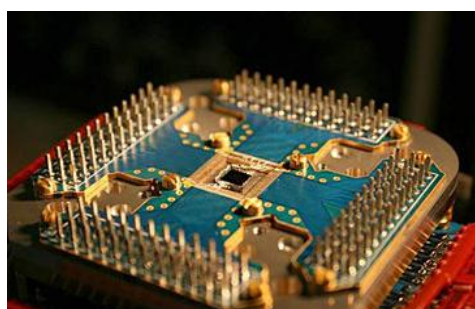
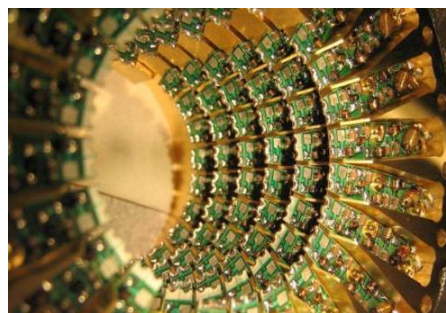


Рисунок 5 – Примеры композиционных структур на основе различных наноматериалов:

- a* – композиционный материал «фуллерен-нанотрубка» (схематическое представление и СТМ-изображение): внутри углеродной нанотрубки находится цепочка из фуллеренов  $C_{60}$  с внедренными в них атомами гадолиния Gd;
- б* – «гибридный наноматериал» из одностенных углеродных нанотрубок, к внешней стороне которых «привиты» молекулы фуллеренов;
- в* – композиционный материал «нанотрубки-наночастицы» на основе углеродных трубок с наночастицами кобальта в их полости; *г* – композиционные материал из самоорганизованных углеродных нанотрубок и самоорганизованных многослойных пленок графена (пленок со структурой графита толщиной в один атом); *д* – композит из углеродных нанотрубок с осажденными на них наночастицами серебра



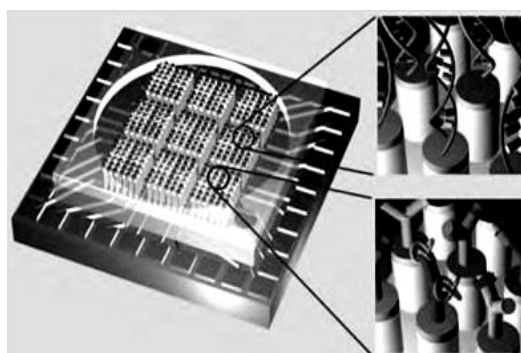
*a*



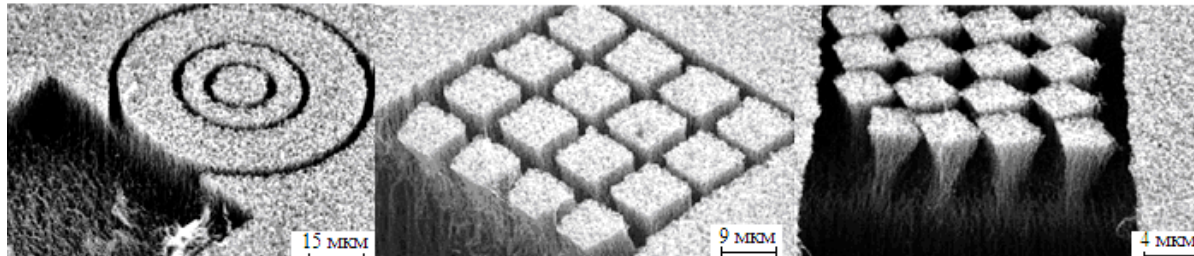
*б*



*в*



*г*



*д*

Рисунок 6 – Примеры применения нанотехнологий в различных отраслях:  
*a* – прообраз квантового компьютера (250 атомов цезия «заперты» с помощью лазера в оптической решетке); *б* – квантовый компьютер (компания *D-Wave Systems*, Канада); *в* – интегрированный прибор «*lab-on-chip*» медицинского назначения, позволяющий провести скоростной генетический анализ биологических материалов: H1-H4 – нагреватели и термодатчики; *г* – общий вид биодатчика (углеродные нанотрубки на кремниевом «чипе»);  
*д* – формообразование трехмерных структур для наносенсоров различного назначения с помощью интегрированной *RP*-нанотехнологии («выжигание» лазером на поверхности массива нанотрубок)



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

### Литература к разделу 1

1. Введение в организацию производства : учеб. пособ. / Весткемпер Э., Декер М., Эндоуби Л. и др.; под общ. ред. А.И. Грабченко. – Х.: НТУ «ХПИ», 2008. – 376 с.

2. Грабченко А.І., Везуб М.В., Внуков Ю.М., Мельничук П.П., Виговський Г.М. Робочі процеси високих технологій у машинобудуванні : підручник для студентів вищих навчальних закладів. – Житомир: ЖДТУ, 2003. – 451 с.

3. Lean Production. Tagunseand. Band 1 und 2 – Technische Universität Otto von Guericke Magdeburg, 1992.

4. Інтегровані технології і підготовка керівників технічного прогресу / Грабченко А.І., Грабченко Н.І., Кавалець М., Лієрат Ф., Мамаліс А. // Проблеми та перспективи формування національної гуманітарно-технічної еліти – Х., НТУ „ХПІ”. – 2002. – С. 118–123.

5. Технологичность конструкции изделия : справочник / под ред. Ю.Д. Амирова. М.: Машиностроение, 1990. – 768 с.

6. Скородумов С.В. Создание и развитие систем компактного интеллектуального производства // Литейное производство. – М. – №7. – 1999. – С. 28–33.

### Литература к разделу 2

1. Интегрированные технологии ускоренного прототипирования и изготовления: монография / Товажнянский Л.Л., Грабченко А.И., Чернышов С.И. и др.; под ред. Л.Л. Тovaжнянского и А.И. Грабченко. – Х.: ОАО «Модель Вселенной», 2005. – 224 с.

2. Рабочие процессы высоких технологий в машиностроении: учеб. пособ. / Везуб Н.В., Весткемпер Э., Внуков Ю.Н. и др.; под ред. А.И. Грабченко. – Х.: ХГПУ, 1999. – 436 с.

3. Gephardt Andreas. Generative Fertigungsverfahren. Rapid Manufacturing – 3. Auflage – Carl Hanser Verlag, Munchen. – 2007. – 500 s.

4. Бобров В.В., Голованов И.В. и др. Основы метода селективного лазерного спекания металл-полимерных порошковых композиций : ФИАН. №14. – М.: 1996. – 19 с.

5. Хейфец М.Л. Формирование свойств материалов при послойном синтезе деталей. – Новополюцк : ПГУ, 2001. – 156 с.

### Литература к разделу 3

1. Базров Б.М. Основы технологии машиностроения: учебник для вузов. – М.: Машиностроение, 2005. – 736 с.

2. Введение в организацию производства: учеб. пособие / Э. Весткемпер, М. Декер, Л. Ендуби, А.И. Грабченко, В.Л. Доброскок; пер. с нем.: под общ. ред. А.И. Грабченко. Харьков: НТУ «ХПИ», 2008. – 376 с.

3. Грабченко А.И., Доброскок В.Л., Чернышов С.И. Прогнозирование времени полного цикла изготовления изделий методом селективного лазерного спекания // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Матеріали міжнародної науково-практичної конференції 17-18 травня 2007 р. – Харків: Курсор, 2007. – С. 4–21.

4. Обобщенная модель времени полного цикла изготовления изделий генеративными технологиями макроуровня / Грабченко А.И., Доброскок В.Л., Чернышов С.И., Абдурайимов Л.Н. // Високі технології в машинобудуванні: Зб. наук. пр. – Х.: НТУ "ХПІ". – 2006. – Вип. 1(12). – С. 3–16.

5. Ермаков С.М. Метод Монте-Карло в вычислительной математике: Вводный курс. – СПб.: Невский Диалект; М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. – 192 с.

6. Интегрированные технологии ускоренного прототипирования и изготовления. Монография: 2-е изд., перераб. и доп. / Товажнянский Л.Л.,

Грабченко А.И., Чернышов С.И. и др. / под. ред. Л.Л. ТОВАЖНЯНСКОГО, А.И. Грабченко. – Харьков: ОАО «Модель Вселенной», 2005. – 224 с.

7. Ли К. Основы САПР (CAD/CAM/CAE). – СПб: ПИТЕР, 2004. – 560 с.

8. Рабочие процессы высоких технологий в машиностроении : уч. пособие / под. ред. А.И. Грабченко. – Харьков: ХГПУ, 1999. – 436 с.

9. Технология приборостроения : учеб. пособ. / В.А. Валетов, Ю.П. Кузьмин, А.А. Орлова, С.Д. Третьяков – СПб: СПбГУ ИТМО, 2008. – 336 с.

10. Точность производства в машиностроении и приборостроении / под ред. А.И. Гаврилова. – М.: Машиностроение, 1973. – 567 с.

11. Формирование непрерывных случайных величин при статистическом моделировании рабочих процессов интегрированных технологий / Чернышов С.И., Доброскок В.Л., Гаращенко Я.Н. и др. // Високі технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ "ХПІ", 2006. – Вип. 2 (13). – С. 108–141.

12. Fishman George S. Monte-Carlo: Concepts, algorithms and applications. – New-York : Springer-Verlag, 1999. – 722 p.

13. Gebhardt A. Generative Fertigungsverfahren. Rapid Prototyping – Rapid Tooling – Rapid Manufacturing. – Munchen: Carl Hanser Verlag, 2007. – 499 p.

14. Jacobs P.F. Stereolithography and other RP&M Technologies from Rapid Prototyping to Rapid Tooling. – New York: ASME Press, 1996. – 392 p.

#### **Литература к разделу 4**

1. Болв А. А. Индукционная наплавка деталей в сельскохозяйственном машиностроении / А.А. Болв, С.П. Лесков // Наплавка. Опыт и эффективность применения – К.: ИЭС им. Е.О.Патона, 1985. – С. 72–76.

2. Демченко В.Ф. Компьютерная система проектирования технологий электродуговой наплавки / В.Ф. Демченко, И.А. Рябцев, С.С. Козлитина // Автоматическая сварка. – 1998. – №11. – С. 61–66.

3. Демченко В.Ф. Компьютерная система проектирования технологий восстановления и упрочнения деталей металлургического оборудования / В.Ф. Демченко, И.А. Рябцев, С.С. Козлитина // Технология машиностроения. – 1999. – №2. – С. 25–26.

4. Клименко Ю.В. Электроконтактная наплавка / Ю.В. Клименко. – М.: Металлургия, 1978. – 128 с.

5. Ксендзык Г.В. Изготовление биметаллических заготовок для сортового проката электрошлаковой наплавкой электродом большого сечения / Г.В. Ксендзык, В.П. Субботовский, В.С. Ширин // Автоматическая сварка. – 1961. – №9. – С. 79–81.

6. Кусков Ю.М. Электрошлаковая наплавка цилиндрических заготовок жидким присадочным материалом в кристаллизаторе / Ю.М. Кусков // Автоматическая сварка – 1996. – №6. – С. 52–53.

7. Переплетчиков Е.Ф. Плазменная наплавка / Е.Ф. Переплетчиков // Сварщик. – 2000. – №2. – С. 8–11.

8. Переплетчиков Е.Ф. Плазменно-порошковая наплавка в судовом машиностроении / Е.Ф. Переплетчиков // Автоматическая сварка. – 2000. – №12. – С. 31–35.

9. Разработка процесса и исследование некоторых технологических особенностей электрошлаковой наплавки лентами / Фрумин И.И., Каленский В.К., Панчишин Ю.А. и др. // Теоретические и технологические основы наплавки. Новые процессы механизированной наплавки. – К.: ИЭС им. Е.О. Патона, 1977. – С. 83–89.

10. Рябцев И.А. Индукционная наплавка / И.А. Рябцев // Сварщик – 2000. – №5. – С. 13–16.

11. Рябцев И.А. Газовая наплавка / И.А. Рябцев // Сварщик. – 2000. – №5. – С. 17–19.

12. Рябцев И.А. Наплавка деталей машин и механизмов / И.А. Рябцев. – М.: Экотехнология, 2004. – 160 с.

13. Фрумин И.И. Автоматическая электродуговая наплавка / И.И. Фрумин. – Х.: Metallurgizdat, 1961. – 422 с.

14. Электрошлаковая наплавка / Кусков Ю.М., Скороходов В.Н., Рябцев Н.А., Сарычев И.С. – М.: Наука и технология, 2001. – 179 с.

### **Литература к разделам 5, 6**

1. Газотермическое напыление композиционных порошков / Кулик А.Я., Борисов Ю.С., Мнухин А.С., Никитин М.Д. – Л.: Машиностр., Ленингр. отделение, 1985. – 199 с.

2. Дубовий О.М. Технологія напылення покриттів: підруч. / О.М. Дубовий. – Миколаїв: НУК, 2007. – 236 с.

3. Нанесення покриття: навч. посіб. / Корж В.М., Кузнецов В.Д., Борисов Ю.С., Ющенко А.С.; за ред. К.А. Ющенко. – К.: Арістей, 2005. – 204 с.

4. Петров С.В. Плазменное газоздушное напыление / С.В. Петров, И.Н. Карп. – К.: Наук. думка, 1993. – 494 с.

5. Поляк И.С. Технология упрочнения: Технологические методы упрочнения: в 2 т. – / И.С. Поляк. – М.: Машиностр.: ЛВМ-СКРИПТ, 1995. – т.1. – 827 с., т.2. – 685 с.

6. Порошковая металлургия и напыленные покрытия / под. ред. Б.С. Митика. – М.: Металлургия, 1987. – 792 с.

7. Похмурський В.І. Електродугові відновні та захисні покриття / В.І. Похмурський. – Львів: НАН України, ФМІ ім. Г.В. Карпенка, 2005. – 192 с.

8. Технологические системы защитных покрытий / <http://www.tspsc.ru>.

9. Хасуи А. Наплавка и напыление / А. Хасуи, О. Моригаки: пер. с японск. – М.: Машиностр., 1985. – 240 с.

## Литература к разделу 7

1. Андреев А.А. Технологические особенности получения композиционных наноструктурных покрытий вакуумно-плазменными методами / А.А. Андреев, В. М. Шулаев, С. Н. Григорьев // Технология машиностроения. – 2005. – №7. – С. 47-52.
2. Андриевский Р. А. Наноструктурные материалы / Р.А. Андриевский, А.В. Рагуля. – М.: Академия, 2005. – 117 с.
3. Балабанов В.И. Нанотехнологии. Наука будущего / В.И. Балабанов. – М.: Эксмо, 2009. – 256 с.
4. Валиев Р. З. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией / Р.З. Валиев, И.В. Александров. – М.: Логос, 2000. – 272 с.
5. Головин Ю. И. Введение в нанотехнологию / Ю.И. Головин.– М.: Машиностр. – 1, 2003. – 112 с.
6. Гусев А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А.И. Гусев. – М.: Физматлит, 2005. – 416 с.
7. Дьячков П. Н. Углеродные нанотрубки: строение, свойства, применение / П. Н. Дьячков. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. – 293 с.
8. Кобаяси Н. Введение в нанотехнологию / Н. Кобаяси: пер. с японск. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. – 134 с.
9. Мальцев П. П. Наноматериалы. Нанотехнологии. Наносистемная техника / П. П. Мальцев. – М.: Техносфера, 2006. – 152 с.
10. Мансури Г. Али. Принципы нанотехнологии. Исследование конденсированных веществ малых систем на молекулярном уровне / Г. Али Мансури: пер. с англ. – М.: Научный мир, 2008. – 320 с.
11. Мартинес-Дуарт Дж.М., Мартин-Палма Р.Дж., Агулло-Руеда Ф. Нанотехнологии для микро-и оптоэлектроники / Дж.М. Мартинес-Дуарт, Р.Дж. Мартин-Палма, Ф. Агулло-Руеда: пер. с англ. – М.: Техносфера, 2007. – 368 с.

12. Наноматериалы. Классификация, особенности свойств, применение и технологии получения: учеб. пособие / Балоян Б.М., Колмаков А.Г., Алымов М.И. и др. – М.: АгроПрессДизайн, 2007. – 102 с.
13. Нанослоистые композиционные материалы и покрытия / Шпак А.П., Майборода В.П., Куницкий Ю.А. и др. – К.: Академперіодика, 2004. – 164 с.
14. Нанотехнологии. Азбука для всех / под ред. Ю.Д. Третьякова. – М.: Физматлит, 2008. – 368 с.
15. Нанотехнологии в ближайшем десятилетии. Прогноз направления развития / под ред. М.К. Роко, Р.С. Уильямса, П. Аливисатоса: пер. с англ. – М.: Мир, 2002. – 292 с.
16. Невлюдов И.Ш. Микроэлектромеханические системы в нанотехнологиях / И.Ш. Невлюдов, А.А. Андрусевич, В.А. Палагин. – Х.: Коллегиум, 2007. – 268 с.
17. Пул Ч. Нанотехнологии / Ч. Пул, Ф. Оуэнс: пер. с англ. – М.: Техносфера, 2005. – 336 с.
18. Раков Э.Г. Нанотрубки и фуллерены: учеб. пособ. / Э.Г. Раков. – М.: Университетская книга, Логос, 2006. – 376 с.
19. Ратнер М. Нанотехнология: Простое объяснение очередной гениальной идеи / М. Ратнер, Д. Ратнер: пер. с англ. – М.: Изд. дом «Вильямс», 2004. – 240 с.
20. Рит М. Наноконструирование в науке и технике. Введение в мир Нанорасчета / М. Рит: пер. с англ. – М. – Ижевск: РХД, 2005. – 160 с.
21. Рыбалкина М. Нанотехнологии для всех / М. Рыбалкина. – М.: Nanotechnology News Network, 2005. – 444 с.
22. Старостин В.В. Материалы и методы нанотехнологии: учеб. пособие / В.В. Старостин; под общ. ред. Л.Н. Патрикеева. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. – 431 с.
23. Фостер Л. Нанотехнологии. Наука, инновации и возможности / Л. Фостер. – М.: Техносфера, 2008. – 352 с.

24. Харрис П. Углеродные нанотрубы и родственные структуры. Новые материалы XXI века / П. Харрис: пер. с англ. – М.: Техносфера, 2003. – 336 с.
25. Хартманн У. Очарование нанотехнологии / У. Хартманн; под ред. Л.Н. Патрикеева: пер. с нем. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. – 173 с.
26. Шейнман Е. Сверхтвердые покрытия из нанокompозитов. Обзор зарубежной литературы / Е. Шейнман // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 2008. – №12 (642). – С. 41-46.
27. Binning G., Quate G.F., Gerber Ch. Atomic force microscopy // *J. Phys. Rev. Lett.* – 1986. – V. 56. – P. 930-942.
28. *Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology.* – New York: American Scientific Publishers, 2004.
29. Gleiter H. Deformation of Polycrystals // *Proc. of 2<sup>nd</sup> RISO Symposium on Metallurgy and Materials Science* (Eds. N. Hansen, T. Leffers, H. Lithold). Roskilde, RISO Nat. Lab. – 1981. – P. 15-21.
30. Gleiter H. Nanostructured materials: basic concepts and microstructure // *Acta Materialia.* – 2000. – V. 48, N 1. – P. 1-29.
31. *Implications of Nanoscience and Nanotechnology* / Eds. M. C. Roco. – Bainbridge: Kluwer Acad. Publ., 2001.



Навчальне видання

ГРАБЧЕНКО Анатолій Іванович  
ВНУКОВ Юрій Миколайович  
ДОБРОСКОК Володимир Ленінмірович  
ПУПАНЬ Лариса Іванівна  
ФАДСЄВ Валерій Андрійович

**ІНТЕГРОВАНІ  
ГЕНЕРАТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ**

Навчальний посібник  
для студентів вищих навчальних закладів

Відповідальний за випуск проф. *А. І. Грабченко*  
В авторській редакції  
Комп'ютерна верстка *А. М. Борзенко*

План 2011 р., поз. 45

Підп. до друку 02.03.2011 р. Формат 70 × 100 1/16. Папір офісний.  
Riso-друк. Гарнітура Times. Ум.-друк. арк. 33,8. Наклад 300 прим.  
Зам. № . Ціна договірна.

---

Видавничий центр НТУ «ХПІ».  
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК 3657 від 24.12.2009 р.  
Харків, вул. Фрунзе, 21

---

Віддруковано у друкарні НТУ «ХПІ»



ГРАБЧЕНКО Анатолий Иванович – заслуженный работник высшей школы Украинской ССР, Лауреат Государственной премии Украины в области науки и техники, Лауреат премии Автономной республики Крым, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Интегрированные технологии машиностроения» НТУ «Харьковский политехнический институт». Научно-педагогический стаж – 52 года. Выполнил ряд фундаментальных работ в области физики процессов обработки материалов сверхтвердыми инструментами. Автор теории управления процессом шлифования сверхтвердых материалов и концепции трех уровней генеративных технологий. Является автором более 300 научных публикаций.



ВНУКОВ Юрий Николаевич – Лауреат Государственной премии Украины в области науки и техники, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедры технологии машиностроения, проректор по научной работе Запорожского национального технического университета. Научно-педагогический стаж – 37 лет. Кругом научных интересов является комплексные интегрированные технологии обработки резанием и повышение производительности режущих инструментов. Является автором более 170 научных публикаций, учебника, четырех учебных пособий и трех монографий.



ДОБРОСКОК Владимир Ленинмирович – доктор технических наук, профессор Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». Работает профессором кафедры интегрированных технологий машиностроения им. М.Ф. Семка. Научно-педагогический стаж – 21 год. Кругом научных интересов является статистическое моделирование рабочих процессов обработки резанием и интегрированные генеративные технологии создания изделий. Является автором более 120 научных публикаций, учебника, четырех учебных пособий и монографии, имеет 38 авторских свидетельств на изобретения и патенты.



ПУПАНЬ Лариса Ивановна – кандидат технических наук, доцент кафедры интегрированных технологий машиностроения им. М.Ф. Семка Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». Научно-педагогический стаж – 26 лет. Кругом научных интересов является изучение структуры и физико-механических свойств поверхностного слоя материалов в условиях различных видов технологического воздействия, особенности структурообразования сверхтвердых композиционных материалов. Является автором 77 научных и учебно-методических публикаций.



ФАДЕЕВ Валерий Андреевич – доктор технических наук, профессор, заведующий филиалом кафедры «Технология машиностроения и металлорежущие станки» Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». Работает главным инженером государственного предприятия «Харьковский машиностроительный завод «ФЭД». Научный стаж – 21 год. Кругом научных интересов является интегрированные комплексные технологии для производства наукоемких изделий машиностроения (авиационных агрегатов). Является автором более 100 научных публикаций, пяти учебных пособий, пяти монографий и имеет 16 авторских свидетельств на изобретения и патенты.

ISBN 978-966-593-909-2



9 789665 939092