



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ДГТУ)

Факультет «Автоматизация, мехатроника и управление»
Кафедра «Гидравлика, гидропнеумоавтоматика и тепловые процессы»

КУРС ЛЕКЦИЙ

«ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА»

Ростов-на-Дону

2022 г.

Введение

В настоящее время важнейшими проблемами российской экономики и промышленности являются: улучшение повышения производительности труда, качества характеристик производимой промышленной продукции за счет внедрения инноваций, снижение ее себестоимости и перевооружение действующих предприятий, оснащение их новой высокоэффективной техникой, внедрение ноу-хау и современных методов управления.

Снижение себестоимости заготовительного производства, повышение эффективности использования материальных ресурсов, применение новых материалов – наиболее актуальные задачи промышленного производства. Создание и освоение новых технологических процессов обработки материалов позволит разработать принципиально новые образцы товаров широкого потребления и повышенного спроса, определяющих экономическое положение той или иной отрасли и страны в целом.

Внедрение высокопроизводительного оборудования повышенного быстродействия и точности, качественно новых технологических процессов обработки, базирующихся на инновационном принципе, – основной путь модернизации и возрождения производства. Особенно важно использовать такое оборудование и процессы при изготовлении наукоемкой продукции, соответствующей лучшим мировым стандартам и пользующейся повышенным спросом на мировом рынке.

1.1. Проблемы российской промышленности

Прогнозы развития экономики и промышленности России в XXI веке даются различные: от оптимистических до самых пессимистических.

Один из рассматриваемых оптимистических прогнозов развития России основан на так называемой стратегии экономического роста. Данная стратегия предусматривает активизацию конкурентных преимуществ российской экономики. Таких преимуществ восемь:

1. Наличие собственных обширных природных ресурсов.
2. Уровень образования населения.
3. Большой внутренний рынок.
4. Дешевая и достаточно квалифицированная рабочая сила.
5. Промышленный потенциал.
6. Наличие известных научных школ.
7. Свободные производственные мощности.
8. Опыт экспорта высокотехнологичной продукции.

Реализация стратегии экономического роста возможна только при целевом участии государства. Предварительные расчеты по реализации данной стратегии уже в среднесрочной перспективе обещают устойчивый экономический рост не менее чем на 7% в год, общее увеличение инвестиций – по меньшей мере, на 15% в год, а наукоемкой промышленности и новых технологий – до 30%.

Одной из основных проблем того, что данная стратегия до сих пор не реализована, является слабая связь между промышленностью и научными школами. Россия, обладая 12% ученых в мире, за счет эффективного использования их потенциала могла бы занять высокое место в рейтинге ноу-хау, но без спроса со стороны промышленников это не представляется возможным. Сырьевая экономика даже при наличии 28% всех природных ресурсов не может удовлетворить все потребности современного постиндустриального общества. Доля современной России на рынке наукоемкой продукции составляет 0,3%, при общем объеме этого рынка в 4 трлн долларов. Таким образом, получается, что весь российский нефтегазовый экспорт является лишь десятой частью этого рынка. Необходимо осуществить инновационный скачок в масштабах всей страны и выйти на рынок наукоемкой продукции, чему в наибольшей степени мешает большая инфляция, отсутствие инвестиций и системный кризис экономики.

Наиболее проблемным аспектом является отставание в качестве технологической среды систем обеспечения качества, автоматизации разработок, компьютеризации производства и т.д. То есть при наличии промышленной инфраструктуры, очень похожей на западную, мы отстаем в технологическом ее оснащении.

В основе производства наукоемкой продукции лежат макротехнологии, которые представляют собой совокупность знаний и производственных возможностей для выпуска на мировой рынок изделий. Анализ мирового рынка наукоемкой продукции показывает, что на сегодняшний день существуют 50 макротехнологий. Из них 46-ю макротехнологиями обладает сеть наиболее развитых стран, т.е. они владеют 80% рынка наукоемкой продукции. Так, США от экспорта наукоемкой продукции ежегодно получают доход около 700 млрд долл., Германия – 530 млрд долл., Япония – 400 млрд долл.

За 16 существующих макротехнологий Россия могла бы побороться, тем более что перспектива у них хорошая (табл. 1.1).

Таблица 1.

Макротехнологии	Доход, млрд долл.	
	2010 г.	2016 г.
Авиационные технологии	18-22	28
Космические технологии	4	8
Ядерные технологии	6	10
Судостроение	4	10
Автомобилестроение	2	6-8
Транспортное машиностроение	4	8-12
Химическое машиностроение	3	8-10
Спецметаллургия. Спецхимия		
Новые материалы	12	14-18
Технология нефтедобычи и переработки	8	14-22
Технология газодобычи и транспортировки	7	21-28
Энергетическое машиностроение	4	12-14
Технология промышленного оборудования. Станкостроение		
Микро- и радиоэлектронные технологии	4	7-9
Компьютерные и информационные технологии	4,6	7,8
Коммуникация, связь	3,8	12
Биотехнологии	6	10
Всего	94-98	144 - 180

В области производства наукоемкой продукции существует жесточайшая конкуренция. Например, США с 2008 по 2015 год уступили лидерство в 8 макротехнологиях. Это привело к дефициту платежеспособного спроса в 200 млрд долл. Причина этого в том, что в начале 2000-х годов страны ЕС сформировали программу, которая позволила отвоевать часть рынка наукоемкой продукции у США и Японии. Данная программа предусматривала: перестройку технологий, проведение фундаментальных исследований, реструктуризацию промышленности.

В настоящее время европейский авиационный консорциум планирует отвоевать 25% рынка тяжелых самолетов, объем которого составляет 300 млрд долл. Для достижения поставленной цели разработана большая международная программа, для реализации которой привлекли американцев и россиян. Доля России в этой программе составляет 20%.

Одной из проблем, стоящих перед российской властью, является выбор макротехнологических приоритетов. Для определения приоритета той или иной макротехнологии необходимо сопоставлять затраты, имеющуюся базу знаний и эффект от реализации продукции, созданной на ее основе.

Таким образом, интеграция России в мировой рынок наукоемкой продукции – это единственная возможность дальнейшего экономического роста.

1.2. Промышленные технологии и технический прогресс

Существует множество вариантов понятия «технология». Данные определения можно систематизировать и рассмотреть их влияние на создание новых промышленных технологий.

Технология (technology) – в дословном переводе «наука о мастерстве».

В Российской энциклопедии можно встретить такие определения:

1. Наука или совокупность сведений о методах переработки сырья, материалов, полуфабрикатов, комплектующих, теперь и программных средств в изделия, отвечающие заданным требованиям с точки зрения их технического назначения и качества.

2. Совокупность средств, процессов, операций, методов, с помощью которых входящие в производство элементы преобразуются в выходящие; она охватывает машины, механизмы, навыки и знания.

И, наконец, зарубежная трактовка данного понятия: применение (употребление) чего-либо в промышленности, коммерции, медицине и других областях.

Технологии можно условно разделить на следующие:

- прогрессивные;
- наукоемкие;
- высокие;
- критические.

Прогрессивная – технология, являющаяся результатом внедрения инноваций, стоящая на более высокой ступени развития по сравнению с существующей. Она включает в себя технологии, базирующиеся на заимствованном передовом опыте, путем внедрения новых или усовершенствованных методов производства изделий, в т.ч. путем технологического обмена (беспатентные лицензии, ноу-хау, инжиниринг и т.п.).

Наукоемкая – это технология, основанная на новых или значительно усовершенствованных методах производства. Новая технология соответствует радикальной продуктовой инновации, а усовершенствованная – инкрементальной продуктовой инновации. К наукоемким относятся технологии, в основе которых лежат последние достижения науки и техники, которые позволяют осуществить выпуск продукции, выполнение работ и услуг таким образом, что получаемая продукция соответствует по своим экономическим и эксплуатационным свойствам лучшим мировым образцам. Эта продукция вполне удовлетворяет новые потребности общества по сравнению с ранее выпускавшейся аналогичного назначения. Создание таких технологий в обязательном порядке предполагает проведение научных исследований и разработок. Это, конечно, приводит к росту затрат, но в то же время служит источником широкого привлечения научно-технического потенциала и его развития.

Наукоемкость – показатель, отражающий соотношение числа ученых, занятых научной деятельностью, к числу всех занятых на производстве, или, иначе говоря, это соотношение между научно-технической деятельностью и производством в виде величины затрат на науку, приходящихся на единицу продукции.

Высокая технология (high technology). К высоким относятся технологии, благодаря которым создаются новые свойства изделий путем воздействия на материалы на межмолекулярном, межатомном, внутриатомном и т.п. уровнях. Это нанотехнологии и различные виды обработки, такие как: лазерная, плазменная, ультразвуковая и т.п.

Критическая технология. К критическим относятся технологии, которые разрабатываются в критической ситуации. Например, когда необходимо срочно выпустить продукцию в условиях ограниченного времени и ограниченных материальных ресурсов. Такие технологии, как правило, не

являются оптимальными, поскольку целью таких технологий является не снижение себестоимости изделий, а необходимость их изготовления к определенному календарному сроку.

Созданию промышленных технологий всегда предшествует открытие разнообразных физических эффектов (ФЭ). Т.е. в основе всех существующих технологий, связанных с производством изделий, лежат физические эффекты.

Все физические процессы, протекающие при взаимодействии материальных объектов, сопровождаются различными эффектами. Причем количество этих эффектов может варьироваться очень широко. Однозначного толкования понятия ФЭ не существует, поэтому мы примем следующее определение ФЭ – это закономерное появление результатов взаимодействия объектов, осуществляемого посредством воздействия физических полей. При этом закономерность возникновения результатов характеризуется повторяемостью и последовательностью при одних и тех же взаимодействиях.

Все процессы и явления, происходящие в материальном мире, обусловлены четырьмя типами воздействия физических полей: всемирное тяготение, электромагнитные, ядерные и слабые взаимодействия. Каждое из этих полей имеет ряд модификаций, обуславливающих особенности взаимодействия материальных объектов. Например, электрическое поле может быть электростатическим, переменным, вихревым и т. д.

Результаты воздействия физических полей – это *эффекты*. Ими могут быть изменения самих физических полей или параметров объектов (размеров, формы, физико-механических свойств и т.д.).

Рассмотрим основные закономерности проявления ФЭ:

1. Возможно проявление нескольких результатов воздействия при одном воздействии на объект. Число таких результатов зависит от сложности структуры объекта. При сложной структуре материального объекта от одного воздействия могут проявляться ФЭ на разных иерархических уровнях структуры объекта, то есть возникают внутренние воздействия. Именно они широко используются в технике и технологии. Так, для упрочнения поверхностного слоя детали могут быть использованы методы ПДД (внешнее воздействие) или пропускание через деталь электрического тока (внутреннее воздействие).

2. Один и тот же объект может быть подвергнут не-скольким воздействиям. Эти воздействия можно разделить на основные и дополнительные. Основным называется такое воздействие, результат от которого вызывает появление другого, отличного от воздействия, физического поля. Дополнительное – такое воздействие, которое приводит только к количественному, а не качественному изменению результата, получаемого от основного воздействия. Таким образом, дополнительные воздействия не могут вызвать данного результата без основного воздействия. Например, электрохимическая обработка – основное воздействие, при котором это воздействие электрического поля, а дополнительное – химическая реакция.

3. На одном объекте могут проявляться несколько ФЭ, оказывающих влияние друг на друга (наклеп при резании).

4. Возможно регулирование значения результата воздействия. Регулирования можно достичь: количественным изменением воздействия, введением новых основных и дополнительных воздействий, изменением структуры и параметров объекта. Благодаря этому свойству можно технически реализовать такие функции объектов техники, как усиление, ослабление, преобразование, модуляция, выравнивание, проводимость и др.

Моделью ФЭ называется зависимость результата воздействия (эффекта) от самого воздействия. Модель должна удовлетворять следующим требованиям:

- отражать условия взаимосвязи различных ФЭ друг с другом;
- количественно описывать характеристику проявления ФЭ;
- описывать процесс проявления ФЭ во времени;
- быть пригодной для использования в инженерной практике;
- обеспечивать определение результатов воздействий при заданных исходных воздействиях, значениях варьируемых параметров физического объекта, в заданных временных характеристиках.

Строгих математических зависимостей между воздействием и результатом для многих ФЭ не существует, в таком случае используются эмпирические зависимости, либо экспериментальные данные.

Из модели ФЭ следует, что результат воздействия во многом зависит от используемых марок веществ и материалов. Таким образом, важнейшей инновационной задачей является поиск новых марок веществ и материалов и разработка технологии их изготовления и обработки.

Рассмотрим примеры ФЭ, широко применяемых в технике и технологии. Одним из таких ФЭ является «эффект клина». Сущность эффекта заключается в преобразовании силы (по величине и направлению) при взаимодействии двух твердых тел путем использования поверхности контакта, наклоненной под острым углом к действующей силе. Когда человечество освоило процессы получения металлов из руды, возникла необходимость их переработки в изделия. Базируясь на «эффекте клина» и подобрав необходимые сопутствующие материалы (инструментальные, смазывающе-охлаждающие жидкости), удалось реализовать технологический процесс обработки металлов резанием, который в дальнейшем развился в великое множество его модификаций: точение, строгание, сверление, зенкерование, развертывание, фрезерование, шлифование, полирование и т.д.

На рис. 1.11 представлена в общем виде схема появления новых технологий и ее модификаций.



Рис. 1.11. Обобщенная схема разработки новых технологий

Приведем более современный пример. При переводе в 60-х годах прошлого века авиации с поршневых на газотурбинные двигатели перед заводами по производству авиационных двигателей встала проблема обработки лопаток турбин и компрессоров. Это большие партии деталей из высоколегированных (и, следовательно, трудно обрабатываемых резанием) сталей и сплавов, имеющих сложную пространственную геометрию и высокие требования по точности и качеству. Традиционная технология обработки таких поверхностей на фрезер-но-копировальном оборудовании не обеспечивала необходимого качества и производительности. «Узкое» место в производстве удалось расширить благодаря разработке принципиально новой технологии (рис. 1.12), основанной на принципе химического растворения материала (основное воздействие), значительно усиленного

наложением электрического тока (дополнительное воздействие). Проведенные научные исследования по выбору оптимальных сопутствующих материалов (электроды, электролиты) и электрических режимов позволили создать надежную технологию и промышленное оборудование для ее реализации.

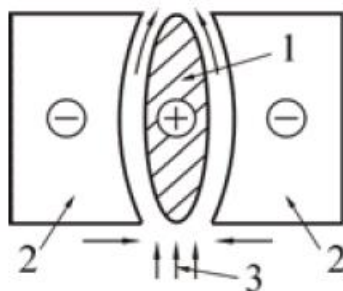


Рис. 1.12. Принципиальная схема электрохимической обработки: электрод-заготовка; 2) электрод-инструмент; 3) электролит

1.3 Сущность, свойства и классификация инноваций

В соответствии с международным стандартом, под **инновацией (нововведением)** следует понимать конечный результат творческой деятельности, воплощенный в новой или усовершенствованной востребованной продукции, либо в новом или усовершенствованном реализуемом процессе.

Инновации классифицируются по многим признакам, в частности, по сфере приложения, виду удовлетворяемых потребностей, причинам возникновения, степени новизны, стадиям жизненного цикла, виду получаемого эффекта и т.д. В настоящем пособии представлена **классификация инноваций** только по тем признакам, которые имеют какое-либо отношение к техническим и технологическим ново-введениям.

1. По степени радикальности (новизны) инновации делятся на:

- радикальные (базисные), которые характеризуются абсолютной новизной; это крупнейшие изобретения, в основе которых лежат новые фундаментальные научные достижения;
- инкрементальные (улучшающие), предполагающие мелкие и средние изобретения, чаще всего направленные на дальнейшее улучшение и развитие радикальных инноваций;
- псевдоинновации, направленные на частичное незначительное улучшение продукта (промышленный дизайн, косметические доработки).

2. По источнику появления выделяют инновации, вызванные:

- научно-техническим прогрессом;
- потребностями производства;
- потребностями рынка.

3. По характеру удовлетворяемых потребностей инновации делятся на:

ориентированные на удовлетворение уже существующих потребностей;
ориентированные на формирование и удовлетворение будущих потребностей.

4. По причинам возникновения выделяют инновации:

реактивные, которые являются в некотором роде реакцией на внешние воздействия, поведение конкурентов, потребителей, партнеров с целью выживания предприятия, удержания текущих позиций на рынке и дальнейшего развития;

стратегические, направленные на решение задач предприятия, внедрение которых способно обеспечить ему конкурентные преимущества в будущем.

5. По сфере применения различают следующие виды инноваций:

- технические, которые заключаются в создании и производстве новой и усовершенствованной продукции;

- технологические, которые представляют собой усовершенствование технологического процесса изготовления продукции на базе новых технологий;

- рыночные, открывающие новые рынки;

- организационно-управленческие, связанные с улучшением и оптимизацией процессов управления производством, финансами, сбытом, логистикой и прочими структурными подразделениями предприятия;

- информационные, которые приносят улучшения в способы передачи информации, управление информационными потоками; социальные, направленные на разработку новых решений социальных проблем в областях образования, науки, культуры, здравоохранения и других социальных сферах;

- экологические, которые заключаются в разработке инновационных решений, направленных на улучшение экологической обстановки, защиту окружающей среды и преодоление глобальных проблем.

6. По характеру изменений объекта выделяют инновации:

- модифицирующие, направленные на количественные усовершенствования объекта;

- прорывные, которые представляют собой качественные и кардинальные изменения объекта;

- интегрирующие, объединяющие в себе модифицирующие и прорывные инновации.

Несмотря на столь большое многообразие инноваций, выраженное в приведенной классификации, любая инновация должна обладать следующими **свойствами**:

1. длительность создания и жизненного цикла в целом;

2. наличие определенной новизны;

3. практическая реализуемость инновации в новом продукте, услуге, процессе, материале и т.д.;

4. неопределенность реализации инновационного процесса, включающая неопределенность и риски финансовых условий, технической составляющей, инвестирования, внешней среды, неопределенность промежуточных и конечных результатов инновационного процесса и пр.;

5. направленность на удовлетворение потребностей рынка (коммерциализация);

6. достижение определенного эффекта в результате коммерциализации инновации (экономического, технического, технологического, социального, экологического и пр.).

Инновационный процесс заключается в создании и коммерциализации нововведений, изобретений, новых технологий, продуктов и услуг, а также других результатов творческой деятельности. Инновационный процесс в общем виде может включать следующие этапы:

1. фундаментальные, поисковые и прикладные исследования;

2. маркетинговые исследования;
3. опытно-конструкторские разработки;
4. создание опытного образца;
5. создание промышленного образца;
6. промышленное внедрение или первое практическое использование, которое отражает готовность научно-технического нововведения к практическому использованию;
7. организация серийного производства нового продукта;
8. коммерциализация инновации;
9. диффузия инновации.

В настоящее время выделяется шесть поколений моделей инновационного процесса.

Первое поколение представлено инновационным процессом линейного типа, когда он рассматривался как процесс последовательной трансформации знаний в новые продукты. Линейная модель инновационного процесса включает фундаментальные, прикладные исследования, создание опытного и промышленного образцов, маркетинг, производство нового продукта и его сбыт.

Второе поколение инновационного процесса также представляет собой простую линейно-последовательную модель, основное отличие которой заключается в признании значимости ориентации нововведения на рынок. В этой модели инновационный процесс инициируется рыночной потребностью.

Ускорение инновационного развития и усиление конкуренции вызвало необходимость появления новой третьей модели инновационного процесса, являющейся, по сути, схемой интеграции моделей первого и второго поколений. Третья модель инновационного процесса основана на тесной взаимосвязи технологий с рыночными потребностями, а также на эффективном взаимодействии подразделений предприятия.

Четвертое поколение отражает японскую интерактивную модель передового опыта, которая основана на параллельной активности групп специалистов и наличии внешних горизонтальных и вертикальных связей, что приводит к ускорению инновационного процесса. Фактически в рамках данной модели несколько стадий инновационного процесса выполняются не последовательно, а параллельно.

В основе пятого поколения инновационного процесса лежит модель стратегической интеграции, предполагающая дополнение инновационного процесса информационными и коммуникативными функциями (стратегическими связями). Модель основана на применении новейших информационных технологий для обеспечения эффективного обмена информацией.

Предпосылкой зарождения моделей шестого поколения послужило понимание того, что информация является лишь одним из множества элементов, необходимых в инновационном процессе. Модель инновационного процесса шестого поколения основана не только на информации, но и на знаниях, получаемых опытным путем.

Особое значение для успешного инновационного процесса имеет коммерциализация нововведения.

Коммерциализация инновации – это ее коммерческая реализация, то есть процесс извлечения коммерческой выгоды от ее создания, внедрения и распространения.

Коммерциализация возможна в двух основных формах:

1. Продажа инновации (передача прав на пользование объектом интеллектуальной собственности, например, на основе лицензионных договорных отношений).

2. Внедрение инновации в технологический процесс создания продукции для достижения уникальных конкурентных преимуществ и прочих целей предприятия (например, внедрение инновационной операции в технологический процесс, позволяющей в конечном итоге усовершенствовать конечный продукт, повысив его надежность, качество, улучшив эксплуатационные характеристики и пр.).

Понятия коммерциализации и диффузии инноваций тесно связаны между собой, так как диффузия есть ни что иное, как теория о распространении инновации в обществе.

1.4 Конкурентоспособность промышленной продукции (гидромашиностроение)

Конкурентоспособность промышленной продукции на рынке зависит от ее потребительских свойств и цены. В зависимости от выбранной технологии и состояния технологической среды в процессе изготовления формируются потребительские свойства продукции. Цена продукции также зависит от принятой технологии и связанной с ней производительности труда и в значительной степени определяется себестоимостью изготовления. Основным показателем потребительских свойств является качество изделия. Оно определяется технологичностью его сборки (часто и испытаний), а также зависит от качества элементов изделия, поступающих на сборку.

Качество изготовления элементов изделия определяется совокупностью свойств процессов их изготовления, соответствием этих процессов и их результатов, установленным требованиям. Основными параметрами, определяющими качество элементов изделия, являются точность их изготовления, качество поверхности и физико-механические свойства материалов, из которых они изготовлены.

В различных отраслях машиностроения широко распространены гидроприводы. Они отличаются сравнительно малыми габаритными размерами и массой на единицу передаваемой мощности, бесступенчатым регулированием скорости, удобством в эксплуатации, высоким КПД и другими положительными факторами, что способствует их дальнейшему распространению.

Надежность, работоспособность, чувствительность и другие важные параметры гидроприводов зависят не только от выбора принципиальной схемы и конструктивного ее исполнения, но и от материала, способа обработки поверхностей, степени их геометрической точности, высоты микронеровностей и т.д. Изделия гидропривода вследствие специфических условий их работы должны обеспечивать определенные гидравлические характеристики, поэтому в технологических процессах обработки предусматривают специальные контрольные операции, связанные с определением, например, гидравлических параметров золотниковых распределителей и т.д. Другая особенность технологического процесса обработки высокоточных элементов гидропривода, рабочие зазоры которых составляют 0,005 – 0,035 мм, заключается в обеспечении тщательной очистки этих деталей от технологических загрязнений. Надежность и ресурс агрегатов гидропривода (особенно объемных) и систем в целом находятся в прямой зависимости от чистоты входящих в них элементов и применяемых рабочих жидкостей. Все это определяет особенности технологических процессов обработки и контроля высокоточных элементов гидропривода.

При изучении технологии производства агрегатов гидроприводов целесообразно их разделять на группы, подгруппы и отдельные детали с целью выявления их назначения и специальных требований, подлежащих выполнению при проектировании и внедрении технологического процесса. Будем рассматривать агрегаты объемного гидропривода: шестеренные, пластинчатые и аксиально-поршневые насосы и гидродвигатели (роторные и возвратно-поступательного действия); агрегаты гидродинамического привода: гидромуфты и гидротрансформаторы; элементы систем управления: цилиндрические и плоские золотниковые распределители, дроссели, клапаны; элементы вспомогательных систем: фильтры, трубопроводы и фитинги.

При анализе агрегатов гидропривода целесообразно выделить наименования или категории деталей, аналогичных по назначению и имеющих много общих технических требований к конструкции (форме рабочих поверхностей, точности изготовления, применяемым материалам и т.д.): корпусные детали насосов, незамкнутых гидромуфт и гидротрансформаторов; гильзы гидроцилиндров; статоры пластинчатых насосов и гидромоторов; роторы пластинчатых, радиально- и аксиально-поршневых насосов и гидромоторов; корпусные детали золотниковых распределителей; плунжеры, золотники, поршни; распределители и опорные кольца аксиально-поршневых насосов; шестерни шестеренных насосов; рабочие колеса гидродинамических передач; валы и оси; пружины; детали уплотнительных устройств.

1.5 Точность изготовления и качество обработанной поверхности деталей гидромашин, гидроприводов и средств ГПА

Точность изготовления и качество поверхности определяют основные эксплуатационные свойства деталей машин.

При эксплуатации машин и механизмов основным воздействием подвергается поверхность детали. Это приводит к появлению трещин усталости, износу трущихся поверхностей, коррозионному разрушению. Данные процессы протекают на поверхности детали и в прилегающем поверхностном слое.

Под термином «поверхностный слой» понимается сама поверхность и ее некоторый подповерхностный слой, отличающийся от материала сердцевины детали.

Новые возможности повышения качества, надежности и долговечности деталей машин открывает учение о качестве поверхности.

Под качеством поверхности понимают состояние поверхностного слоя детали. Состояние поверхностного слоя оценивается следующими параметрами:

- 1) геометрические параметры;
- 2) физико-механические свойства;
- 3) структура поверхностного слоя.

1. Геометрические параметры поверхности характеризуются:

- макрогеометрией;
- шероховатостью (микрогеометрией);
- субмикрогеометрией.

2. Физико-механические свойства поверхностного слоя характеризуются микротвердостью H , остаточными напряжениями σ , микронапряжениями d/d , субмикронапряжениями (т.е. напряжениями I, II и III рода).

3. Структура характеризуется формой, размерами структурных составляющих.

1.5.1. Геометрические параметры

1. Макрогеометрия – это погрешности геометрической формы детали (волнистость, гранность, овальность, конусность, бочкообразность и др.), т.е. это геометрия относительно больших участков поверхности. Ее часто относят к понятию точности геометрической формы.

2. Микрогеометрия (шероховатость) – это геометрия малых участков (микронеровностей), образующихся в результате взаимодействия обрабатываемой поверхности и элементов режущего инструмента или рабочих сред (след вершины резца, абразивного зерна и т.п.).

Шероховатость поверхности – это совокупность неровностей с относительно малыми шагами, образующих рельеф поверхности и рассматриваемых в пределах участка, длина которого выбирается в зависимости от характера поверхности и равна боковой длине l . Согласно ГОСТ 2789-73 «Шероховатость поверхности. Параметры, характеристики и обозначения», существуют следующие параметры шероховатости (рис. 1.13) [1].

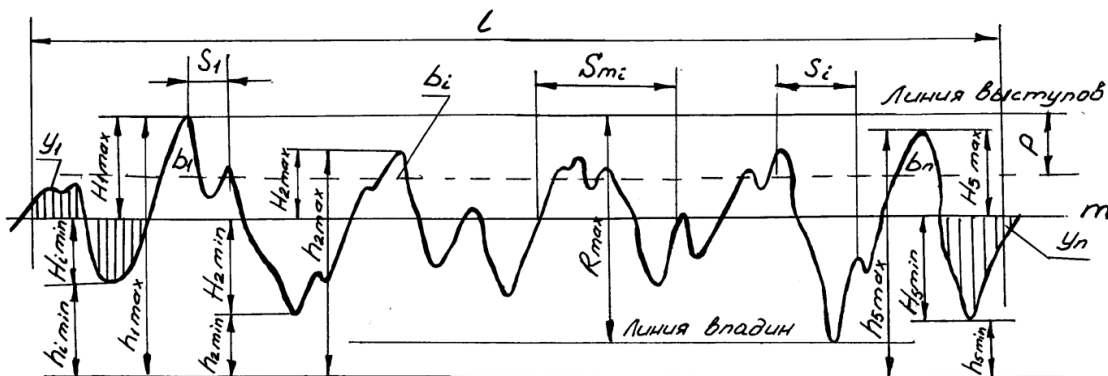


Рис. 1.13. Профиль шероховатости и его характеристики

Высотные параметры

1. R_a - среднее арифметическое отклонение профиля. За среднее арифметическое отклонение профиля принимается среднее арифметическое абсолютных значений отклонений профиля в пределах боковой длины, т.е. среднее значение расстояний ($y_1, y_2, y_3 \dots y_n$) точек измеренного профиля до его средней линии ($m-m$).

Средняя линия делит измеренный профиль таким образом, чтобы в пределах боковой длины площади по обеим сторонам от этой линии профиля были равны между собой:

$$F_1 + F_3 + \dots + F_{n-1} = F_2 + F_4 + \dots + F_n; \quad (1)$$

$$Ra = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i|}{n}, \quad (2)$$

где n – число измерений.

Базовая длина – выбирается в зависимости от шероховатости и утверждена ГОСТ 2789-73.

1-3-й класс шероховатости $l = 8.0$ мм

4-5-й класс шероховатости $l = 2.5$ мм

.....

13-14-й класс шероховатости $l = 0.08$ мм

2. R_z – высота неровностей. Определяется как среднее расстояние между находящимися в пределах базовой длины пятью высшими точками выступов и пятью низшими точками впадин, измеренное от линии, параллельной средней линии.

$$R_z = \frac{(H_{1\max} + H_{2\max} + \dots + H_{5\max}) - (H_{1\min} + H_{2\min} + \dots + H_{5\min})}{5}. \quad (3)$$

3. R_{\max} – наибольшая высота неровностей профиля – это расстояние между линией выступов и линией впадин профиля в пределах боковой длины.

Шаговые параметры

1. S_m – средний шаг неровностей по средней линии.

2. S – средний шаг неровностей по выступам.

3. t_p – относительная опорная длина профиля – это отношение опорной длины профиля к базовой длине.

4. η_p – опорная длина профиля – сумма длин отрезков (b) в пределах базовой длины, отсекаемых на заданном уровне (— — —) в материале выступов профиля.

5. r – радиус закругления выступов.

6. β – угол наклона образующих микронеровностей.

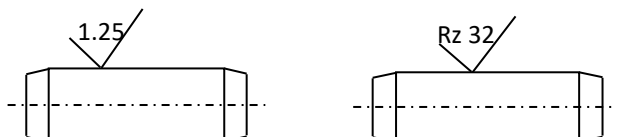
Установлено 14 классов шероховатости.

Для 6-12-го классов основным является параметр Ra . Для 1-5-го и 13-14-го классов – R_z .

С 6-го по 14-й классы дополнительно разделяются на разряды.

При измерении шероховатости различные дефекты поверхности (царапины, раковины) не учитываются.

Обозначение Ra и R_z на чертежах:



Форма и размеры шероховатости, измеренные в различных направлениях, различны. Шероховатость разделяется на продольную и поперечную.

Продольная шероховатость – высота неровностей поверхности, измеренная в направлении движения резания вдоль обработочных рисок.

Поперечная шероховатость – высота неровностей, измеренная перпендикулярно к движению резания. На образование поперечной шероховатости непосредственно влияют такие факторы, как геометрическая форма режущего инструмента и величина подачи. Поэтому размеры поперечной шероховатости обычно в 2-3 раза превосходят величину продольной шероховатости. Следовательно, шероховатость поверхности детали обычно оценивают по поперечной шероховатости.

ГОСТом также предусмотрены типы направлений неровностей поверхности:

- параллельное



- перекрещивающееся



- кругообразное



- произвольное



Таким образом, качество поверхности деталей формируется при непосредственном влиянии всего комплекса технологических операций на всех стадиях ее изготовления. В этом случае уместно говорить о существовании так называемой "технологической наследственности".

Под технологической наследственностью понимают влияние условий обработки и состояния поверхностного слоя на точность и качество поверхности при последующей или окончательной обработке. Технологической наследственностью называют также изменение эксплуатационных свойств деталей под влиянием технологии их изготовления.

Технологическая наследственность зависит не только от вида и режимов обработки, применяемых на чистовой операции. Она может проявиться в изменении свойств или потере точности формы готовой детали при ее эксплуатации в результате воздействия тех или иных элементов состояния поверхностного слоя, созданных в поверхностном слое детали при ее черновой обработке.

Например, при шлифовании грубо обточенной и закаленной до 62-63 HRC заготовки из стали ШХ 15 СГ шлифовальный круг создает на участках выступов неровностей поверхности тепловые удары, вызывающие мгновенный нагрев и структурные изменения металла поверхностного слоя. На границах разных структур развиваются значительные остаточные напряжения растяжения, снижающие долговечность деталей, а иногда вызывающие появление шлифовочных трещин.

Проявление технологической наследственности может привести как к улучшению, так и к ухудшению эксплуатационных свойств деталей машин.

Для целесообразного использования явления технологической наследственности необходимо установить непосредственные связи между эксплуатационными характеристиками деталей и режимами обработки при основных методах их изготовления. Установить эти связи с помощью математических зависимостей трудно. Поэтому для использования технологической наследственности в целях повышения долговечности деталей или улучшения других ее эксплуатационных характеристик путем назначения рациональных методов и режимов изготовления деталей необходимо экспериментально устанавливать прямые зависимости между отдельными эксплуатационными характеристиками, режимами и методами обработки.

Наибольшее влияние на качество поверхности оказывают финишные операции. На каждый из параметров качества поверхности влияют многие факторы технологического процесса: режимы обработки, режущий инструмент, характеристика обрабатываемой среды и т.п. Например, увеличение скорости фрезерования сопровождается уменьшением шероховатости, при вибронаклепе с

увеличением амплитуды колебаний A отмечается рост глубины наклепа h_{μ} ; с увеличением радиуса при вершине резца r и главного угла в плане ϕ шероховатость R_a уменьшается; при уменьшении зернистости абразивных инструментов при шлифовании и хонинговании также отмечается снижение шероховатости.

Существенное влияние на изменение шероховатости, глубину и степень наклепа оказывают различные составы смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) и поверхностно-активных веществ (ПАВ), вид связки шлифовальных кругов. Качество поверхности зависит также от марки материала обрабатываемой детали и его исходного состояния. При обработке в среде свободных тел (вибрационная, струйноабразивная, галтовка) существенное влияние на результаты обработки оказывает материал обрабатывающей среды.

Управляя в процессе изготовления деталей формированием параметров качества поверхности, можно непосредственно влиять на долговечность деталей машин.

1.5.2. Физико-механические свойства поверхностного слоя

1. Микротвердость – это твердость малых участков материала и отдельных структурных составляющих, т.е. это свойство металла сопротивляться проникновению в него другого более твердого тела определенной формы и размеров, не получающего остаточные деформации.

Микротвердость обозначается H , измеряется в килограммах, деленных на миллиметр (кг/мм^2), определяется путем вдавливания в испытываемую поверхность алмазной четырехгранной пирамиды под различной нагрузкой в зависимости от твердости измеряемого материала. Замеры производят на специальных микрошлифах. 50Н

2. Остаточные напряжения – это напряжения, существующие в детали при отсутствии внешних воздействий (силовых и температурных).

Напряжения I рода – макронапряжения, охватывающие области, соизмеримые с размерами детали. Они возникают в металле в процессе деформации больших объемов в результате взаимодействия структурных составляющих между собой.

Напряжения II рода – микронапряжения – распространяются на отдельные зерна металла или на группу зерен. Возникают как при изготовлении, так и в процессе эксплуатации.

Напряжения III рода относятся к искажениям атомной решетки кристалла.

Остаточные напряжения характеризуются величиной и знаком (сжатия или растяжения) и глубиной залегания.

1.5.3. Структура

Металлы и сплавы имеют кристаллическую структуру, атомы расположены в строго определенном порядке и образуют пространственную кристаллическую решетку. На свойства металла и сплава оказывают влияние форма, размеры и расположение зерен, а также химический состав примесей к основному металлу.

1.5.4. Пути улучшения качества поверхностного слоя деталей машин

1. Улучшить показатели качества поверхности можно путем применения обычных методов обработки, но с условием их оптимальных режимов, что иногда сложно, либо путем применения отделочно-упрочняющих методов обработки.

2. Окончательно поверхностный слой формируется на финишных операциях механической обработки. Однако на результат этого формирования оказывают влияние предшествующие операции, включая заготовительные (явление технологической наследственности). Следовательно, припуски на

обработку, а также последовательность выполнения операций устанавливают с учетом технологической наследственности так, чтобы сохранить у детали положительные качества (наклеп поверхностного слоя, высокую поверхностную твердость, остаточные напряжения сжатия и др.) или, наоборот, устранить отрицательные качества (дефектный слой, различные виды отклонения формы и расположения поверхностей и др.).

3. Получить поверхностный слой, отвечающий требованиям чертежа и техническим условиям, можно, управляя финишной операцией.

4. Специальные отделочно-упрочняющие методы обработки также позволяют получить заданные требования к поверхностному слою детали. В процессе обработки происходит наклеп, обеспечивается повышение твердости поверхностного слоя, формируются остаточные напряжения сжатия. К этим методам относятся: дорнование, раскатывание, обкатывание, дробеструйная обработка, вибрационное упрочнение в среде стальных тел и др.

5. В настоящее время для придания поверхностному слою деталей необходимого качества поверхности используются такие методы упрочнения, как химико-термические, поверхностное легирование, термические, покрытие поверхностей твердыми сплавами и металлами, металлизация поверхности и др.

1.5.5. Влияние качества поверхности на эксплуатационные свойства деталей машин

Эксплуатационные свойства и условия работы определяют работоспособность деталей машин. Важнейшие из них:

Износостойкость – это свойство поверхности детали сопротивляться изнашиванию. В процессе изнашивания происходит изменение формы и размеров сопрягаемых деталей, нарушаются условия правильной эксплуатации.

Усталостная прочность, или предел выносливости, характеризуется напряжением, при котором деталь выдерживает неограниченное число циклов нагружений без разрушения.

Контактная усталость – усталость материала в условиях контактной нагрузки.

Сопротивление коррозии – сопротивление материала действию коррозионных процессов.

Отражательная способность характеризуется количеством отраженного и рассеянного света.

Опорная поверхность характеризуется площадью контакта соприкасающихся поверхностей.

Электрические и магнитные свойства (электропроводность, прохождение электромагнитных волн и др.).

Эстетические свойства, или товарный вид, изделий (блеск, оттенок, цвет, гладкость и т.д.).

При оценке эксплуатационных свойств деталей и изделий рассматривают также обобщенные показатели: долговечность и надежность.

Под **долговечностью** понимают продолжительность работы детали (изделия) до разрушения или потери работоспособности. Например, долговечность коленчатого вала, поршневого кольца, коробки скоростей и др.

Под **надежностью** понимают свойство изделия (детали) сохранять работоспособность в течение установленного времени в заданных условиях эксплуатации. Надежность характеризуется безотказной работой изделия (детали) в течение заданного времени, если число отказов в этот интервал времени не превышает допустимого.

Повышение требований к качеству выпускаемой продукции и ее конкурентоспособности на внешнем рынке обуславливает внимание к проблеме совершенствования технологии финишной абразивной обработки, в том числе виброабразивной. Реальным резервом роста эффективности

вибраабразивной обработки (ВиАО) является рациональное применение новых экологически чистых абразивных и смазочно-охлаждающих технологических сред (СОТС).

Однако практика показывает, что возможности процесса вибрационной обработки (ВиО) на большинстве предприятий используются недостаточно. Вследствие этого в процессе не всегда стабильно обеспечивается выполнение требований при изготовлении высокоточных деталей, что приводит к увеличению себестоимости и низкой производительности.

Одним из возможных путей повышения эффективности ВиО является разработка научных подходов по созданию и применению новых экологически чистых абразивных гранул и СОТС и изучению основных технологических факторов и возможностей управления этими факторами в процессе ВиО. Применение математического моделирования процесса ВиО, разработка новых эффективных абразивных составов и СОТС, оптимизация и экономическое обоснование позволят решить поставленные задачи более оперативно [2].

Советскими учеными П.Е. Дьяченко, И.В. Кудрявцевым, М.М.Хрущевым, Б.Д. Грозиным, Б.И. Костецким, Д.А. Драйгором, Г.В Карпенко, И.В. Крагельским, А.А. Маталиным, П.И. Ящерицыным, М.О. Якобсоном и др., а также зарубежными специалистами выполнено значительное количество работ, подтверждающих тесную связь качества поверхности и ее важнейших эксплуатационных свойств. Это открывает пути повышения долговечности деталей машин за счет выбора соответствующих методов и режимов обработки инструмента.

Наиболее важные эксплуатационные свойства деталей машин и приборов (износостойкость, усталостная прочность, коррозионная стойкость, оптические, электрические и диэлектрические свойства и др.) в значительной мере определяются состоянием поверхности и поверхностных слоев материала (шероховатостью, микротвердостью, структурой, остаточными напряжениями, наличием на поверхности тонких пленок и т.п.), несущих на себе наибольшую нагрузку при трении, являющихся местом зарождения усталостных трещин при динамических и знакопеременных нагрузках, местом зарождения коррозионных процессов и т.п.

Рассмотрим, как влияет каждый из перечисленных параметров качества поверхности на важнейшие эксплуатационные свойства деталей.

Шероховатость поверхности является одним из основных параметров качества поверхности, определяющим многие эксплуатационные свойства деталей машин: износостойкость, коррозионную стойкость, усталостную прочность, контактную усталость, оптические свойства, прочность прессовых посадок, некоторые электрические свойства. Многочисленные экспериментальные данные показывают, что величина сил трения и износостойкость деталей машин тесно связаны с такими параметрами шероховатости, как высота и форма микронеровностей, опорная поверхность, а также направление обработочных рисок относительно действующих нагрузок. Во многих случаях установлена оптимальная шероховатость, обеспечивающая наилучшие условия работы трущейся поверхности. Например, для подшипников качения оптимальным является шероховатость поверхности $Ra = 0,04 - 0,16$ мкм, для гильз цилиндров двигателей $Ra = 0,08 - 0,32$ мкм.

Следы обработки, из которых образуются шероховатости, являются местом зарождения коррозионных процессов и усталостных трещин. Чем грубее следы обработки, тем выше скорость протекания и развития отмеченных процессов.

Увеличение микротвердости способствует повышению износостойкости, усталостной прочности, контактной усталости. Существует оптимальное значение микротвердости для конкретных условий.

Величина и знак остаточных напряжений оказывают влияние на усталостную прочность, предел выносливости. В большинстве случаев благоприятными являются сжимающие остаточные напряжения ($-\sigma_0$).

Глава 2. ОСНОВЫ ВЫБОРА КОНСТРУКЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

Поведение конструкционного материала под действием рабочей нагрузки описывает известная диаграмма деформации (рис. 2.1).

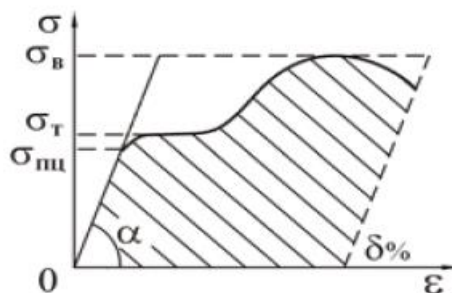


Рис. 2.1. Диаграмма упругопластической деформации материала

Характерные точки на этой диаграмме представляют собой стандартные характеристики (σ_v , σ_t , $\sigma_{пл}$, δ). Площадь на диаграмме соответствует работе, затраченной на деформацию, отнесенной к единице объема. Тангенс угла α – это модуль упругости при растяжении, характеризующий жесткость материала.

Металлические материалы

Детали гидроприводов изготавливают в основном из высоколегированных и высококачественных инструментальных, цементуемых, азотируемых и (реже) нержавеющей сталей, отличающихся повышенной износостойкостью, малым коэффициентом линейного расширения, минимальной деформацией при термической обработке, эксплуатации и хранении.

Материал золотниковых, дроссельных пар должен сохранять свои первоначальные размеры в процессе работы. Малые деформации при термической обработке позволяют оставлять минимальный припуск для доводочных операций. Высокая твердость рабочих поверхностей наиболее ответственных деталей (прецизионных, деталей МСХ и т. д.) предотвращает шаржирование в них твердых включений, встречающихся в рабочей жидкости, а их износостойкость обеспечивает наименьшее истирание трущихся поверхностей.

Стали. Для приобретения нужных качеств стали подвергают термической обработке. Предел прочности сталей на растяжение $\sigma_v = (55 \div 200) \cdot 10^3 \text{ Н/см}^2$, предел текучести $\sigma_t = (33 \div 170) \cdot 10 \text{ Н/см}^2$, относительное удлинение $\delta = 25 \div 5\%$, твердость (после термообработки) $HRC 40\text{—}62$.

Чугуны. При рабочих давлениях до 10^3 Н/см^2 применяют чаще всего серый конструкционный, сравнительно дешевый чугун СЧ 21-40. Корпусные детали и силовые элементы узлов, работающих под большим давлением, изготавливают из чугунов с шаровидным графитом (так называемых сфероидальных чугунов), отличающихся плотной и компактной структурой графита, что обеспечивает наименьшее отношение поверхности к объему. Преимущество такого чугуна в том, что можно в широких пределах изменить структуру его металлической основы, выбирая соответствующие состав исходного чугуна, технологию отливки и ее термическую обработку. Так можно получить перлитный, перлитно-ферритный, мартенситный, аустенитный и другие чугуны с различными физическими, прочностными, эксплуатационными и технологическими свойствами. Чугун с шаровидным графитом имеет высокие пределы прочности на изгиб, растяжение и сжатие, четко выраженный предел текучести, заметное удлинение

в литом состоянии и значительное удлинение после отжига, сравнительно высокую твердость после термообработки. Так, для чугуна марки ВЧ 40-10 $\sigma_B = 40 \times 10^3 \text{ Н/см}^2$, $\delta = 10\%$ и $HB 100$.

Цветные металлы и их сплавы. Алюминий и его сплавы. Алюминий является основой для производства сплавов. В общем машиностроении и, в частности, при производстве гидроприводов применяют деформируемые и литейные сплавы алюминия.

К деформируемым сплавам относятся дюралюмины (Д-1, Д-21 и т. д.) и высокопрочные сплавы В-95, В-96, типа АК. Эти сплавы обрабатывают давлением в горячем состоянии и затем подвергают термической обработке и иногда поверхностному упрочнению.

При термической обработке деформируемые сплавы нагревают в электропечах с принудительной циркуляцией воздуха или в ваннах, содержащих расплавленную селитру ($50\% \text{ NaNO}_3 + 50\% \text{ KNO}_3$). В селитровых ваннах обеспечивается быстрое и равномерное прогревание сплавов и исключается окисление, характерное для нагрева в воздушной среде. При этом также облегчаются условия регулирования температуры.

Закалка алюминиевых сплавов производится в холодной воде. Во избежание трещин детали диаметром более 80 мм закачивают в горячей воде. Их можно закачивать и на воздухе, однако при этом увеличивается опасность повышения неоднородности структуры металла и ухудшения антикоррозионных свойств.

Титан и его сплавы. Титан отличается малой плотностью и высокой прочностью, коррозионной стойкостью, сравнительно небольшим коэффициентом объемного расширения. Титан устойчив против действия большинства кислот и щелочей. Однако он имеет высокий коэффициент трения и низкие антифрикционные свойства. При азотировании и поверхностном упрочнении другими элементами титан применяют в узлах трения. Механические характеристики титана следующие: плотность $4,5 \text{ г/см}^3$, $\sigma_B = (50 \div 55) 10^3 \text{ Н/см}^2$, $\delta = 25\%$, $HB 100—120$. Эти свойства могут быть улучшены в результате легирования титана хромом. При производстве гидроприводов (например, при изготовлении колес гидротрансформаторов) применяют сплавы повышенной пластичности (ВТ-5 и др.). Они хорошо свариваются и штампуются. При работе в условиях низких температур рекомендуется использовать сплав АТ-3, который сохраняет высокую пластичность при температуре -50° С и хорошо обрабатывается давлением. Особенно перспективно применение высокопрочных сплавов ВТ-14, ВТ-15, ВТ-16. Из них изготавливают корпусные детали, работающие при высоком давлении.

Механические свойства титановых сплавов: $\sigma_B = (80—135) 10^3 \text{ Н/см}^2$, $\sigma_{0.2} = (70—120) 10^3 \text{ Н/см}^2$, $\delta = 20 \div 4\%$ (верхний предел относится к высокопрочному сплаву ВТ-16). Упрочняющая термическая обработка сплавов ВТ заключается в закалке и старении. Например, сплав ВТ-14 закаливается в воде при 880° С и подвергается старению при 500° С в течение 14 ч. Титановые сплавы хорошо лются в металлические формы.

Бронзы обладают высокой коррозионной стойкостью, хорошо обрабатываются резанием. Многие из бронз имеют хорошие антифрикционные свойства. Почти все бронзы отличаются высокими литейными качествами. По механическим свойствам алюминиевые и бериллиевые бронзы не уступают многим качественным сталям. При производстве гидроприводов в основном применяются антифрикционные бронзы. Эти бронзы должны обеспечивать наименьшее изнашивание сопрягаемых деталей, низкий коэффициент трения, хорошую прирабатываемость, стабильную смазку (наличие пористой структуры), способность выдерживать большие удельные давления, сопротивляемость коррозии, более низкую твердость по сравнению с валом (для подшипников).

Для достижения хорошей смазываемости структура антифрикционного сплава должна быть разнородной и состоять из твердых опорных частиц и мягких частиц, истирающихся при работе.

Неметаллические материалы

Эластомеры включают в себя резину всех типов, применяемую в основном для изготовления различных видов уплотнений и прокладок. Резине свойственна высокая эластичность, непроницаемость для газов и жидкостей, амортизационная способность, стойкость к воздействию химических веществ. Резина состоит из основы, в качестве которой используется каучук, и ингредиентов. Резина включает в себя следующие компоненты: каучук, наполнители активные (сажи) и инертные (мел), вулканизированные агенты (сера), ускорители вулканизации, противостарители, пластификаторы, мягчители.

Как правило, фигурные прокладки изготавливают из эластомерных материалов, листовые – из асбеста, бумаги, кожи, пробки, резины, фибры, фторопласта и других материалов.

2.6. Полимерные материалы

Полимерные материалы обладают высокой теплостойкостью, сопротивлением к истиранию, износу, отношением прочности к массе, технологичностью.

Среди полиамидных композитов функционального назначения представляют интерес электропроводные, самосмазывающиеся и ударопрочные пластмассы. Электропроводность пластмасс достигается введением в полимер электропроводного наполнителя. Для получения композитов, рассеивающих статическое электричество, используется сажа. Стальные волокна придают материалам электропроводность и уменьшают их усадку. Введение углеродных волокон позволяет получать высокопрочные детали стабильных размеров.

Для изготовления шестерен, подшипников, кулачков и других изделий, которые должны обладать повышенными функциональными свойствами, рекомендуются самосмазывающиеся композиции. Для улучшения функциональных свойств в состав полимеров включают различные добавки: полиэтилентерефталат, жидкие силиконы, графит, сульфид молибдена.

Акриловые полимерные волокна по прочности превосходят металлы.

Для переработки полимеров используются традиционные методы: экструзия, литье под давлением и прессование. К настоящему времени созданы агрегаты, позволяющие получать пленку шириной 24 и более метров, осуществлять ориентационную вытяжку ультратонких пленок толщиной 2...5 мкм и даже менее 1 мкм, получать листы толщиной более 20 мм методом экструзии.

Важной характеристикой современного конструкционного материала является его так называемая удельная прочность (прочность, приходящаяся на единицу плотности). По этому показателю значительное превосходство перед металлами имеют наполненные и армированные полимерные композиционные материалы на основе тонких металлических, стеклянных, графитовых и других типов волокон и терморезистивных связующих (табл. 2.4). Если текстолиты по удельной прочности приближаются к высокопрочным металлам, то полимерные композиты однонаправленного армирования их по этому показателю существенно превосходят. Это объясняется чрезвычайно высокой прочностью тонких волокон на растяжение, обусловленной при отсутствии механических повреждений практически межмолекулярными связями. Роль полимера в таких композициях – связать в единое целое разрозненные волокна и заставить их работать одновременно в составе конструкционного материала. Поэтому он должен обладать высокими адгезионными характеристиками и модулем упругости, приближающимся к модулю упругости арматуры. Для изделий, работающих в условиях повышенных температур, должна быть обеспечена и термостойкость связующего.

Основная технологическая трудность работы с такими материалами состоит в том, что они в процессе переработки, не имея начальной жесткости, должны принимать форму той оснастки, на которой перерабатываются (рис. 2.5).

Материал	св. МПа	Плотность	Суд
Сталь	1500-2000	7,8	200 - 255
Сплавы на основе алюминия	500 - 750	2,7	200 - 275
Сплавы на основе титана	1000- 1500	4,5	220 - 330
Наполненные и армированные полимеры	500- 1000	2,0	250 - 500
Металломатричные композиции	500- 1000	3,5	140-280

Поэтому наибольшей прочности материала удастся достичь на изделиях сравнительно простой формы, получаемых методом намотки ленты из однонаправленных волокон, пропитанных связующим (сфера, цилиндр, тор и т.п.). В остальных случаях формирование изделия осуществляется послойной выкладкой, пропитанной полимером ткани с прикаткой, или созданием тем или иным способом небольшого внешнего давления. Свою окончательную форму изделие приобретает в процессе полимеризации (холодной, горячей, ядерной).

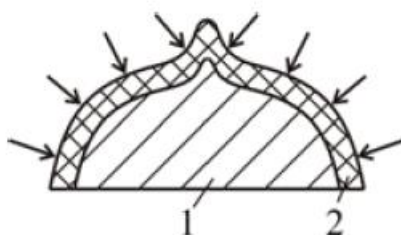


Рис. 2.5. Формование корпуса лодки из стеклопластика: 1) оправка; 2) армированная стеклотканью полимерная композиция

Из наиболее известных областей применения таких материалов – это корпуса ракет и ракетных двигателей разнообразной формы, судов и лодок, планеров, элементов корпусов автомобилей, защитных головных уборов (каска) и одежды (бронежилеты), телескопические удилища, изделия, применяемые в строительстве, медицине и многое другое.

2.7. Металломатричные композиционные материалы

Металломатричные композиты (ММК) образованы металлической матрицей из свинца, цинка, алюминиевых, магниевых, титановых, медных сплавов с упрочняющим наполнителем из углеродных волокон, нитевидных кристаллов карбида и нитрида кремния, коротких волокон окислов алюминия, кремния, хрома, длинных непрерывных волокон в виде мононитей диаметром 100...200 мкм, получаемых методом химического осаждения паров бора, карбида кремния, графита или окиси алюминия. Используются также металлические нити, в частности, из нержавеющей стали.

Для увеличения износостойкости в ММК включают окись алюминия, для снижения коэффициента теплового расширения – карбид кремния.

ММК обеспечивают высокие значения таких характеристик получаемого материала, как сопротивление срез, усталости износу, прочность на разрыв при повышенных температурах эксплуатации, изотропность свойств.

2.8. Сверхтвердые керамические материалы

В настоящее время технический уровень ведущих отраслей промышленности во многом определяется объемом применения новых конструкционных материалов, в частности, керамических материалов. Несмотря на достаточно высокую стоимость, изделия из керамики пользуются спросом благодаря хорошим потребительским свойствам. Эти материалы привлекают внимание разработчиков авиакосмической, автомобильной, химической, электронной и других видов техники благодаря уникальному сочетанию механических, теплофизических, химических, электромагнитных, оптических и других свойств. Детали из керамики хорошо работают в агрессивных и абразивных жидкостях в качестве режущих инструментов. Применение материалов и изделий из конструкционной керамики позволяет создать новое поколение машин и механизмов со значительно более высокими качественными характеристиками (производительностью, надежностью, материалоемкостью, долговечностью), а также реализовать принципиально новые технические решения.

Применение керамических материалов обусловлено следующими преимуществами по сравнению с металлами и сплавами: доступностью и дешевизной исходного сырья, более низкой плотностью, более высокой удельной прочностью, износостойкостью и сопротивлением коррозии и окислению. Инструмент, например, из окиси алюминия, допускает температуру в зоне резания до 1550 °С, в то время как алмазный инструмент – до 750 °С. Это позволяет в несколько раз увеличить скорость резания. Шлифовальные круги из кубического нитрида бора могут работать со скоростью до 80 м/с и имеют большую стойкость. Кроме того, использование керамики позволяет экономить дефицитные металлы (вольфрам, молибден, никель, кобальт и др.).

Из недостатков керамических материалов основным считается хрупкость, обусловленная жесткой связью в кристаллической решетке. Физико-механические свойства некоторых современных керамических материалов могут быть проиллюстрированы данными, приведенными в табл. 2.5.

В мире налажено производство высококачественных керамических изделий из материалов на основе нитрида кремния, карбида кремния, частично стабилизированного оксида циркония, диборидов.

Таблица 2.5.

Параметр	Нитрид кремния Si ₃ N ₄	Карбид кремния SiC	Оксид алюминия Al ₂ O ₃	Диоксид циркония ZrO ₂
Плотность, г/см ³	3.5 - 3.9	3.1-3.2	3,9	5,7
Предел прочности при 800 К. МПа: при 1400 К. МПа	450 - 500 400 - 450	700- 1000 300-400		600 300
Модуль упругости. ГПа	160-320	350-420	390	200 - 250
Максимальная эксплуатационная температура. °С	1673	1923	1700	1373

В качестве примеров практического применения таких материалов могут быть упомянуты лопатки турбины авиационного двигателя, уплотнения в быстроходных турбокомпрессорных системах газоперекачивающих станций, хирургия, металлообработка и многое другое.

2.3. Методы управления механическими свойствами

При работе изделия даже в условиях статических нагрузок надежность его в значительной степени определяется запасом пластичности материала. В свою очередь, пластичность зависит от вида термической обработки, которой был подвергнут конструкционный материал. Термическая обработка подразделяется на термическую, термомеханическую и химико-термическую. Собственно термическая обработка заключается только в термическом воздействии на металл или сплав, термомеханическая – в сочетании термического воздействия и пластической деформации, химико-термическая – в сочетании термического и химического воздействий.

Собственно термическая обработка включает следующие основные виды:

1. Отжиг – термическая обработка с нагревом до температур, превышающих температуру фазовых или структурных превращений, выдержкой и медленным охлаждением, обеспечивающим получение равновесной структуры.

2. Закалка – термическая обработка с нагревом выше температур фазовых превращений, выдержкой и быстрым охлаждением, фиксирующим неравновесное состояние.

3. Отпуск – термическая обработка с нагревом ниже температуры полиморфного превращения, выдержкой и охлаждением, обеспечивающим получение более равновесной структуры и оптимальное сочетание служебных свойств.

4. Старение – термическая обработка, осуществляемая путем изотермической выдержки при повышенной или комнатной температуре, обеспечивающей увеличение прочности и твердости при одновременном снижении пластичности и удар-ной вязкости.

После закалки материал подвергается отпуску. Различают 3 вида отпуска: низкий, средний и высокий.

Низкий отпуск применяют обычно в тех случаях, когда требуется наибольшая твердость. Интервал нагрева – 150–200 °С. При этом мартенсит закалки распадается на феррит и мельчайшие карбиды. Уменьшение остаточных напряжений и некоторое падение твердости компенсируется выделением карбидов, которые служат тормозом для дислокаций и обеспечивают повышение твердости. В результате низкого отпуска 42 твердость закаленной стали сохраняется, а хрупкость несколько уменьшается. Такую структуру называют отпущенным мартенситом. У инструментальных сталей достигается твердость по Роквеллу 62 – 64 единицы.

Средний отпуск (300–400 °С) сопровождается распадом мартенсита на мелкодисперсную смесь феррита и цементита, различимую только в электронный микроскоп и называемую троститом. Достигаемая твердость по Роквеллу порядка 50 единиц и очень высокий предел упругости. Применяется для пружин и рессор.

Высокий отпуск (500–600 °С) дает структуру сорбита с невысокой твердостью по Роквеллу 30 – 35 единиц, но зато с относительно высокой пластичностью и ударной вязкостью, что делает высокоотпущенную сталь надежной при работе в условиях динамических нагрузок (кулачки, рычаги, толкатели и т.п.).

Для сравнения энергоемкости разрушения пластичного и хрупкого материалов рассмотрим сталь 45 в состоянии после низкого и высокого отпусков. Ее механические характеристики представлены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Характеристики	Низкий отпуск 200 °С	Высокий отпуск 500 °С
Опц	1150 МПа	550 МПа
Ов	1350 МПа	800 МПа
δ_5	3%	10%

Анализ диаграмм растяжения показывает, что деталь, изготовленная из более пластичного материала, оказывается во много раз более энергоемкой, чем изготовленная из хрупкого. Соответственно, увеличивается и ее надежность, так как уменьшается риск разрушения от случайных перегрузок. Особенно большую роль играет это обстоятельство в условиях динамических нагрузок.

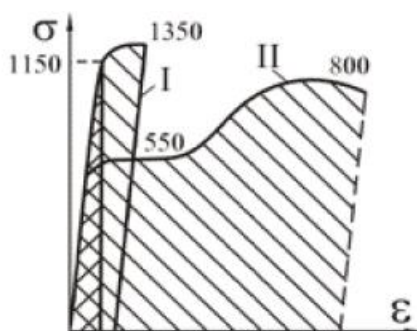


Рис. 2.2. Энергоемкость разрушения материала в различных состояниях

Выбор того или иного вида термообработки обеспечивает управление механическими свойствами конструкционно-го материала, однако не все материалы обладают такой способностью.

Рассмотрим некоторые важные характеристики конструкционных материалов.

Закаливаемость – это способность конструкционного материала повышать прочность и твердость в результате закалки. Она зависит от содержания углерода, т.к. чем более насыщен углеродом мартенсит, тем выше его твердость. Можно считать, что сталь закаливается, если в ней углерода 0,30% или более. В этом случае достигается твердость 50 и более единиц по Роквеллу, тогда как при содержании углерода 0,1% твердость мартенсита не превосходит 30 единиц.

Прокаливаемость – способность закаливаться на определенную глубину. Зависит от содержания легирующих элементов и практически не зависит от содержания углерода. Влияние легирующих элементов на прокаливаемость объясняется торможением диффузии углерода при охлаждении в процессе закалки и способствует образованию мартенсита даже в тех слоях, которые охлаждаются относительно медленно. Повышение прокаливаемости стали сопровождается также ростом сопротивления распаду мартенсита при последующем отпуске. Она характеризуется критической толщиной матери-ала, прокаливающегося насквозь.

При равной твердости и прочности различные стали с одинаковым содержанием углерода прокаливаются на разные толщины, в зависимости от содержания легирующих элементов (табл. 2.2).

Сталь	Критическая толщина, мм
40	15
40X	30
40XH	70
40XHMA	100

Свариваемость – это способность образовывать надежное сварочное соединение. Она оценивается соответствием свойств шва свойствам основного металла и несклонностью к образованию трещин, пор и шлаковых включений. Хорошо свариваются однородные металлы, а разнородные – ограниченно или плохо. Углеродистые стали хорошо свариваются при малом содержании углерода (до 0,25%), т.к. у них не происходит охрупчивания и образования закалочных трещин. Наличие легирующих элементов (кроме никеля) ухудшает свариваемость (табл. 2.3). Чистый алюминий сваривается удовлетворительно, однако имеет низкую прочность. Дюралюмины и силумины свариваются плохо, так как на поверхности образуется оксид Al_2O_3 с температурой плавления 2050 °С при $T_{пл}$ алюминия 658 °С. Сварка меди также затруднена образованием оксида Cu_2O , реагирующего с водородом, ведущим к образованию трещин. Медь должна быть чистой: менее 0,05% примесей. После сварки необходимо проковать шов.

У латуней в процессе теплового воздействия при сварке идет испарение цинка. Необходим предварительный прогрев до 500 °С, шов надо проковать, а затем дать отжиг при 700 °С.

Титан требует надежной защиты от окисления воздухом даже в стороне от шва, а также и с обратной стороны. Поэтому приходится использовать аргонно-дуговую, автоматическую под флюсом и точечную сварки с последующим отжигом при температуре 600 °С.

Таблица 2.2

Сталь	Свариваемость	Балл	Сталь	Свариваемость	Балл
Ст1кп	хорошая	8	40	удовлетвори- тельная	6
Ст4кп		8	40ХГ		6
БСт1сп		9	40ХГСА		5
БСт4сп		9	70Г		4
08		8	50ХН	плохая	0,1
			9Х		2
			У7-У 13		2-1

Упрочняемость пластическим деформированием основана на том, что в результате воздействия на металл обрабатывающего инструмента твердость его существенно возрастает, а пластичность и ударная вязкость падают. Это результат искажения кристаллической решетки, дробления зерен и блоков. В тех случаях, когда пластичные металлы не поддаются упрочнению методами термической обработки, наклеп – единственный способ повысить прочность материала. Правда, он невозможен для металлов, имеющих рабочую температуру выше их порога рекристаллизации, т.е. для таких, как олово, свинец, цинк и висмут.

Одним из видов отделочно-упрочняющей обработки, основанной на пластическом деформировании поверхностного слоя, является вибрационная обработка.

Вибрационная обработка, в зависимости от характера применяемой рабочей среды, представляет собой механический или химико-механический процесс съема мельчайших частиц металла и его окислов с обрабатываемой поверхности, а также сглаживание микронеровностей путем их

пластического деформирования частицами рабочей среды, совершающими в процессе работы колебательное движение [3].

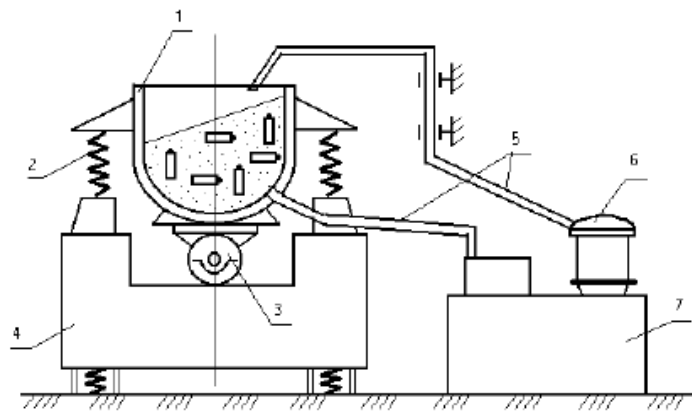


Рис. 2.3. Схема процесса виброобработки: 1) рабочая камера станка; 2) пружины; 3) вибратор; 4) основание; 5) трубопроводы; 6) помпа; 7) бак-отстойник

Процесс сопровождается последовательным нанесением на поверхность обрабатываемых деталей большого числа микроударов частицами рабочей среды при их взаимном соударении и скольжении. Удары вызваны действием направленных вибраций, сообщаемых рабочей камере, в которой размещены обрабатываемые детали и рабочая среда.

Обрабатываемые детали загружаются в рабочую камеру, заполненную рабочей средой требуемой характеристики. Рабочая камера, установленная на пружинных опорах, может колебаться в различных направлениях.

В процессе обработки детали занимают различные положения в рабочей среде, что обеспечивает достаточно равномерную обработку всех поверхностей. Большое количество микроударов, действующих на обрабатываемую деталь одновременно в различных направлениях, способствует в некоторой степени удержанию ее во взвешенном состоянии, исключая таким образом грубые забоины и повреждения. В результате циркуляции обработка происходит во всех зонах рабочей камеры, наиболее эффективно около дна камеры, где давление рабочей среды выше. Большинство операций вибрационной обработки производится с непрерывной или периодической подачей смазочно-охлаждающих технологических средств. СОТС обеспечивает удаление продуктов износа (частиц металла и абразива) с поверхности деталей и частиц рабочей среды, смачивает детали и среду, помогает их разделению и равномерному распределению деталей в рабочей среде. Интенсивность обработки можно регулировать изменением уровня жидкости в рабочей камере. В состав СОТС могут вводиться различного рода химические добавки со специальными свойствами, что также позволяет регулировать интенсивность процесса и качество обработки. СОТС способствует охлаждению обрабатываемых деталей.

Сочетание таких элементов процесса, как последовательное нанесение множества микроударов, интенсивное перемешивание рабочей среды и обрабатываемых деталей при различной их взаимной ориентации в зависимости от характеристики и состава рабочей среды и режимов обработки, создает условия для выполнения очистных, доделочных, шлифовально-полировальных и упрочняющих операций (очистка литых заготовок из металлов и пластмасс, деталей от окалина и коррозии, удаление заусенцев, округление острых кромок, шлифование и полирование поверхности, поверхностный наклеп, мойка и сушка деталей, очистка деталей от нагара, накали и различных налипания).

Конструктивное исполнение устройств для вибрационной обработки позволяет применять различные сочетания твердых, жидких и смешанных компонентов рабочих сред. Это создает условия для протекания как процессов механической обработки в виде микрорезания и пластического деформирования, так и физико-химических процессов и их совмещения путем введения в состав рабочей среды соответствующих материалов, растворов, электролитов. Вибрационная обработка протекает в условиях относительно высокой активности обрабатываемой поверхности вследствие ее очищенности от окислов и загрязнений и применения соответствующих СОТС.

Результаты исследований и опыт промышленной эксплуатации позволяют сделать вывод о необходимости и целесообразности дальнейших исследований, направленных на изыскание новых разновидностей, а также способов интенсификации известных процессов вибрационной обработки.

2.4. Эксплуатационные факторы, влияющие на выбор материала

Пластическое деформирование часто приводит к изменениям во времени формы и размеров деталей, т.е. сопровождается размерной, а точнее геометрической нестабильностью. Природа ее состоит в распаде неустойчивых структурных составляющих (например, пересыщенных твердых растворов) и релаксации остаточных напряжений. Так, шпиндели точных токарных станков даже без нагрузки с течением времени могут потерять свою точность, отверстия в больших поковках из круглых становятся эллиптическими, станины коробятся, чугунные детали в процессе циклических нагревов «растут» и т.д. «Рост» чугуна – результат распада цементита и образование более рыхлого графита, а главное – окисление проникающим в металл кислородом. Аналогичное явление наблюдается и в результате многочисленных нагревов и охлаждений у многих металлов, в частности, у титановых сплавов.

Для повышения геометрической стабильности следует:

- 1) выбирать металлы и сплавы с медленным протеканием диффузии, например, стали, легированные растворимыми примесями;
- 2) использовать стали, не склонные к распаду пересыщенных твердых растворов;
- 3) проводить стабилизирующую обработку, т.е. подвергать пластическим деформациям для «срезания» пиковых напряжений или галтовке, резонансным вибрациям или использовать быстрые циклические нагревы (тепловые удары), а так-же естественное или искусственное старение;
- 4) избегать технологии, связанной с появлением высоких остаточных напряжений.

Напряжения первого рода – это напряжения, уравнивающиеся в масштабах всего изделия, т.е. макроскопические напряжения. Они могут как разупрочнять, так и упрочнять металл, поскольку, суммируясь с рабочими напряжениями сжатия на поверхности изделия могут препятствовать развитию поверхностной трещины. Сопротивление металла сжимающим напряжениям значительно выше, чем сопротивление растягивающим, поэтому правильное распределение напряжений первого рода способно обеспечить существенное повышение общей прочности металла, особенно в условиях действия циклических напряжений.

Сильное снижение прочности и пластичности происходит также вследствие концентраторов напряжений в виде дефектов макроскопических и микроскопических размеров. Первые – следствие всякого рода надразов, сверлений и выточек на реальной детали, вторые – это микротрещины, микроскопические инородные включения, царапины и плены. Чем они острее и глубже, тем сильнее

падает прочность металла. Особенно опасны они для хрупких металлов, у которых вблизи вершины концентратора не происходит релаксации напряжений. Такие материалы следует проверять на вязкость разрушения. Для уменьшения опасности острые надрезы нужно скруглять, делая так называемые галтели.

Для повышения выносливости деталей требуется:

- 1) исключение опасных концентраторов напряжений в виде острых надрезов, сверлений, переходов по толщине;
- 2) повышение предела текучести закалкой, наклепом, химико-термической обработкой;
- 3) обеспечение достаточной прокаливаемости для упрочнения на всю толщину детали;
- 4) создание на поверхности сжимающих напряжений и всяческое уменьшение растягивающих, которые могут возникнуть, например, в результате покрытий типа цинкования и кадмирования;
- 5) получение максимально гладкой поверхности, лучше всего полированной.

Прочность существенно зависит также от гомогенности и характера микроструктуры, учитывающего наличие волокна, текстуры, зон трансформации.

2.5. Методы управления характеристиками поверхностного слоя

Изнашивание – процесс постепенного изменения размеров тела при трении, проявляющийся в отделении с поверхности трения частиц материала или в его остаточной деформации. Важно отметить, что по причинам изнашивания выходят из строя 80 – 90% всех деталей машин.

Процессы изнашивания очень сложны и обычно сочетают механические, физические и химические воздействия. На рис. 2.4 представлена классификация механизмов изнашивания.



Рис. 2.4. Классификационная схема механизмов изнашивания

Обычно происходит сочетание нескольких видов механизмов одновременно и преобладание одного из них. В соответствии с этим приходится выбирать те или иные способы повышения износостойкости. Рассмотрим механизмы изнашивания и меры борьбы с ними.

Абразивный износ заключается в срезании гребешков на поверхности детали или прорезании канавок, внедряющимися в поверхностные слои какими-либо твердыми частицами. Следовательно, повысить износостойкость можно, повысив твердость поверхности. Это достигается как выбором материала, так и упрочняющей обработкой: ТО, ХТО, ППД, а также нанесением твердых покрытий и наплавкой. Усталостный износ – результат циклического воздействия гребешков одного тела на гребешки другого. Следует иметь в виду, что чем выше удельное давление, тем интенсивнее идет износ. Однако рассчитать это давление как отношение действующих усилий к геометрическим размерам деталей нельзя, так как площадь фактического контакта всегда значительно меньше, чем номинальная площадь поверхности. При сближении тел первый контакт происходит всегда по трем точкам. Далее сила трения растет с увеличением площади фактического контакта. При скольжении тел

друг по другу циклические нажатия (и сдвиги, сопровождающиеся периодическими растяжениями и сжатиями) приводят к накоплению усталостного повреждения вследствие скопления дислокаций у препятствий. Возникают субмикротрещины, перерастающие в микротрещины, ведущие к локальному разрушению поверхности («пит-тинг»). Особенно характерно такое разрушение для деталей типа подшипников качения. Повышение износостойкости достигается высокой поверхностной твердостью и созданием сжимающих поверхностных напряжений. Следует, однако, отметить одно противоречие: при росте твердости растет и сопротивление износу, но из-за повышения жесткости уменьшается площадь фактического контакта, а значит, растет и удельное давление. Вот почему капроновые шестерни могут иметь большую долговечность, чем стальные. Площадь фактического контакта у капрона в 15 раз больше, а давление в 15 раз меньше, чем у стали. Интересно отметить, что «естественная» твердость материала дает безусловное повышение износостойкости, тогда как повышение твердости методами ТО и ППД оказывается малоэффективным, так как «искусственное» повышение твердости сопровождается переводом металла в энергетически менее устойчивое состояние и достигается ценой потери пластичности.

Адгезионный износ представляет собой отрыв частиц металла вследствие сдвигания мгновенно приварившихся участков. Уменьшение такого износа достигается использованием разнородных металлов, у которых нет близкого химического сходства. Повышение температуры увеличивает адгезию вплоть до схватывания, поэтому необходимо обеспечивать соответствующее охлаждение. Особую роль здесь играет смазка.

Избирательный перенос – особая форма изнашивания, когда атомы более мягкого металла, например, меди, переносятся на поверхность более твердого, например, стали, а затем при достижении некоторой толщины слой начинает разрушаться с обратным переносом меди. При этом атомы меди почти не выносятся из зоны трения, и износ оказывается минимальным. Повышение стойкости здесь достигается правильным выбором трущихся материалов и состава смазки. Следует иметь в виду, что смазка может не только уменьшать износ, но и вызывать расклинивание поверхности металла вследствие эффекта Ребиндера, ускоряя изнашивание.

Окислительное изнашивание состоит в образовании и истирании окисных пленок трущихся поверхностей металла. Обычно окисные пленки не склонны к схватыванию (так как связи насыщены), и скорость их износа не связана с твердостью основного металла. Главное – сопротивление износу самих пленок. Этот механизм характерен для подшипников качения. Главная роль в повышении износостойкости принадлежит правильному выбору смазки.

Фреттинг-коррозия протекает при малых взаимных перемещениях контактирующих деталей в результате вибраций или упругих деформаций. Она идет в несколько этапов: сначала – наклеп, схватывание соприкасающихся поверхностей на выступах, разрушение оксидных пленок; затем – медленная стадия коррозионного повреждения с образованием активной среды из влаги и кислорода на поверхности оксидов и быстрое разрушение разрыхленных слоев. Эта стадия совершенно недопустима. Повышение износостойкости достигается повышенной твердостью и коррозионной стойкостью поверхностей.

Изнашивание имеет три явно выраженных этапа: приработка, протекающая в относительно короткое время со значительным износом; нормальный износ, идущий медленно и монотонно; катастрофический износ. Сейчас получают распространение твердые смазки (графит, слюда, дисульфид молибдена), в которых происходит послойное скольжение вещества. Наиболее стабильно работает графит.

Выбор износостойких материалов диктуется преобладающим механизмом изнашивания. Расчеты разработаны слабо, однако существует несколько правил. Так, при однородной паре

необходима разность твердости не менее 10 единиц Бринелля. Правило Шарпи диктует необходимость использования подшипника из сплава с гетерогенной структурой типа баббита. На вал иногда рекомендуется наносить тонкий слой легкоплавкого покрытия. Необходимо также обеспечивать положительный градиент механических свойств по глубине детали, т.е. чем глубже, тем прочнее должен быть металл. Однако выбор материала нельзя оторвать от типа смазки: чем надежнее смачивание и удержание ее на поверхности, тем сильнее влияние на стойкость.

Методы упрочнения поверхностей деталей.

В триботехнологии, [5] в качестве способа повышения качества несущего слоя указывается на такие возможности как:

- образование слоя или пленки из высокопрочного, коррозионно- или износостойкого материала из материала-основы;
- увеличение опорной длины профиля поверхности механическими, электрофизическими методами, алмазно-абразивной обработкой и ее разновидностями; электрохимическим полированием; выглаживанием и обкатыванием; сатинированием в процессе обработки вращающимися металлическими щетками; уменьшение или регуляризация значений шероховатости,
- упрочнение деформационное, получается путем обработки поверхностным пластическим деформированием или путем воздействия на поверхность материала основного материала концентрированными потоками энергии или
- изменения химического состава поверхности основного материала в результате его перенасыщения атомами материала-упрочнителя – поверхностным легированием;
- термо-упрочнение в следствии локального термического воздействия на слой поверхности основного материала;
- с помощью комбинирования изложенных методов.



Методы упрочнения поверхности материала или более широкой модернизации поверхности исключительно разнообразны по своей природе, и многочисленны.

В тех случаях, когда высокая твердость требуется не во всем объеме детали, а только на ее поверхности, применяют **поверхностную закалку**, например, с нагревом ТВЧ или газопламенным нагревом. В последнее время начали применять и другие методы поверхностного упрочнения, например, лазерной обработкой, когда поверхность металла мгновенно нагревается до высокой температуры и тут же остывает из-за высокой теплопроводности металла. Возникает тонкий слой закаленного металла с исключительно мелким зерном и высокой твердостью. Эффективен

поверхностный нагрев потоком плазмы, имеющим в центре температуру 10 – 20 тыс. градусов. Эффект аналогичен лазерному упрочнению.

Химико-термическая обработка (ХТО) состоит в том, что поверхностные слои изделий насыщаются при высокой температуре каким-либо легирующим элементом, причем его атомы не просто адгезируются поверхностью, но и диффундируют вглубь, искажая кристаллическую решетку и прочно закрепляясь в ней. Наиболее распространены: цементация, азотирование, цианирование (нитроцементация), алитирование, силицирование, хромирование. Применяется также и многокомпонентное насыщение, обеспечивающее одновременно несколько эффектов. Наибольшая поверхностная твердость достигается при хромировании и борировании, коррозионная стойкость – при хромировании, никелировании и силицировании, окалиностойкость – при алитировании и т.д. Следует иметь в виду, что ХТО – это продолжительная и дорогая обработка, а новые ускоренные процессы дают менее надежные и хуже работающие слои.

Поверхностное упрочнение может осуществляться нанесением покрытий методами химического и физического осаждения, ионным упрочнением, термическим и плазменным напылением. Толщина покрытий при различных методах может колебаться от нескольких микрометров до миллиметров.

Широкое промышленное применение нашел метод химического осаждения из газовой фазы износостойких покрытий на твердосплавный инструмент. Это покрытия на основе карбидов и нитридов титана, хрома и ниобия, а также оксидов алюминия и некоторых других соединений. Формирование осуществляется осаждением до нескольких мкм в час из газовой среды при температуре 950...1000 °С. Покрытия могут быть однослойными и многослойными. Стойкость режущих пластин с покрытием возрастает в 3 – 4 раза.

Другим перспективным методом нанесения износостойких покрытий является ионно-плазменное напыление в вакууме. Этот метод дает возможность получения покрытий с хорошей адгезией, обеспечивает малую плотность и равномерную структуру покрытий без предварительной очистки и прогрева, а также равномерные по толщине покрытия на инструменте любой конфигурации. Наибольшее распространение получили покрытия из нитрида титана золотистого цвета. Они предпочтительны для инструмента из быстрорежущих сталей благодаря сравнительно низким температурам процесса, но применяются и для металлокерамических сплавов. Процесс может быть многократно повторен после переточки инструмента, что позволяет увеличить срок службы инструмента в 15 – 20 раз. Для реализации ионно-плазменного напыления отечественной промышленностью созданы установки типа «Булат-3Т», работающие при температурах от 200 °С и выше. Это позволяет наносить износостойкое покрытие не только на инструмент из быстрорежущей стали с температурой отпуска после закалки 520...540 °С, но и на инструмент из высоко-углеродистой инструментальной стали с температурой отпуска после закалки 200...300 °С.

К новым малоизвестным технологическим процессам поверхностного упрочнения твердосплавных инструментов относится **ультразвуковая обработка**. Сущность ее состоит в том, что изделие из твердого сплава подвергается ударам с частотой 20...22 кГц. В вольфрамокобальтовых твердых сплавах под действием ультразвуковой обработки определенной интенсивности происходят структурные изменения. К преимуществам такой обработки можно отнести: экспрессность (длительность обработки составляет 30...150 с), высокую производительность, низкую себестоимость и значительное повышение срока службы упрочненных изделий (стойкость инструмента возрастает в 1,3...2,5 раза). Аналогичный эффект имеет место и при обработке сталей.

Не менее опасным оказывается и явление коррозии, которую подразделяют на химическую и электрохимическую. Известно, что коррозия уносит в год от 10 до 30 % всего добываемого металла.

Химическая коррозия – это химическое взаимодействие материала с окружающей средой, ведущее к разрушению материала. Поскольку продукты окисления остаются на поверхности, то

процесс обычно затухает, происходит пассивация. Образующаяся на поверхности пленка в ряде случаев обеспечивает надежную защиту. Такая пленка характерна для благородных и ряда цветных металлов.

Гораздо опаснее оказывается электрохимическая коррозия. Ее схему можно представить так. При погружении металла в жидкую среду его атомы начинают притягиваться к атомам жидкости и переходят в нее. Электроны остаются в металле, вызывая отрицательный заряд. После того как заряд достигнет определенной величины, наступает равновесие между уходящими и возвращающимися ионами. Наклеп, искажающий кристаллическую решетку, облегчает уход ионов, ускоряя коррозию. Ионам легче уходить с выступов, чем из впадин. Поэтому во впадинах возникает повышенная концентрация ионов, а возникающая поляризация приводит к накоплению ионов водорода именно в ямках, так как они удаляются из ямок труднее. Там электролит становится очень «кислым», и коррозия резко усиливается. Чем выше гребешки на поверхности металла, тем больше будет разность потенциалов на вершинах и впадинах и тем сильнее идет коррозия. Отсюда вытекает важность геометрической характеристики качества поверхности металла для повышения коррозионной стойкости.

Защита металлов и сплавов от коррозии осуществляется различными способами. Покрытие металла другими, более стойкими металлами, эффективно только при условии целостности защитного слоя. Применение олова, серебра, золота и хрома в случае появления в защитном слое трещины превращает «щит» в оружие коррозии. А применение таких металлов, как цинк и кадмий, оказывается эффективным и при нарушении сплошности слоя, так как возникает гальванопара обратного знака, и пока на поверхности стали есть достаточное количество цинка, коррозия основного материала не идет.

Очень устойчивы эмали, т.е. горячие покрытия, получаемые отжигом специального состава, и оксиды натрия, калия, алюминия, борный ангидрид и фтор. Однако трущиеся и ударяющиеся поверхности покрывать эмалями нельзя. Для защиты широко применяют гальваническое хромирование, но хром не дает плотного слоя, в результате чего происходит коррозия основного металла. Поэтому приходится применять многослойные покрытия, например, медь-хром или медь-никель-хром. У трущихся деталей суммарная толщина покрытия должна повышаться с 20 до 60 мкм. Твердое покрытие хромом обеспечивает хорошую износостойкость.

Для защиты пружин применять металлизацию нельзя, так как либо разрушается слой, либо снижается выносливость. Пружины подвергаются фосфатированию, после чего их непременно надо окрасить. Несколько слабее действует оксидирование (воронение), которое дает черную или синеватую пленку толщиной 0,6 – 0,8 мкм. Его ведут либо в химическом растворе при 120 °С., либо нагреванием тонкого масляного слоя.

Наиболее надежные покрытия получают методами ХТО (азотирование, хромирование, никелирование). Основной их недостаток – они дорогие и трудоемкие.

Для уменьшения коррозии применяют всевозможные краски и лаки, широко используя синтетические пленкообразующие, и наносят полимерные пленки. Охлаждающую воду можно использовать как ингибитор, который уменьшает коррозионное воздействие. Для борьбы с электрохимической коррозией еще Дэви предложил метод протекторной защиты медной обшивки кораблей (1824 г.), состоящей в том, что на медную обшивку подвешивают цинковые или железные протекторы, выступающие в качестве анода. Сейчас протекторы делают из магниевых сплавов МЛ-4 массой от 5 до 20 кг. Срок их службы – 5 лет. Так защищают подземные трубопроводы, цистерны и кессоны.

Наиболее радикальный метод борьбы с коррозией – применение соответствующих материалов, например, нержавеющей стали. Сейчас это либо хромистые стали мартенситного или ферритного класса, либо хромоникелиевые стали аустенитного класса. Наличие 11,6% хрома в стали обеспечивает

сплошной защитный слой, образуя пленку, плотно закрывающую поверхность. Однако механические свойства такого легированного феррита невысоки (предел прочности 600 – 700 МПа). Повышение содержания углерода до 0,3% увеличивает прочность и твердость стали, снижая ее пластичность ввиду перехода стали в мартенситный класс (предел прочности до 1700 МПа). Такие стали пригодны для режущего инструмента, но имеют пониженную коррозионную стойкость, ввиду того, что углерод отвлекает часть хрома на образование карбидов.

Наивысшая стойкость достигается у стали 0X13 в полированном состоянии. Если же ее поверхность только шлифована, то стойкость оказывается не намного выше, чем у про-стой углеродистой стали. Поэтому в ответственных случаях, особенно в тропическом климате, следует применять стали аустенитного класса, т.е. дополнительно легированные еще и никелем, расширяющим область существования гамма-железа. Поскольку растворимость любых примесей в аустените во много раз выше, чем в феррите, такие стали после закалки при 1100 °С в воде и отпуска имеют предел прочности 550 МПа и очень высокую коррозионную стойкость в кислотах и щелочах. Для дальнейшего повышения их стойкости применяют дополнительное легирование 1% титана или ниобия, которые, присоединяя к себе углерод, предохраняют хром от участия в карбидообразовании. Дефицитный никель сейчас стараются заменить марганцем, но при этом снижаются технологические свойства и падает пластичность.

В тех случаях, когда оказывается невозможным применять даже нержавеющей сталь, применяют цветные сплавы типа латуни, бронзы, титана. Крупные отливки с повышенной коррозионной стойкостью изготавливают из легированных чугунов, содержащих 10 – 15% никеля и хрома.

Глава 3. ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

3.1. Технологический процесс и его составляющие

Разработка *технологических процессов* (ТП) входит основным разделом в технологическую подготовку производства и выполняется на основе принципов «Единой системы технологической подготовки производства» (ГОСТ 14.001-83). ТП разрабатывается с использованием имеющегося типового или группового ТП. При отсутствии таковых ТП разрабатывается как единичный, с учетом ранее принятых прогрессивных решений в действующих единичных ТП-аналогах.

Базовой исходной информацией для проектирования ТП служат: рабочие чертежи изделия в электронном виде или в твердой копии, технические требования, объем годового выпуска изделий, наличие оборудования и оснастки.

Заготовка выбирается или проектируется исходя из соображений, представленных в следующем разделе. При необходимости проводится технико-экономическое обоснование.

Маршрутная технология подразумевает всю обработку от заготовки до готовой детали, разбитую на операции, следующие последовательно. Для каждой операции выбирается оборудование и технологическая оснастка (приспособления, обрабатывающий и измерительный инструмент). При отсутствии необходимой оснастки оформляется заказ на ее проектирование и изготовление. При

разработке операционной технологии выбираются технологические базы и схемы базирования. Применяются две системы установочных баз – основные базы и черные базы, используемые для базирования при обработке основных баз.

На первых одной-двух операциях маршрутной технологии при базировании по черным базам обрабатываются основные технологические базы.

Практически любой технологический процесс изготовления элементов изделия, даже средней сложности, – это многоэтапный процесс, включающий технологические операции, базирующиеся на разных ФЭ. Здесь и разнообразные виды лезвийной обработки (точение, фрезерование, сверление, строгание и т.д.), абразивной (шлифование, хонингование, полирование и т.д.), электрофизических (электроэрозионная, плазменная, анодно-механическая, ультразвуковая, лазерная) и электрохимической, пластическим деформированием (накатка, раскатка, дорнование, термофиксация) и многие другие виды обработки. Сущность этих процессов будет рассмотрена в последующих частях курса.

Все они объединены единым технологическим процессом и предусматривают превращение заготовки в готовый для сборки элемент изделия при последовательном изменении от операции к операции его точности размеров, качества поверхности и физико-механических свойств конструкционного материала. Основные характеристики процессов механической обработки материалов представлены в табл. 2.4.

В соответствии с единой системой технологической документации (ЕСТД) технологические операции нумеруются числами через 5 или 10 (5, 10, 15, 20 и т.д. или 10, 20, 30, 40 и т.д.).

Установы обозначаются буквами русского алфавита (А, Б, В и т.д.), а переходы – цифрами, начиная с 1 (1, 2, 3, 4 и т.д.). Технологический процесс оформляется на специальных бланках ЕСТД для маршрутной, маршрутно-операционной и операционной технологий в зависимости от типа производства. Различают единичное, серийное и массовое производство изделий. При единичном производстве изделия изготавливаются единичными экземплярами, повторяемость которых редка или отсутствует. В серийном производстве изделия изготавливаются сериями или партиями. Количество изделий в партии определяется в зависимости от характера серийного производства (мелкосерийное, среднесерийное, крупносерийное). При массовом производстве за каждым рабочим местом закрепляется одна постоянно повторяющаяся (в течение определенного календарного срока) операция.

Построение маршрутной технологии во многом зависит от конструктивно-технологических особенностей элемента изделия и требований точности и качества, предъявляемых к его основным, наиболее ответственным поверхностям. Для основных поверхностей с учетом точности выбранной заготовки и достижимых коэффициентов уточнения при обработке выбирают методы обработки, назначают число и последовательность выполняемых переходов, определяют содержание операций. Место обработки менее ответственных поверхностей определяется конкретными условиями и не является принципиально важным. Если обработку этих поверхностей по расположению и видам применяемых инструментов можно вписать в основные операции, то ее включают в состав этих операций в качестве переходов, выполняемых на черновой и чистовой стадиях обработки.

В маршрутной технологии в процессе обработки предусматривается контроль с целью технологического обеспечения заданных параметров качества обрабатываемого элемента изделия. Технолог устанавливает объект контроля и его место, обращает внимание на операции, при которых точность обеспечивается наиболее трудно, назначает методы и средства контроля, при их отсутствии выдает задание на их конструирование и изготовление.

При проектировании новых производств в основе технологических разработок и выбора оборудования должны находиться прогрессивный (типовой или единичный) ТП и технико-экономические обоснования, подтверждающие выгоду применения нового

высокопроизводительного оборудования, сложных и дорогостоящих средств технологического оснащения. На действующих предприятиях необходимо учитывать имеющееся оборудование, однако это не должно оказывать решающего влияния на разрабатываемый технологический процесс, если условия производства (например, увеличенный за счет производственного кооперирования годовой выпуск) обеспечивают рациональное использование специального оборудования, достижение высокой производительности труда, снижение себестоимости продукции.

Проектирование технологии – задача многовариантная; варианты оцениваются по производительности и себестоимости, руководствуясь технико-экономическими принципами проектирования, имея в виду максимальную экономию времени и высокую производительность.

Технологические процессы обработки типовых деталей машиностроения (валы, втулки, фланцы, зубчатые колеса, рычаги, корпусные детали и т.д.) представлены в специальной технологической литературе (см. список литературы в конце методического пособия [1, 9, 10]).

При разработке технологии сборки изделия рассматриваются возможные варианты ее последовательности, при которых гарантируется получение изделий с требуемыми потребительскими свойствами. Исходными данными для проектирования ТП сборки являются сборочный чертеж изделия в электронном виде (включая объемное изображение узлов и деталей, т.н. «рассыпуху») или в твердой копии, технические условия его испытаний и приемки, программу выпуска изделий и предполагаемую длительность выпуска изделий в годах. Цель технологических разработок – дать подробное описание процессов сборки, выявить необходимые средства производства, площади, рабочую силу, трудоемкость и себестоимость сборки изделия.

Для установления последовательности сборки необходимо уточнить служебное назначение изделия, проанализировать технические требования и выбрать методы достижения точности замыкающих звеньев. Различают методы сборки при полной, групповой или неполной взаимозаменяемости. При производстве невзаимозаменяемых изделий на последовательность сборки влияют пригоночные работы, промежуточные разборка и сборка соединений, дополнительная обработка, очистка и контроль элементов изделия.

Для условий сборки в различных промышленных отраслях могут предусматриваться методы стационарной и конвейерной сборки. Стационарная сборка предусматривается при производстве крупногабаритных изделий с использованием оснастки в виде т.н. стапелей. Элементы изделия подаются последовательно к месту сборки в определенной технологической последовательности. При конвейерной сборке определенные операции закреплены за отдельными рабочими местами, к которым последовательно подается собираемое изделие.

Испытание собранных изделий – заключительная контрольная операция качества их изготовления. Изделия испытывают в условиях, приближающихся к эксплуатационным. Все виды испытаний можно свести к приемочным, контрольным и специальным. При приемочных испытаниях выявляются фактические эксплуатационные характеристики изделия (точность, производительность, мощность, затраты энергии и т.п.), а также правильность работы различных элементов и устройств. Контрольным испытаниям подвергают изделия, у которых ранее были обнаружены дефекты. При особо высоких требованиях к изделиям их подвергают после сборки обкатке. Затем разбирают (частично или полностью), проверяют состояние элементов, вторично собирают и подвергают кратковременным контрольным испытаниям. Специальные испытания выполняют для изучения износа, проверки безотказности работы отдельных элементов, установления пригодности новых марок материалов и исследования других явлений. Специальные испытания отличаются большой длительностью. Их программа разрабатывается в зависимости от цели проведения испытаний. Таким испытаниям подвергаются не только собранные изделия, но и их отдельные элементы (коробки

передач, водяные и масляные насосы и т.д.). Испытания проводятся с использованием специальных стендов и камер.

3.2. Основные методы получения заготовок деталей

Технологический процесс практически в любой отрасли промышленного производства складывается из трех основных этапов: изготовление заготовок, изготовление элементов изделия, сборка. Отдельные этапы могут быть объединены, но это скорее исключение, чем правило.

Для качественного функционирования заготовительного производства очень важен современный подход к проектированию заготовки с точки зрения оптимизации себестоимости ее изготовления с учетом объема последующей обработки и коэффициента использования материала. Необходимо также учитывать и объемы выпуска продукции, так как от этого в существенной степени зависит подход к построению технологического процесса. Сокращение расхода металлов и других конструкционных материалов достигается путем их более эффективного использования, применения при проектировании новых изделий прогрессивных решений, а также совершенствования методов обработки материалов.

Значительное сокращение расхода материалов может быть достигнуто при переходе на принципиально новые технологические процессы изготовления заготовок, размеры которых максимально приближаются к размерам готовых деталей. Сокращение припусков на механическую обработку, в свою очередь, связано с повышением точности заготовок и уменьшением толщины дефектного поверхностного слоя. Технология малоотходного производства способствует также интенсификации механической обработки, так как в ряде случаев могут быть исключены черновые операции (точение, зубофрезерование и другие), которые с успехом заменяются силовым шлифованием или иной чистовой обработкой с высокими режимами резания.

По мере усложнения конфигурации заготовки, уменьшения припусков, повышения точности размеров и параметров расположения поверхностей усложняется и удорожается технологическая оснастка заготовительного цеха и возрастает себестоимость заготовки, но при этом снижается трудоемкость и себестоимость последующей механической обработки заготовки, повышается коэффициент использования материала. Заготовки простой конфигурации дешевле, так как не требуют при изготовлении сложной и дорогой технологической оснастки, однако такие заготовки требуют последующей трудоемкой обработки и повышенного расхода материала.

Главным при выборе заготовки является обеспечение заданного качества готовой детали при ее минимальной себестоимости. Себестоимость детали определяется суммированием себестоимости заготовки по калькуляции заготовительного цеха и себестоимости ее последующей обработки до достижения заданных требований качества по чертежу. Выбор заготовки связан с конкретным технико-экономическим расчетом себестоимости готовой детали, выполняемым для заданного объема годового выпуска с учетом других условий производства.

К числу основных технологических процессов малоотходного производства заготовок, как известно из курса «Технология конструкционных материалов», относятся: прогрессивные методы изготовления литых заготовок из металлов и пластмасс; методы получения заготовок горячим и холодным пластическим деформированием, включая в себя процессы изготовления без использования прессового оборудования (взрыва, электроимпульсная), холодной высадки и калибровки для исключения последующей механической обработки и т.д.; методы работы с любыми листовыми материалами (металлы, ткани, кожа, пластмассы и т.п.) путем вырубki или раскроя с использованием прогрессивных методов (газопламенного, плазменного, лазерного); современные методы и

оборудование для резки материалов, включая электроконтактную, позволяющую значительно повысить производительность при работе с труднообрабатываемыми материалами. Для заготовок из металло- и минералокерамики получили распространение методы и оборудование порошковой металлургии.

Для каждого из методов ниже в табл. 3.1 и 3.2 приводятся достижимые характеристики точности размеров и качества поверхности получаемых заготовок.

Способом литья получают заготовки рабочих колес гидромурфт и гидротрансформаторов, корпусных деталей гидромашин и гидроаппаратуры. Предпочтение отдают отливке заготовок в кокили. При этом обеспечивается необходимая точность и стабильность размеров. Таким способом преимущественно изготавливают рабочие колеса гидротрансформаторов.

Корпусные детали массой более 50 кг можно отливать в разовые сырые или сухие песчаные формы. Последние рекомендуется выполнять в опоках с применением машинной формовки. Точность отливки при этом соответствует 2-му классу.

Таблица 3.1 - Допуски размеров и шероховатость поверхностей отливок

Способ литья	Габаритный размер отливки, мм	Сплавы цветных металлов, Тепм. пл меньше 700 °С, квалитет	Сплавы цветных металлов. Тпл больше 700 °С, серый чугун, квалитет	Ковкий и легированный чугун, сталь. квалитет
Под давлением в металлические формы	Больше 100	11 - 13 Ra =0.63	12-14 Ra =1,25	
По выплавляемым моделям	100	12-14 Ra =2.5	13-15 Rz =20	14-15 Rz =20
В кокиль под давлением	100-630	14-18	15-19	16-20
Центробежное	630-4000	40	80	80

Таблица 3.2 - Допуски на элементы заготовок, получаемых обработкой давлением

Способ получения	Достигаемая точность (среднее значение), мм	Rz. мкм
Ковка на молотах и прессах	3.0 - 30.0	до 80
Ковка в подкладных штампах	1.0-2.5	до 80
Ковка на радиально-ковочных машинах - холодная - горячая	0.04 - 0.4 0.1-0.6	до 40 до 40
Штамповка	0,7-11.0	20-80
Штамповка с последующей калибровкой	0.05-0.1	Ra=2,5 Rz= 10

Штамповка высадкой на горизонтально-ковочных машинах	0.7-3.4	20-80
Штамповка выдавливанием	0.2 - 0.5	20-80
Штамповка на чеканочных прессах	0.05 - 0.25	20-80
Холодная высадка на автоматах	0.125-0.8	Ra=1.25-5.0

При машинной формовке целесообразно в целях повышения точности отливок использовать металлические стержневые ящики, стержни которых изготавливаются машинным способом и собираются с помощью кондукторов.

Преимуществами кокильного литья перед литьем в разовые песчаные формы являются более чистая поверхность отливки, меньшие припуски (что в среднем на 15% увеличивает выход годного литья), более высокие механические свойства отливок, лучшие санитарно-гигиенические условия труда и более низкая стоимость (на 15—20%) отливки. Однако при кокильной отливке чугунные детали в тонких местах отбеливаются в результате более быстрого охлаждения металла в форме, что затрудняет последующую механическую обработку. Поэтому перед такой обработкой заготовки отжигают.

Литье по выплавляемым моделям — наиболее перспективный способ получения мелких фасонных деталей типа фланцев, крышек, фитингов. При этом способе заготовка максимально приближена к окончательным размерам детали. Высокая степень чистоты получаемых поверхностей полностью или частично исключает механическую обработку. Высокая точность отливок обуславливается тщательным изготовлением пресс-формы. Отсутствие в форме разъема исключает образование перекосов, заливок и других дефектов. В последнее время применяют центробежный или центробежно-вакуумный способ заливки металла, что обеспечивает большую плотность отливки. Точность отливок лежит в пределах 4—5-го класса.

Для крупносерийного производства более экономичен способ литья аналогичных деталей в оболочковые (скорлупчатые) формы (особенно для деталей из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом). По сравнению с литьем в песчаные формы этот способ сокращает количество потребляемой литейной земли приблизительно в 10 раз, повышает производительность труда в 10—15 раз и улучшает санитарно-гигиенические условия труда.

Оболочковая форма образуется в результате спекания смеси, состоящей из 90—95% кварцевого песка и 5—10% пульверба-келита (термореактивной смолы на основе фенола и формальдегида), в металлических моделях. Прочные тонкие стенки оболочковых форм имеют толщину 4—6 мм и отличаются высокой точностью размеров. Эффективность процесса обусловлена машинной формовкой на высокопроизводительных многопозиционных агрегатах, обеспечивающих изготовление до 600 полуформ (размером 250 × 400×50 мм) в час. При этом способе точность отливок соответствует 4—5-му классам точности.

Способы литья под давлением в полупостоянные формы и центробежное литье при производстве гидропривода применяются пока ограниченно.

Обработка давлением. В единичном и мелкосерийном производстве (например, крышек гидроцилиндров) применяют свободную ковку на молотах. Точность размеров заготовки определяет ГОСТ 7829—70. При ковке в подкладных штампах уменьшается трудоемкость и увеличивается точность заготовки. При этом допуск на размер поковок в 1,5—2 раза меньше, чем при свободной ковке. Наиболее распространенным способом обработки давлением в серийном и крупносерийном производстве является метод горячей объемной штамповки, при которой нагретой заготовке придают необходимую форму в специальных штампах, имеющих полости (ручьи), соответствующие

конфигурации детали. В этом случае по размерам и форме заготовки значительно приближаются к готовым деталям.

Горячая объемная штамповка — высокопроизводительная операция. Получаемые поковки характеризуются однородным строением по величине зерна, точностью размеров и отсутствием поверхностных дефектов. С помощью такой штамповки можно получать детали сложной формы. Точность штампованных заготовок определяет ГОСТ 7505—55.

В качестве технологического оборудования используют горизонтально-ковочные машины (ГКМ), молоты, штамповочные прессы и ковочные вальцы. Наиболее удобны для штамповки на горизонтально-ковочных машинах детали, имеющие форму ступенчатых тел вращения (шатунны гидромашин, фланцевые валы, золотники и т. д.). Производительность штамповки на ГКМ 500—1000 поковок в час.

Процесс штамповки на молотах состоит из нагрева заготовки, штамповки, обрезки заусениц (облоя), термической обработки для снятия напряжений, очистки от окалины. Детали сложной формы штампуют в простых штампах методом последовательной штамповки. В последнее время стали распространяться закрытые молотовые штампы, обеспечивающие получение заготовок без облоя. Закрытый штамп не позволяет металлу растекаться по плоскости нижней половины штампа, поэтому объем заготовки равен объему поковки. Производительность штамповки на молотах двойного действия 300—6000 кг/ч (для молотов с массой падающих частей соответственно 1—20 т).

При использовании быстроходных механических прессов повышается точность поковок, уменьшаются припуски на механическую обработку, а также масса и расход металла.

На тихоходных гидравлических прессах штампуют только заготовки из легких и малопластичных сплавов, требующих малых скоростей деформирования. На прессах производится штамповка в открытых и закрытых штампах, осаживание, выдавливание, прошивка. Производительность фрикционных и кривошипных механических прессов в 2—3 раза превышает производительность молотов. При этом улучшаются условия труда (отсутствуют характерные для работы молотов шум и сотрясения).

При разработке технологического процесса горячей штамповки уточняют серийность, конфигурацию детали, материал поковки, выбирают оборудование, разрабатывают чертеж поковки с учетом допусков на штамповку и припусков на механическую обработку, уточняют параметры выбранного типа оборудования и затем проектируют штамп.

Заготовки мелких ответственных деталей типа толкателей, цилиндрических шарниров, роликов, а также болты и винты из специальных сталей и цветных сплавов изготавливают методом холодной объемной штамповки, аналогичной горячей объемной штамповке, но без нагрева заготовки. Этим методом производят высадку, объемную формовку, чеканку, калибровку и прессование. Получаемые детали отличаются повышенной точностью и чистотой поверхности. Процесс ведется на холод на высадочных прессах одно-, двух- и трехударного действия. Точность изделий близка к точности, получаемой на металлорежущих станках, и достигает 0,03—0,05 мм при высоком качестве поверхности. Производительность, в 10—50 раз выше, чем производительность на металлорежущих станках-автоматах. Стремление повысить точность и чистоту поверхности привело к разработке способа электровысадки, который позволяет получить заготовку без окалины по 2—3-му классам точности.

Листовую штамповку применяют при изготовлении регулировочных колец, шайб, прокладок. Разработан процесс листовой штамповки для ответственных деталей типа прижимных пластин аксиально-поршневых гидромашин высокого давления. Этот процесс включает разделительные (отрезку, вырубку, пробивку) и формообразующие (вытяжку, чеканку, калибровку) операции. Штамповка осуществляется на гидравлических и кривошипных прессах. Точность листовой штамповки зависит от точности штампа и метода штамповки.

Заготовки из проката. Основными заготовительными операциями являются правка, калибровка и резка. В качестве исходного сырья используются горячекатаный и холоднокатаный прокат круглого, квадратного и шестигранного сечений; цельнотянутые и электросварные трубы, листы, лента, проволока и полосовой прокат специального профиля.

Правку производят на правильно калибровочных станках с точностью 0,5 – 1 мм на 1 м длины (для прутков диаметром до 80 мм и длиной до 3 м). Прутки калибруют протягиванием через фильер.

Для отрезки заготовок используют чаще всего гильотинные ножницы и специальные отрезные станки с пильными дисками.

Технико-экономическое обоснование выбора заготовки

Себестоимость производства заготовки, без учета затрат на предварительную механическую обработку, для способов литья определяем по зависимости:

$$C_{заг} = \left[\frac{C + K_{то}}{1000} \cdot G_{заг} \cdot K_t \cdot K_c - (G_{заг} - G_{отх}) \frac{S_{отх}}{1000} \right] \cdot K_{\phi} \quad (10)$$

где C – базовая стоимость 1 т заготовок, руб/т;

$K_{то}$ – коэффициент доплаты за термическую обработку и очистку заготовок, руб/т;

$G_{заг}$ – масса заготовки, кг;

K_t – коэффициент, учитывающий точностные характеристики заготовки (по выплавляемым моделям $K_t = 1,67$);

K_c – коэффициент, учитывающий серийность выпуска заготовок;

$G_{отх}$ – масса детали, кг;

$S_{отх}$ – стоимость 1 т отходов, руб;

K_{ϕ} – коэффициент, учитывающий инфляцию (по отношению к ценам 1991 г. $K_{\phi} = 5$);

Масса заготовки:

$$G_{заг} = \frac{G_{отх}}{K_{вт}} \quad (11)$$

где $K_{вт}$ – коэффициент весовой точности;

3.3. Припуски на механическую обработку

Припуск – слой материала, удаляемый с поверхности заготовки в целях достижения заданных свойств обрабатываемой поверхности детали. Различают общий и промежуточные припуски по всем последовательно выполняемым технологическим переходам и операциям обработки данной поверхности детали. Общий припуск на какую-либо поверхность представляет собой сумму промежуточных припусков на ту же поверхность. Промежуточные припуски необходимы для определения промежуточных (по технологическим переходам и операциям) размеров деталей, общий – для определения размеров заготовок. В практике используются расчетно-аналитический и опытно-статистический методы расчета припусков.

Расчетно-аналитический метод. Этот метод определения припусков на обработку разработан проф. В.М. Кованом и базируется на анализе факторов, влияющих на припуски предшествующего и выполняемого переходов технологического процесса обработки поверхности. Значение припуска

определяется методом дифференцированного расчета по элементам, составляющим припуск. Расчетной величиной является минимальный припуск на обработку, достаточный для устранения на выполняемом переходе погрешностей обработки и дефектов поверхностного слоя, полученных на предшествующем переходе, и компенсации погрешностей, возникающих на выполняемом переходе.

Расчетные формулы минимального припуска выглядят следующим образом:

- при последовательной обработке противоположащих поверхностей (односторонний припуск):

$$Z_{i \min} = (Rz + h)_{i-1} + \Delta Z_{i-1} + \varepsilon_{yi} ;$$

- при обработке наружных и внутренних поверхностей тел вращения (двусторонний припуск):

$$2Z_{i \min} = 2 [(Rz + h)_{i-1} + \sqrt{\Delta_{\Sigma i-1}^2 + \varepsilon_{yi}^2}] .$$

где Rz_{i-1} – высота микронеровностей поверхности, полученных на предшествующем переходе;

h_{i-1} - глубина дефектного поверхностного слоя, полученного на предшествующем переходе;

$\Delta \Sigma_{i-1}$ - суммарные отклонения расположения поверхности (отклонения от параллельности, перпендикулярности, соосности, симметричности и пр.) и формы поверхности (отклонения от плоскостности, прямолинейности и пр.) на предшествующем переходе;

ε_{yi} - погрешность установки на рассматриваемом переходе. Погрешность установки складывается из ряда погрешностей, являющихся случайными величинами, поэтому:

$$\varepsilon_y = \sqrt{\varepsilon_{\delta}^2 + \varepsilon_{\varepsilon}^2 + \varepsilon_{np}^2} ,$$

где ε_{δ} – погрешность базирования;

$\varepsilon_{\varepsilon}$ – погрешность закрепления;

ε_{np} – погрешность, связанная с изготовлением и износом опорных элементов приспособления.

Расчетные формулы для определения предельных промежуточных размеров по технологическим переходам и окончательных размеров заготовки выглядят следующим образом:

- для наружных поверхностей

$$\begin{aligned} a_{\min i-1} &= a_{\min i} + Z_{\min i}; & a_{\max i-1} &= a_{\min i-1} + \delta_{i-1}; \\ D_{\min i-1} &= D_{\min i} + 2Z_{\min i}; & D_{\max i-1} &= D_{\min i-1} + \delta_{Di-1}; \end{aligned}$$

- для внутренних поверхностей

$$\begin{aligned} a_{\max i-1} &= a_{\max i} - Z_{\min i}; & a_{\min i-1} &= a_{\max i-1} + \delta_{i-1}; \\ D_{\max i-1} &= D_{\max i} - 2Z_{\min i}; & D_{\min i-1} &= D_{\max i-1} - \delta_{Di-1}; \end{aligned}$$

где a и D – наименьшие и наибольшие предельные размеры, полученные на предшествующем технологическом переходе; δ – допуск на соответствующий размер.

Опытно-статистический метод. При этом методе расчеты припуски на технологические переходы и общий припуск на заготовку определяют с помощью нормативных материалов, приведенных в технологических справочниках или нормалях предприятия для различных случаев обработки. Преимущество – значительно меньшая трудоемкость расчетов. Недостаток – припуски получаются завышенными, т.к. не учитываются конкретные условия обработки, что приводит к увеличению расхода конструкционного материала и объема последующей механической обработки. Как следствие – снижение экономических показателей.

3.4. Понятия о базах и базировании

Поверхности, принадлежащие заготовке или детали и используемые для определения ее положения, называются базовыми или базами. Базы подразделяются на конструкторские (определяющие положение в изделии), технологические (определяющие положение при изготовлении или ремонте) и измерительные (определяющие положение средств измерения при контроле). Погрешность базирования связана главным образом с отклонениями размеров заготовок. Если при этом технологическая база совпадает с измерительной, то $\varepsilon_{\delta} \approx 0$. Для других схем установки погрешность базирования может быть определена расчетом или из таблиц в технологических справочниках.

Основные принципы базирования заготовок:

1. При высоких требованиях к точности обработки необходимо выбирать такую схему базирования, которая обеспечивает наименьшую погрешность установки.
2. Для повышения точности деталей и собранных узлов необходимо применять **принцип совмещения баз** – совмещать технологическую, измерительную и конструкторскую базы.
3. Целесообразно соблюдать **принцип постоянства базы**. При перемене баз в ходе технологического процесса точность обработки снижается из-за погрешности взаимного расположения новых и применявшихся ранее технологических баз.

Для установки заготовок на первых операциях технологического процесса используют черные (необработанные) поверхности, применяемые в качестве технологических баз. Эти поверхности используют однократно, т.к. они применяются лишь для того, чтобы обработать чистовые установочные базы. При этом базы могут быть основными, если установочная поверхность детали участвует в дальнейшем в работе детали в изделии, и вспомогательными, создаваемыми исключительно для установки детали при обработке (например, центровые гнезда валов).

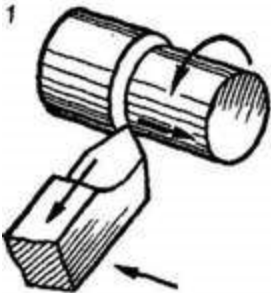
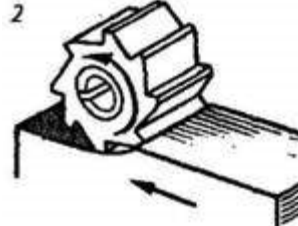
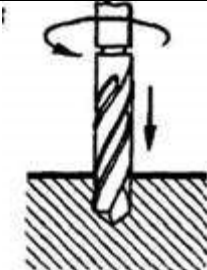
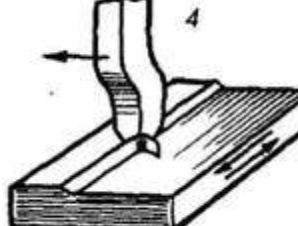
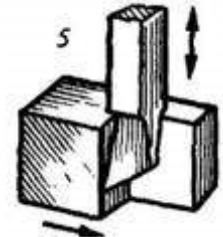
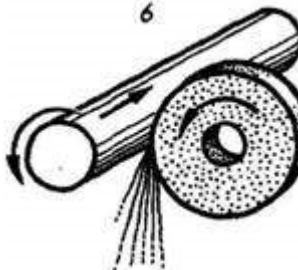
Погрешность закрепления возникает при закреплении заготовок в приспособлениях в связи с изменением контактных деформаций стыка заготовка-опора приспособления. Упругие деформации детали из-за сил закрепления также учитываются преимущественно при обработке маложестких деталей.

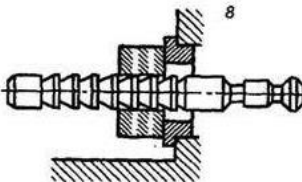
Погрешность приспособлений возникает в результате неточности изготовления приспособления и износа его опорных элементов в процессе эксплуатации.

4 Методы изготовления. Точность изготовления и качество обработанной поверхности деталей гидромашин, гидроприводов и средств ГПА

видео

№	Наименование метода	Область применения	Эскиз
Заготовительная			
1	Отливки	<p>Заготовка, полученная методом литья. Известно множество разновидностей литья:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. в песчаные формы (ручная или машинная формовка); 2. в многократные (цементные, графитовые, асбестовые формы); 3. в оболочковые формы; 4. по выплавляемым моделям; 5. по замораживаемым ртутным моделям; 6. центробежное литье; 7. в кокиль; 8. литьё под давлением; 9. по газифицируемым (выжигаемым) моделям; 10. вакуумное литьё; 11. электрошлаковое литьё; 12. литьё с утеплением. 	
2	Ковка	<p>высокотемпературная обработка различных металлов (железо, медь и её сплавы, титан, алюминий и его сплавы), нагретых до ковочной температуры.</p> <p>Различают:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. ковка на молотах (пневматических, паровых и гидравлических) 2. ручная ковка 3. штамповка 	
3	Штамповка	<p>процесс пластической деформации материала с изменением формы и размеров тела. Чаще всего штамповке подвергаются металлы или пластмассы.</p>	
4	Прокат	<p>продукция, получаемая на прокатных станах путём горячей, теплой или холодной прокатки.</p> <p>Металлопрокат производится из следующих видов металла: алюминий, медь, чёрный прокат, бронзовый, конструкционный, нержавеющий, титан, мельхиор, никель. По способу проката круглый, квадратный, прямоугольный, н-образный например «балка», тавр.</p>	

Механическая обработка			
5	Токарная	операция обработки тел вращения, винтовых и спиральных поверхностей резанием при помощи резцов на станках токарной груп-пы. При точении заготовке сообщается вращательное движение (главное движение), а режущему инструменту (резцу) — медленное посту-пательное перемещение в продольном или поперечном направлении (движение подачи).	1 
6	Фрезерная	высокопроизводительный и распространенный процесс обработки материалов резанием, выполняемое на фрезерных стан-ках. Главное (вращательное) движение получает фреза, а движение подачи в продольном направлении — заготовка	2 
7	Сверление	операция обработки материала резанием для получения отверстия. Режущим инструментом служит сверло, совершающее вращательное движение (главное движение) резания и осевое перемещение по-дачи. Сверление производится на сверлильных станках	3 
8	Строгание	способ обработки резанием плоскостей или линейчатых поверхностей. Главное движение (прямолинейное возвратно-поступательное) совершает изогнутый строгальный резец, а движение подачи (прямолинейное, перпендикулярное главному движению, прерывистое) — заготовка. Строгание производится на строгательных станках	4 
9	Долбление	способ обработки резцом плоскостей или фасонных поверхностей. Главное движение (прямолинейное возвратно-поступательное) совершает резец, а движение подачи (прямолинейное, перпендикулярное главному движению, прерывистое) — заготовка. Долбление производят на долбежных станках	5 
10	Шлифование	процесс чистовой и отделочной обработки деталей машин и инструментов посредством снятия с их поверхности тонкого слоя металла шлифовальными кругами, на поверхности которого расположены абразивные зерна.	6 

11	Протягивание	процесс, производительность при котором в несколько раз больше, чем при строгании и даже фрезеровании. Главное движение прямолинейное и реже вращательное	
----	--------------	---	---

4.1 Технологические процессы изготовления деталей гидромашин, гидроприводов и средств ГПА

Рабочие колеса гидродинамических передач. Технология изготовления рабочих колес гидродинамических передач обычно определяется объемом выпуска, типом лопаток (радиальные, наклоненные, цилиндрические, пространственные, плоские, винтовые и т. д.) и размерами рабочих колес. К рабочим колесам предъявляют высокие требования, особенно к точности изготовления углов входа и выхода ($\pm 0,5^\circ$), шагу решеток (± 1 мм), диаметрам входа и выхода по внутреннему и наружному торам ($\pm 0,5$ мм), активному диаметру ($\pm 0,5$ мм), шероховатости поверхностей межлопаточных каналов. Невыполнение указанных требований ведет к снижению технико-экономических показателей работы гидромуфт и гидротрансформаторов и поэтому является недопустимым.



Диаметр рабочих колес современных гидродинамических передач достигает 2750 мм. Гидродинамические передачи устанавливают на тракторах, буровых установках, тепловозах, летательных аппаратах и других машинах. Разнообразие машин, в которых применяются гидродинамические передачи, требует унификации их деталей, в частности рабочих колес, а также типизации технологических процессов их изготовления. В каждом конкретном случае технология изготовления рабочих колес должна быть экономически оправдана и должна обеспечивать

выполнение технических требований, предъявляемых к точности и качеству поверхностей изготавливаемого колеса.

Целесообразно рассмотреть следующие способы изготовления рабочих колес гидродинамических передач.

Способ изготовления выфрезерованием межлопаточных каналов заключается в том, что одна половина лопаток (через одну) образуется за одно целое с внутренним тором, а другая — за одно целое с наружным тором. Затем обе детали соединяют вместе (рис. 5). Такой способ целесообразно применять при мелкосерийном изготовлении гидротрансформаторов или гидромуфт, имеющих рабочие колеса с цилиндрическими или плоскими радиальными лопатками. Описанный способ используется; например, Калужским машиностроительным заводом при изготовлении гидротрансформаторов для тепловозов.

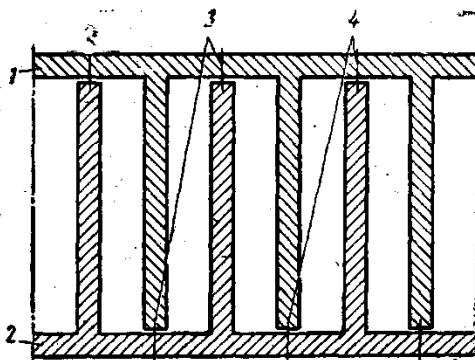


Рис. 5 Колесо, изготовленное выфрезеровыванием:

1 – наружный тор; 2 – внутренний тор; 3 – лопатки; 4 – детали крепления

Способ изготовления рабочих колес литьем – наиболее распространен при серийном производстве гидродинамических передач. Литые рабочие колеса применяют в гидромуфтах машин горной промышленности, для гидротрансформаторов строительных и дорожных машин, автомобилей, тракторов, тепловозов и буровых установок. В большинстве случаев лопатки рабочих колес делают пространственными с плоскими или винтовыми поверхностями. Литые рабочие колеса изготавливают чаще всего из алюминиевых сплавов, обеспечивающих полное заполнение узких каналов и легко обрабатываемых. При этом используют пропитанные бакелитом песчаные или гипсовые стержни, каждый из которых образует межлопаточный канал.

При изготовлении рабочих колес наиболее часто применяются:

1. Отливка в земляные формы с использованием диафрагменных машин. Верхнюю часть формы обычно выполняют съемной.
2. Отливка в кокиль. Кокиль состоит из нескольких частей (рис.6), соответствующих внутренним поверхностям детали (торам колеса). В него устанавливают стержни, с помощью которых образуются лопатки рабочих колес. Кокиль может иметь горизонтальный, вертикальный и наклонный разъемы.
3. Литье по выплавляемым моделям. В этом случае в кокиль заливается смесь стеарина и парафина. Способ применяется при изготовлении цилиндрических лопаток для гидротрансформаторов.
4. Литье под давлением. Способ применяется при большом объеме выпуска осевых рабочих колес (например, реакторов комплексных гидротрансформаторов). В этом случае металлические формующие органы литейной машины, соответствующие отдельным межлопаточным каналам, перемещаясь в отдельном направлении каждый, сходятся вместе, образуя замкнутую полость.

Однако отливка не имеет внутреннего тора. Внутренний тор реактора гидротрансформатора можно выполнить в виде стальной ленты, стянутой в виде обруча, при этом концы ленты можно сварить.

Точность расположения и шероховатость межлопаточных каналов при литье в землю соответствует 8-9-му классам, при литье в кокиль – 5-7-му классам, при литье по выплавляемым моделям – 2-5-му, при литье под давлением – 3-5-му классам чистоты поверхности. При отливке рабочих колес гидротрансформаторов обычно используют песчаные или гипсовые стержни, которые образуются в стержневых ящиках путем ручной или машинной формовки с последующей сушкой и финишной отделкой.

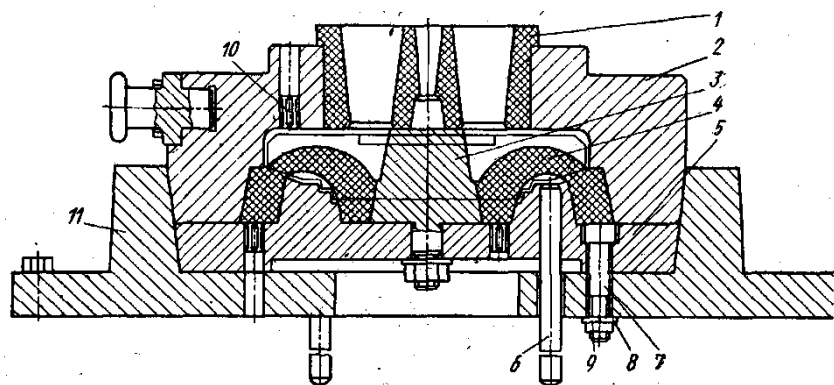


Рис.6. Кокиль для изготовления реактора гидротрансформатора ТР-325:

1 – стержень-коллектор; 2 – верхняя формующая часть; 3 – формующий стержень; 4 – стержень лопатки; 5 – нижняя формующая часть; 6 – толкатель; 7 – болт; 8 – шайба; 9 – гайка; 10 – продух; 11 – корпус

Гипсовые стержни обеспечивают высокую точность и стабильность размеров при шероховатости поверхности до 6-го класса чистоты, но стоят дороже песчаных и не пригодны для повторного использования при приготовлении стержневой массы. При использовании гипсовых стержней массу заливают в формы из термостойкой резины. После того как, масса затвердеет, стержни вынимают из формы и сушат в низкотемпературных печах. Готовые гипсовые стержни собирают с песчаным стержнем, который предварительно смазывают клеем для соединения с гипсовыми стержнями. Песчаный стержень образует внутренний тор. После сборки комбинированный стержень подвергают сушке. Затем производят формовку и заливку. Готовые отливки выбивают, очищают и подготавливают к механической обработке.

Рабочие колеса гидромурфт в настоящее время льют из алюминиевых сплавов. Применяется литье под давлением. При этом способе несколько усложняется технология в связи с необходимостью заливки в алюминий стальных ступиц и втулок для крепления. В результате соприкосновения стальных и алюминиевых деталей, имеющих неодинаковые коэффициенты температурного расширения, возникают внутренние напряжения. При крупносерийном производстве гидромурфт малых размеров с наклонными лопатками целесообразно лить колеса в кокиль. При этом создается проволочный каркас сложной формы, а лопатки должны иметь винтовую поверхность. При такой форме поверхности, отливки легко при повороте вынимаются из кокиля.

Способ изготовления рабочих колес со штампованными сборными элементами.

Штампованные детали рационально применять при массовом производстве, так как для штамповки нужна специальная, дорогостоящая оснастка (приспособления, штампы, специальные материалы и т.д.). Торы колеса получают глубокой вытяжкой, затем к ним крепят лопатки. Для этого

используют сварку (в том числе точечную), твердую пайку, а также отгибаемые язычки, выполненные на лопатках.

При *комбинированном способе производства рабочих колес* предполагают изготовление торцов механической обработкой или литьем, лопаток – литьем или штамповкой и последующим их соединением одним из известных методов. Указанный способ применяется при мелкосерийном производстве.

После изготовления рабочих колес любым из перечисленных способов каждое колесо затем подвергается механической обработке, балансировке и техническому контролю.

При токарной обработке в колесе выполняют посадочные отверстия, поверхности лабиринтов рабочей полости, привалочные торцы, затем высверливают отверстия для крепления колеса, при операции протягивания выполняют шпоночные пазы или шлицы.

При выборе черновой базы на первой операции токарной обработки рабочих колес лучше всего для выполнения технических требований чертежа по допуску на смещение межлопаточных каналов принимать за черновую базу поверхности межлопаточных каналов, которые не обрабатывают.

Обработанное колесо поступает на слесарную операцию, где зашлифовывают входные и выходные кромки лопаток. При этом входные кромки закругляют, выходные заостряют. Если необходимо, зачищают внутренние поверхности межлопаточных каналов.

Каждое колесо в сборе (литое или штампованное) подвергают статической или динамической балансировке. Статическая балансировка применяется, когда радиальные размеры колеса намного больше его осевых размеров. Цель статической балансировки – совместить центр тяжести с осью вращения колеса.

К динамической балансировке прибегают, когда осевой размер детали значительно превышает ее радиальный размер. Цель динамической балансировки – уравновесить моменты инерции, устранить дисбаланс в осевом направлении.

При серийном изготовлении гидротрансформаторов отдел технического контроля проверяет диаметры входа и выхода из рабочих колес, толщину входных и выходных кромок лопаток, геометрию проточной части, углы входа и выхода.

Корпусные детали гидроприводов изготавливают главным образом из серого и высокопрочного чугунов и алюминиевых сплавов. Штамповочно-сварные конструкции применять не рекомендуется из-за возможных остаточных деформаций (даже после отжига), которые нарушают в процессе эксплуатации точность расположения осей сопрягаемых деталей. Основные посадочные диаметры в корпусах выполняют по 2-3-му классам точности. Допуск на несовпадение осей отверстий составляет 0,01 – 0,05 мм.

При обработке корпусов существенное значение имеет толщина стенок отливок.

В зависимости от способа получения заготовок и материала детали допускается следующая толщина стенок для деталей из серого чугуна, отлитых в земляные формы 4—5 мм; для более крупных – 6—8 мм. Детали, полученные литьем в оболочковые формы, имеют стенки толщиной 3 мм. Толщина стенок корпуса из алюминиевых сплавов при литье в земляную форму 3—5 мм для мелких и 5—8 мм для более крупных деталей. При литье под давлением толщина стенок может составлять 1,5 мм.

Если в корпусах имеются литые каналы для циркуляции рабочей жидкости, то необходимо обеспечить их чистоту и плавность переходов. Это осуществляется при соответствующей технологии отливки, а также в результате последующей механической или химической обработки.

При обработке корпусных деталей соблюдается следующее:

1) при базировании деталей измерительные и сборочные базы в процессе механической обработки совмещают;

- 2) базирующие поверхности обрабатывают по разметке, в результате чего припуски при механической обработке распределяются наиболее равномерно;
- 3) обработку базирующих поверхностей и черновую обработку отверстий проводят, как и всю последующую механическую обработку, с максимальной концентрацией операций, т. е. стремятся обработать наибольшее число поверхностей с одной установки;
- 4) брак отливок устраняют в пределах, разрешаемых техническими условиями, при этом в основном заделывают мелкие трещины, раковины, бакелитируют или пропитывают отливки другими герметизирующими составами, например жидким стеклом;
- 5) повторную чистовую обработку базовых и привалочных поверхностей осуществляют после операций по устранению брака отливок; затем проводят чистовые операции по обтачиванию и растачиванию посадочных мест, обработке фланцев, бобышек, платиков, нарезанию резьб и т. д.;
- 6) контроль корпусов обеспечивают с помощью предельных калибров и системы составных скалок, собираемость которых после установки на посадочные диаметры корпуса гарантирует смещение осей в пределах допуска;
- 7) внутренние необработанные поверхности корпусов оксидируют или грунтуют в два слоя грунтом ГФ-020 и покрывают лаком ГФ-95. Полимеризация и надежное схватывание лаковой пленки обеспечивается сушкой поверхности при 95—100° С.

Корпуса золотниковых распределителей работают под давлением, достигающем иногда 32×10^6 Н/м². Внутренние полости корпусов разделяются на поверхности трения, в которых перемещаются золотники, и каналы, подводящие и отводящие рабочую жидкость. В связи с этим к корпусным деталям предъявляют повышенные требования по герметичности, прочности, жесткости, обеспечению максимальной износостойкости в сопряжении с золотником, макрочистоте каналов, служащих для прохода жидкости.

В местах резьбовых соединений корпусов из легких сплавов рекомендуется применять стальные гильзы-ввертыши, заштифтованные по месту контакта с корпусом во избежание проворота. Посадочные места армируют втулками.

После механической обработки не должно быть раковин на рабочих поверхностях. На нерабочих поверхностях допускаются отдельные рассредоточенные раковины. Они должны быть тщательно зачищены и залиты полимерным материалом.

После этого деталь отправляется на консервацию. Перед консервацией корпуса проверяют на герметичность в специальном приспособлении. Корпус опрессовывают в течение 2-3 мин при давлении, в 1,5 раза превышающем максимальное рабочее давление. При этом наружные утечки, свидетельствующие о наличии пор в материале, не допускаются.

Гидроцилиндры. В гидроцилиндры входят гильзы, поршни, штоки, крышки, штуцера и уплотнения.

Гильзы изготавливают из бесшовных горячекатаных труб по ГОСТ 8732—70. Они являются наиболее ответственными деталями, определяющими работоспособность гидроцилиндра.

При изготовлении гильз должны выполняться следующие технические требования:

- 1) шероховатость внутренней поверхности должна быть $Ra_{0,6}$ — $Ra_{1,25}$, класс точности 3-й, продольные риски не допускаются;
- 2) непрямолинейность по оси гильзы — не более 0,03 мм на длине 500 мм;
- 3) конусность, овальность и бочкообразность внутреннего диаметра на всей длине гильзы — в пределах не более половины допуска на внутренний диаметр;

- 4) биение оси диаметра внешней обработанной поверхности относительно оси внутреннего диаметра — не более половины допуска на внешний диаметр;
 - 5) биение торцов гильзы относительно продольной оси — не более 0,05 мм.
- Материал трубы — сталь марок 35 и 45.

Технологический процесс обработки предусматривает следующие этапы.

1. Отрезка заготовки на пилоотрезном станке и последующая подрезка торцов с соблюдением перпендикулярности к оси заготовки не более 0,1 мм. Этим обеспечивается точность установки заготовок на последующих операциях, а также плавный вход режущего инструмента при растачивании отверстия.

2. Обтачивание наружных поверхностей гильзы на гидрокопировальном станке типа 1732Б, снабженном двумя продольными суппортами. Заготовку устанавливают на рифленые центры, что позволяет не только обтачивать ее на проход, но и снижать вспомогательное время. Для гильзы с внутренним диаметром 90 мм режим резания при обтачивании такой: $r = 2$ мм; $v = 130$ м/мин; $S = 0,85$ мм/об.

3. Обработка отверстия в гильзе, которая заключается в черновом и чистовом растачивании и окончательной отделке. Черновое растачивание ведется при вращающейся заготовке и поступательном перемещении режущего инструмента. Заготовка зажимается по наружному диаметру в трех- или четырехкулачковый патрон и поддерживается откидным роликовым люнетом. Прогрессивным является применение пневматического зажимного центрального патрона и точного трехроликового люнета.

Головки для чернового растачивания могут быть одно- или многолезцовыми. Однорезцовые головки надежнее в эксплуатации и обеспечивают лучшие показатели по заданной прямолинейности оси растачиваемого отверстия, особенно при обработке длинных и тонкостенных гильз. Многолезцовые головки более производительны, что снижает трудоемкость обработки. В последнее время стали применяться двухрезцовые головки, в которых для поглощения возникающих при растачивании вибраций и повышения точности одна из направляющих смонтирована на резиновом основании.

Чистовое растачивание производят с целью получить постоянный припуск по всей длине отверстия, сохранить прямолинейность его оси и достигнуть формы и размеров отверстия по 3-му классу точности. Заготовка устанавливается в патроне модернизированного токарного станка с точностью 0,02—0,05 мм. В пиноль задней бабки устанавливают расточную головку с плавающими режущими пластинами. Плавающие пластины изготавливают из стали Р18 и армируют пластинками из сплава Т15К6 с углом заборного конуса 1° . Головка снабжена четырьмя направляющими из сплава ВК-8. Над пластинами устанавливается латунный козырек для направления охлаждающей жидкости на режущие грани.

Для чистового растачивания рекомендуются следующие режимы: $r = 0,3$ мм–0,4 мм; $v = 80$ –5–120 м/мин; $S = 1,4$ –5–1,5 мм/об. Шероховатость поверхности Ra5—Ra6. Конусность и овальность расточенных отверстий находится в пределах поля допусков по 2-му классу точности, не превышая 0,02—0,03 мм.

Окончательная отделка отверстий — наиболее ответственная операция изготовления гильзы. В качестве отделочных операций применяют хонингование, раскатывание, тонкое растачивание, прошивание и полирование.

Хонингование отверстий осуществляют на вертикальных и горизонтальных хонинговальных станках с использованием брусков К3180СТ2—СТ3 или К3280С1М при обильном охлаждении керосином. Необходимый размер достигается при периодическом контроле обрабатываемого отверстия. Хонингование

обеспечивает высокую точность обрабатываемого отверстия, но из-за низкой производительности эта операция применяется только для цилиндров, работающих в особо ответственных условиях, а также при индивидуальном производстве.

Полирование внутренней поверхности наждачным полотном (как правило, зернистостью 46—60) является малопроизводительной операцией, не гарантирующей, кроме того, требуемой точности и шероховатости поверхности. По этим же соображениям не получило распространение и тонкое растачивание.

Протягивание с помощью шаров и прошивка не могут быть рекомендованы для широкого использования, так как они вызывают в обрабатываемых деталях, особенно тонкостенных, значительные деформации и не обеспечивают необходимой формы и прямолинейности оси отверстия.

Наиболее производительным и широко распространенным процессом отделки отверстия является метод раскатывания, выполняемый многошариковыми или многороликовыми раскатками.

Перспективными направлениями обработки гильз являются:

- 1) получение заданной точности и чистоты рабочей поверхности в результате осуществления только отделочных операций, благодаря применению калиброванных труб повышенного качества;
- 2) совмещение чернового и чистового растачиваний многорезцовыми головками.

Штоки гидроцилиндров изготавливают из сталей 45, 30ХГСА. Они должны отвечать следующим техническим требованиям: овальность и конусность рабочих цилиндрических поверхностей, а также их относительное смещение должны составлять не более половины допуска на размер, прямолинейность — не более 0,01 мм на 500 мм длины; шероховатость рабочих поверхностей Ra9—Ra10. В качестве заготовки обычно используют круглый прокат, поэтому первой операцией служит отрезка заготовки, подрезка торцов и центрирование. Если проушина спроектирована как одно целое со штоком, то для ее образования производится высадка конца штока перед фрезерно-центровальной операцией.

В некоторых случаях, оговоренных документацией, требуется увеличить твердость поверхности до *HRC* 38—40. Для этого перед шлифованием производится закалка т. в. ч. с высокотемпературным отпуском или улучшение.

В сварных конструкциях перед фрезерно-центровальной операцией проушины приваривают на сварочном полуавтомате в среде углекислого газа (в заготовке штока предварительно растачивают отверстие для проушины). Контроль качества сварного шва производят магнитным дефектоскопом.

Перспективным направлением при обработке штока является внедренный на некоторых предприятиях способ обкатки наружной поверхности роликами, обеспечивающий шероховатость поверхности до Ra2,5 и значительное повышение производительности перед шлифованием.

Поршни, как правило, изготавливают из стали 35 или 45 с последующим бронзированием направляющей поверхности.

Технические требования: шероховатость рабочих поверхностей Ra6—Ra8, отклонение от геометрической формы — в пределах половины допуска на размер. Реже применяются поршни из чугуна СЧ 21-40.

Изготовление поршней включает три этапа:

- 1) изготовление основания поршня;
- 2) изготовление бронзового кольца;
- 3) напрессовка кольца на основание и обработка поршня в сборе;

Бронзирование осуществляется на гидравлическом прессе в два перехода: напрессовка кольца на основание и обжатие его по наружному диаметру с уменьшением последующего диаметра примерно на 1 – 1,5 %.

После бронзирования и механической обработки производят контроль биения наружной поверхности относительно внутреннего диаметра. Эффективно покрывать направляющую поверхность полиамидными пленками в горячем состоянии.

Крышки гидроцилиндров изготавливают из стальных поковок (сталь 45), выполненных преимущественно в закрытых штампах. Как правило, крышка цилиндра навинчивается на гильзу. Менее распространены соединения сварные, болтовые (фланцевые) и на врезных кольцах. Однако задняя (глухая) крышка чаще всего делается сварной.

Наиболее совершенным способом механической обработки крышек является полная токарная обработка на многошпиндельных полуавтоматах.

Запрессовка в крышку бронзовой втулки, служащей опорой штока, производится на гидравлическом прессе. С этой же установки детали, путем смены оправки, развальцовывают втулку, в результате чего она надежно фиксируется в крышке.

После указанных операций крышку в сборе со втулкой подвергают токарной обработке с целью окончательной расточки гнезд под уплотнения, внутреннего отверстия в бронзовой втулке и подрезке торцов.

Затем следуют фрезерные операции, во время которых фрезеруют пазы и площадки для привалочных плоскостей штуцеров. Далее на сверлильном станке сверлят отверстия, нарезают резьбу для присоединения штуцеров, затем, после опиловки кромок, снятия заусенцев и контроля с помощью предельных калибров и шаблонов на линейные размеры, детали промывают в моечных ваннах, консервируют и направляют на промежуточный склад готовых деталей (СГД).

4.2 Объемные гидромашины

Основные детали пластинчатых гидромашин. Статоры пластинчатых насосов изготавливают из высокопрочного чугуна или легированных сталей. Статоры являются прецизионными деталями и поэтому к ним предъявляются высокие требования по геометрической точности размеров и износостойкости.

Заготовку отрезают из проката, обтачивают по наружному диаметру и торцуют. На токарно-револьверном станке сверлят центральное отверстие и растачивают технологическую выточку, базируясь на которой, повторно обтачивают наружный диаметр до размера, указанного на чертеже с необходимой шероховатостью поверхности. Наружный диаметр является базой для дальнейшей обработки. Профильную поверхность кольца растачивают по копиру на специально оборудованном токарном или гидрокопировальном станке. Профиль копира строят по данным чертежа статора. Профильную поверхность растачивают с припуском на шлифование 0,2—0,3 мм на сторону.

Криволинейный профиль растачивают на токарном станке с гидрокопировальным устройством, затем после закалки до необходимой твердости и обработки холодом для стабилизации размеров, шлифуют по копиру. Для соблюдения требуемой перпендикулярности боковые поверхности шлифуют с той же установки. Для этого используют агрегатный станок с тремя шпинделями, один из которых предназначен для шлифовки криволинейного профиля, а другие для обработки торцов. Доводка криволинейного профиля производится на аналогичном станке, в котором шлифовальные круги заменены на доводочные. Наружную поверхность и один торец шлифуют на оправке по максимальному диаметру внутреннего отверстия одновременно. Второй торец кольца и окончательно первый торец обрабатывают на плоскошлифовальном станке.

При изготовлении статорных колец необходимо выполнять следующие требования по геометрической точности:

1. Биение поверхности рабочего профиля относительно наружного диаметра должно составлять не более 0,5 мм;
2. Неперпендикулярность образующей внутренней поверхности статорного кольца к торцам не более 0,02 мм на ширине кольца;
3. Непараллельность торцов статора должна быть не более 0,01 мм на наружном диаметре кольца. Наружная поверхность статора сопрягается с корпусом по посадке H7/g6 (стандарт СЭВ 145-75).

Роторы изготавливают из цементированных сталей. Схема базирования такая же как при обработке статора. После токарной обработки на вертикально-сверлильном станке сверлят отверстия по периферии ротора, которые затем расфрезеровывают дисковыми фрезами на горизонтально-фрезерном станке до образования пазов и шлифуют на круглошлифовальном станке. Обработку на указанных станках производят в делительном приспособлении. Окончательную доводку плоскостей пазов с помощью текстолитовых дисков-притиров осуществляют на круглошлифовальном станке. Требуемая геометрическая точность пазов обеспечивается базированием при обработке на боковую поверхность и центральное отверстие. Шлицы изготавливают на горизонтально-протяжном станке повышенной точности, базируясь на наружный диаметр и боковую поверхность. Боковые поверхности доводят на плоскошлифовальных станках.

Термическая обработка ротора, проводимая перед шлифованием, заключается в цементации на необходимую глубину и закалке до нужной твердости. Затем не подвергая отпуску, не более чем через 30-45 мин производят обработку холодом при температуре – 70⁰С с выдержкой при этой температуре 30-40 мин. После этого производят отпуск при 160-180⁰С с выдержкой около часа.

Технические требования по геометрической точности:

1. Развал пазов не более 0,03 мм;
2. Выпуклость торцов не допускается; вогнутость допускается до 0,01 мм;
3. Непараллельность торцов не более 0,1 мм.

Пластины изготавливают из инструментальных сталей типа P18, 9ХС. Механическая обработка сводится к фрезерованию, шлифованию и доводке плоскостей. Пластины, как правило, фрезеруют и шлифуют по контуру пакетом по 5-10 шт в приспособлении с базированием по двум поверхностям. Термообработка, проводимая перед шлифованием, состоит в закалке до нужной твердости, обработке холодом и трехкратном отпуске при 500-600⁰С с выдержкой в течении часа. Боковые уплотнительные фланцы, нередко конструктивно объединенные с корпусом, изготавливают из чугуна марки СЧ 28-48.

Технические требования:

1. Толщина пластин должна быть на 0,01—0,03 мм меньше ширины пазов;
2. Ширина пластин должна быть меньше ширины ротора на 0,01 мм;
3. Отклонение от прямолинейности прилегающей к статору кромки пластины не более 0,003 мм;
4. Непараллельность кромок пластин, прилегающих к торцам распределительных дисков, не более 0,01 мм;
5. Неперпендикулярность кромок пластин, прилегающих к распределительным дискам, к кромке, прилегающей к внутренней поверхности статорного кольца, не более 0,1 мм.

Диски изнашиваются по торцам, прилегающим к ротору и в месте посадки цапф ротора; на торцах дисков появляются кольцевые риски и задиры. Диски необходимо ремонтировать или заменять при суммарном износе отверстия диска и цапфы ротора свыше 0,08 мм. Изношенные диски растачивают на несколько миллиметров больше диаметра шлифованных цапф ротора, запрессовывают в расточенное отверстие втулку и вновь растачивают, обеспечивая посадку H7/g6. После растачивания подрезают торец.

При изготовлении и ремонте дисков необходимо соблюдать следующие требования:

1. Биение наружной поверхности ступицы относительно отверстия должно быть не более 0,01 мм;
2. Выпуклость торцовых поверхностей не допускается; вогнутость допускается до 0,02 мм;
3. Непараллельность торцов не более 0,01 мм;
4. Неперпендикулярность торцов по отношению к оси отверстия не более 0,02 мм на диаметре диска.

Перед сборкой детали насоса тщательно промывают в керосине и смазывают минеральным маслом. Сначала собирают ротор. Ротор устанавливают на вал таким образом, чтобы наклон пластин был в сторону вращения. Пластины в пазах ротора должны перемещаться без заедания и качки в направлении оси ротора (зазор 0,01 — 0,03 мм). Допускается подгонка и притирка пластин пастой на плите. Ширина ротора должна быть меньше ширины статора на 0,03 мм. При установке ротора в корпус необходимо, чтобы угловые канавки на тыльной стороне опорных дисков были расположены в полости нагнетания (полость нагнетания соединена с меньшим подсоединительным отверстием корпуса). Затягивая крышку корпуса, проверяют легкость вращения приводного вала.

Основные детали аксиально-поршневых гидромашин

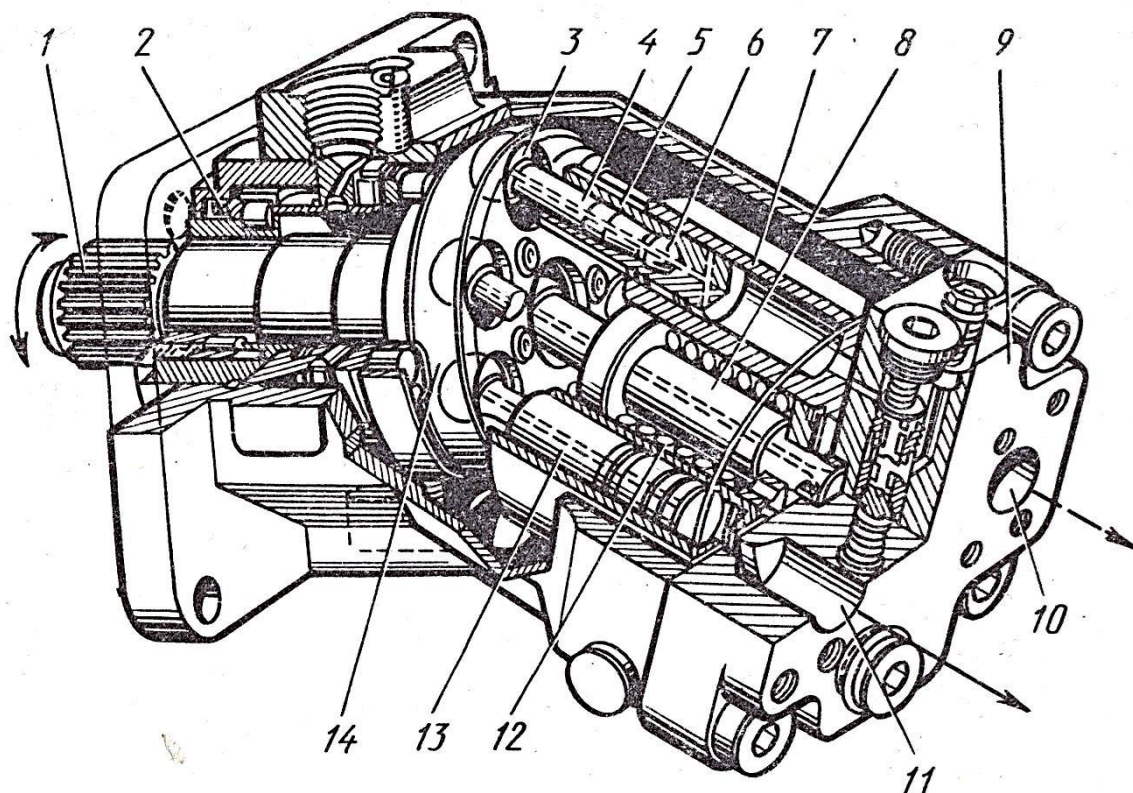


Рис. 3. Аксиально-поршневой нерегулируемый насос-гидромотор с реверсивным потоком и наклонным блоком:

1— вал, 2— уплотнение, 3— сферическая головка, 4— шатун, 5— юбка поршня, 6— шарнир, 7— блок цилиндров, 8— шип, 9— крышка, 10, 11— окно, 12— пружина, 13— поршень, 14— диск

Блоки цилиндров аксиально-поршневых гидромашин. Блоки цилиндров изготовляют из высоколегированных сталей или бронзовых сплавов. Бронзовые блоки применяют при давлении до 25×10^6 Н/м². Стальные блоки могут работать при более высоких давлениях.

При обработке бронзовых блоков из сплава Бр. ОСН 10-2-3 применять абразивные материалы недопустимо. При обработке блоков из сплава Бр.О12 допускается абразивная обработка с последующей тщательной промывкой. При обработке стальных блоков и блоков из сплава Бр.О12 подбор режимов шлифовки и доводки, а также выбор шлифовальных кругов и паст определяют качество рабочих поверхностей блоков.

При обработке плоского рабочего торца блока цилиндров и опорного диска необходимо соблюдать следующие технические требования:

1. Непараллельность торцов не более 0,02 мм;
2. Выпуклость рабочего торца не допускается, вогнутость допускается до 0,005 мм.

Износ сферических опорных поверхностей аксиально-поршневых гидромашин устраняют притиркой с пастой и доводкой спаренных деталей. При обработке опорных поверхностей необходимо обращать внимание на сохранение «усов» распределительных окон, играющих важную роль в процессе распределения рабочей жидкости. Перед сборкой детали тщательно промывают до полного удаления доводочной пасты.

Плунжеры и золотники. Золотники и плунжеры широко применяют в гидромашинах и гидроаппаратах.

Золотник представляет собой ступенчатый валик с проточками и канавками на рабочих шейках. Наиболее распространенный материал для изготовления – сталь 20Х, подвергаемая цементации, а также стали 40Х, ХВГ, ШХ15. Сортамент заготовки – прокат.

Рассмотрим последовательность операций при обработке золотника из стали 40Х.

На токарно-револьверном станке заготовка торцуется с двух сторон и центрируется на центровальном станке. Наружная обточка производится на токарно-копировальном полуавтомате. После токарной обработки профиля золотник подвергается термической обработке – закалке рабочих шеек и отпуску до нужной твердости. Хвостовик золотника также закаливается до твердости указанной на чертеже. После термообработки производится контроль биения шеек. При необходимости проводится правка.

Припуск под дальнейшую обработку шлифованием составляет 0,5 – 0,6 мм. Первая шлифовальная операция производится на круглошлифовальном станке. Золотник устанавливается в центрах, шлифуются поверхности шеек и хвостовик до нужной шероховатости под последующую обработку. Для шлифования применяют круг типа 3Б25С1. Для контроля рабочих поверхностей используют предельные калибры (скобы). Детали, уложенные в мягкую тару во избежание забоин, поступают на токарную операцию нарезки канавок на рабочих шейках. Канавки нарезают специальным резьбовым резцом с алмазной режущей кромкой. Есть станки для изготовления канавок методом накатки. После нарезания канавок производят вторую шлифовальную операцию на круглошлифовальном станке. Шлифуют входные кромки (фаски) на рабочих шейках, рабочие поверхности шеек. Затем детали погружают в промывочную ванну, сушат, консервируют и направляют на сборочный участок.

Плунжеры можно обрабатывать в такой последовательности:

- 1) черновая токарная обработка с оставлением припуска 0,4 – 0,6 мм для чистовой обработки;
- 2) термообработка;
- 3) шлифование торца на круглошлифовальном станке;
- 4) зачистка фаски на токарном станке;
- 5) чистовое шлифование по наружному диаметру на бесцентрово-шлифовальном станке;
- 6) шлифование сферической поверхности и конуса;
- 7) доводка;
- 8) промывка и пассивирование;
- 9) контроль.

Чистовое шлифование производится на бесцентрово-шлифовальном станке. Шлифование сферы осуществляется на сферо-шлифовальном или токарном станках в специальных поворотных приспособлениях с установленной шлифовальной головкой, имеющей автономный привод.

Торцовые распределители устанавливают в основном на аксиально-поршневых гидромашинах, однако разновидности их применяют в радиально-поршневых и пластинчатых насосах и гидромоторах. По конфигурации распределители разделяют на плоские и сферические, по используемым материалам на бронзовые и стальные.

Обработка бронзового плоского распределителя. Заготовка представляет собой бронзовую отливку, длина которой обеспечивает получение 5-10 деталей из одного слитка. Отрезанный от слитка диск торцуют на токарной станке до нужной шероховатости. Затем растачивают предварительно просверленное центральное отверстие, подрезают второй торец, обтачивают наружный диаметр,

растачивают выточки на торцах. На протяжном станке протягивают два прямоугольных паза на периферии диска на вертикально-сверлильном станке сверлят отверстия. На вертикально-фрезерном станке фрезеруют пазы на рабочем торце и два паза на обратном. Затем производят предварительное и окончательное фрезерование пазов на торцах, слесарную обработку (сохраняя острые кромки на рабочем торце) и контроль геометрии.

После этого осуществляют старение в масляной ванне при 280⁰С в течение 2 ч. Затем детали промывают, проверяют, проводят шабрение с обеспечением точек контакта.

Готовый распределитель промывают, покрывают консервирующей смазкой и упаковывают.

Обработка стального сферического распределителя. Заготовка – круглый прокат из стали. Перед механической обработкой ее подвергают улучшению до нужной твердости. На токарной станке сверлят центральное отверстие, подрезают торец, предварительно обтачивают наружный диаметр, снимают фаски. Обработанный торец является не рабочим. Деталь переворачивают и производят токарную обработку противоположной стороны с образованием конических поверхностей. Затем растачивают центральное отверстие. Далее на сферотокарном станке в специальном приспособлении обтачивают сферу. Принимая за базу центральное отверстие, на круглошлифовальном станке шлифуют наружный диаметр до окончательного размера. На настольно-сверлильном станке сверлят отверстия под штифты и снимают фаски. На универсально-фрезерном станке фрезеруют канавочные пазы на наружной поверхности. Затем приступают к обработке пазов на рабочем торце распределителя. Для этого на плоском торце сверлят отверстие, а на сферическом по горизонтальной оси детали – два отверстия напроход; эти отверстия расфрезеровывают по заданному контуру на универсально-фрезерном станке с использованием поворотного стола.

Затем на плоскошлифовальном станке шлифуют плоскости до нужной шероховатости. Деталь устанавливают на магнитной плите в приспособлении. На сферошлифовальном станке шлифуют сферу. После слесарной обработки деталь азотируют на глубину 0,3-0,5 мм, затем окончательно шлифуют плоский и сферический торцы. Припуск при шлифовании сферы должен быть не более 0,05 мм во избежание снятия азотированного слоя. После окончательного шлифования производят контроль биения плоского и сферического торца относительно центрального отверстия.

Окончательная обработка плоского и сферического торцов заключается в доводке на доводочном приспособлении (плите) для плоскости и на сферодоводочном для сферы.

Завершающими операциями являются тщательная промывка до полного удаления доводочной пасты, сушка горячим воздухом до полного удаления влаги, консервация и упаковка.

Поршни и шатуны аксиально-поршневых гидромашин. Узел поршень-шатун в аксиально-поршневых гидромашинах представляет собой неразъемное соединение.

Существенное значение для обеспечения надежной работы соединения имеет способ и качество заделки шатуна в поршень.

Первый вариант. Поршень и вкладыш изготавливают из бронзы Бр. АЖ 9-4, шатун – из стали 12ХН2А с последующей цементацией и закалкой до HRC 56-62. Наружный диаметр поршня и вкладыша обрабатывают предварительно с припуском для дальнейшей обработки после завальцовки, равным 1 мм на диаметр. Вальцуемая поверхность имеет припуск 1 мм на сторону и для уменьшения разброса в показателях качества завальцовки по 2-му классу точности. Обработка шатуна происходит окончательно до завальцовки. Завальцовку осуществляют на пневматическом прессе методом протягивания деталей через комплект матриц (фильер). Матрица представляет собой оправку с набором из восьми калиброванных колец, установленных в определенной последовательности. Диаметр колец уменьшается по мере продвижения детали. Разница в диаметрах между предыдущими и последующими кольцами последовательно составляет 0,2; 0,15; 0,1 и далее до 0,05 мм.

Комплект состоит из трех матриц, подбираемых в зависимости от предельных размеров вальцуемых деталей.

По второму варианту поршень изготавливается из стали 38ХМЮА, а шатун – из стали 30Х3МФА. После завальцовывания производится совместное азотирование на глубину 0,25 – 0,32 мм. Система отверстий в поршне и шатуне, обеспечивающая смазку сферических поверхностей при эксплуатации, в процессе азотирования создает тягу, засасывая аммиак на поверхность сферы шатун-поршень и гарантируя тем самым необходимые условия для диссоциации в целях получения требуемой глубины азотируемого слоя.

Перед завальцовыванием наружный профиль шатуна и внутренняя поверхность поршня полностью обрабатываются. Шатун устанавливают в поршень до упора во внутреннюю сферу и в таком положении зажимают в приспособлении резьбонакатного станка. На станке вместо резьбонакатных головок устанавливают специальные закаточные профилирующие ролики, производящие закатку поршня по малой сфере шатуна.

После закатки поршни по первому варианту протачивают в центрах, а по второму шлифуют на бесцентрово-шлифовальном станке до получения окончательных чертежных размеров. Затем производится контроль биения большой сферы шатуна относительно наружного диаметра поршня (не более 0,1).

Внутренние сферические поверхности поршней обрабатывают специальными профильными резцами. Окончательную обработку производят притирами из текстолита, укрепленного на стальной державке.

Сферические поверхности контролируют рычажной скобой (пассаметром), точность которой достигает 0,002 мм. Контроль чистоты производят визуально путем сравнения с эталоном.

Заготовка шатуна получается методом штамповки на эксцентриковых прессах. Перед штамповкой концы заготовки нагревают на электроконтактной установке, проверив предварительно материал на отсутствие трещин с помощью стилоскопа.

Шестеренные гидромашины

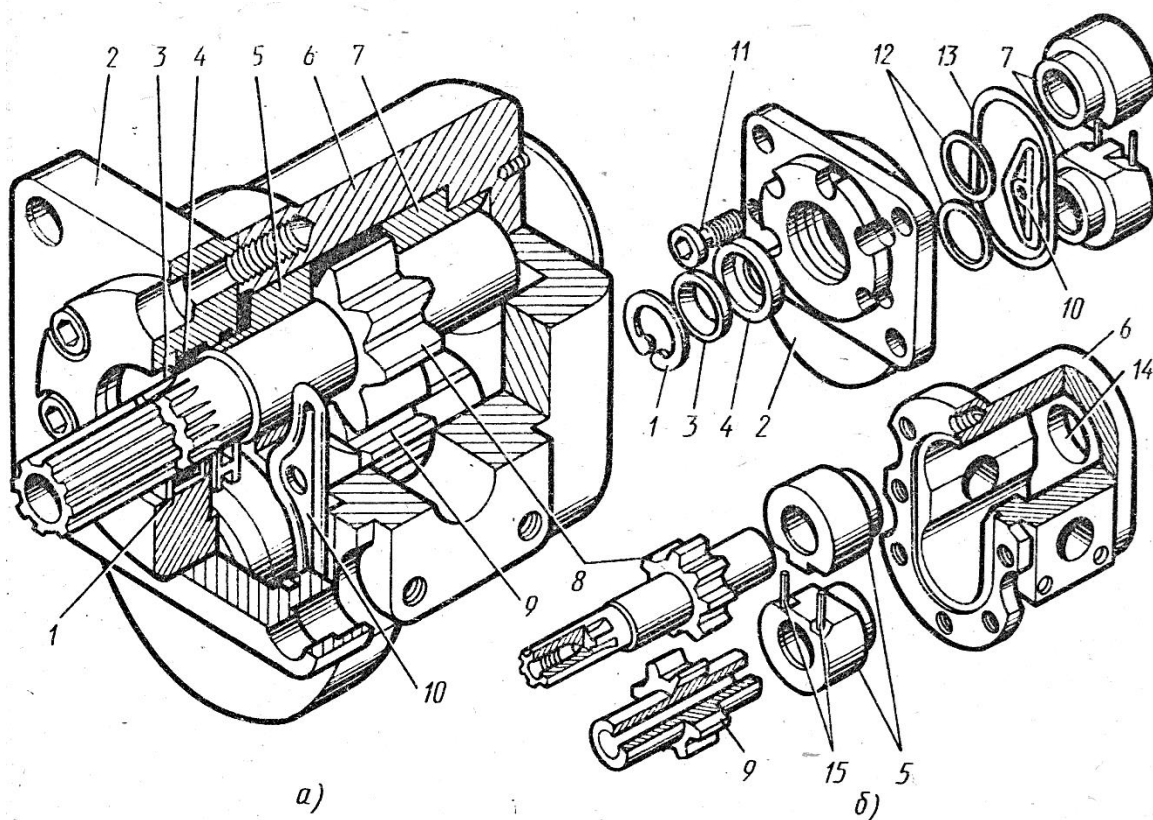


Рис. 2. Шестеренный насос-гидромотор:

а — конструктивная схема, *б* — детали насоса; 1, 3, 12, 13 — кольца уплотнения, 2 — крышка, 4 — уплотнение, 5, 7 — втулки, 6 — корпус, 8, 9 — шестерни, 10 — пластина, 11 — винт, 14 — отверстие, 15 — проволоки

Рабочие колеса шестеренных насосов. Рабочие колеса (шестерни) для шестеренных насосов изготавливают из стали 20Х с цементацией и закалкой, а из стали 45 или 40Х — с объемной закалкой.

К шестерням предъявляют следующие технические требования:

- 1) соосность посадочного отверстия с наружным диаметром зубчатого колеса должна быть в пределах до 0,01 мм;
- 2) соосность наружной и делительной окружностей — в пределах 0,2 мм;
- 3) колебания размеров зубчатых колес по ширине — не более 0,01 мм;
- 4) неперпендикулярность торцовых плоскостей шестерен к осям — не более 0,01 мм на длине 100 мм.

Качество изготовления шестерен контролируется по величине радиального биения зубчатого венца, разности соседних окружных шагов зубьев, толщине и профилю зубьев, отклонению от теоретического направления зуба.

Предварительное и чистовое обтачивание и растачивание производят с учетом подготовки установочных баз для нарезания зубьев. Этими базами как правило, служат посадочное отверстие и один из торцов. Чистовое обтачивание и подрезку торцов производят с одного установка детали, обеспечивая тем самым необходимую перпендикулярность торца к оси посадочного отверстия.

Наиболее распространенный способ нарезания зубьев — фрезерование методом обкатки червячной или гребенчатой фрезой, а также долбление круглыми долбьями. В процессе обработки червячная фреза вращается вокруг своей оси (резание) и перемещается вдоль оси шестерни (подача). Нарезаемая шестерня совершает вращательное движение (обкатка). При одном обороте однозаходной

фрезы заготовка поворачивается на один зуб. Шлифование зубьев производят на зубошлифовальных станках после термообработки.

Метод копирования при шлифовании является менее точным, но более производительным чем обкатка. Припуск под шлифование: 0,25-0,5 мм при предварительном шлифовании, 0,08-0,15 мм – при окончательном. Для особо точных насосов профиль зуба доводят с помощью притиров. Схема доводки показана на рис. Обрабатываемое зубчатое колесо 2 находится в зацеплении с тремя чугунными зубчатыми колесами – притирами 1. Вращение получает доводимое зубчатое колесо. Доводка ведется тонкими абразивами в среде минерального масла. Кроме вращательного, притиры могут иметь осевое возвратно-поступательное перемещение. Этим обеспечивается дополнительное снятие стружки. Припуск под доводку 0,05 – 0,1 мм. В некоторых случаях производят доводку боковых поверхностей шестерен.

К новым зубчатым колесам предъявляют следующие технические требования:

1. Соосность посадочного отверстия с наружным диаметром зубчатого колеса должна быть до 0,01 мм;
2. Соосность наружной и делительной окружностей до 0,02 мм;
3. Колебание размеров зубчатых колес по ширине не более 0,01 мм;
4. Конусность и овальность по наружной поверхности не более 0,02 мм.

Твердость рабочих поверхностей после термической обработки и шероховатость указаны в таблице. Степень точности изготовления колес 6—6—7Х.

Чистовое обтачивание и растачивание отверстия, а также подрезку торцов производят с одного установка заготовки, обеспечивая необходимую перпендикулярность торца оси посадочного отверстия, принимаемого за установочную базу при нарезании зубьев. После термической обработки зубья шлифуют. Припуск под предварительное шлифование должен быть 0,25—0,5 мм, под окончательное 0,08—0,15 мм. Для особо точных насосов колеса доводят чугунными зубчатыми притирами с тонким абразивом (зернистость 200—250) в среде минерального масла. Припуск на доводку равен 0,05— 0,1 мм.

Изношенные валики заменяют новыми. Изношенные торцы опорных втулок шлифуют. После шлифования необходимо восстановить канавки для прохода масла, запираемого во впадинах колес насоса при его работе. Для обеспечения нормальной работы колес опорные втулки шлифуют попарно. Параллельность торцов должна быть обеспечена до 0,01 мм, биение наружной цилиндрической поверхности относительно оси отверстия — не более 0,01 мм, неперпендикулярность торцов оси — не более 0,01 мм.

При замене зубчатых колес или опорных втулок шлифованием одного из торцов корпуса или втулок необходимо обеспечить ширину корпуса на 0,06—0,08 мм больше общего размера по ширине зубчатого колеса с опорными втулками.

При ремонте насоса в случае заметного износа торцового уплотнения или повреждений контактирующих поверхностей торец втулки уплотнения и крышки корпуса шлифуют. Неперпендикулярность торца втулки оси должна быть не более 0,01 мм.

Перед сборкой все детали насоса должны быть промыты в керосине и смазаны тонким слоем минерального масла. Во избежание перекоса и зажима валиков винты крепления крышек необходимо

завертывать, попеременно увеличивая силу затяжки и проверяя легкость вращения приводного вала насоса.

Таблица 1 – Требования к качеству изготовления элементов объемных гидромашин

Наименование детали	Материал	Твердость после термической обработки	Шероховатость рабочих поверхностей. мкм
Шестеренный насос			
Зубчатое колесо	Сталь 45 Сталь 20Х, 40Х, 18ХГТ	HRC35 HRC58-62	0,63-0,32 (торцы)
Валик	Сталь 20Х, 40Х, 18ХГТ	HRC58-62	0,16-0,08 (шейки)
Опорная втулка	Чугун СЧ 21-40	—	0,63 — 0,32 (торцы)
Пластинчатый насос			
Статорное кольцо	Сталь ШХ15, ХВГ, 9ХС, 38Х2МЮА	HRC80-64	1.25—0.63 (по наружной поверхности) 0,63-0,32 (торцы, внутренняя поверхность)
Пластина	Сталь Р18, 9ХС	HRC62-64	0,040-0,020 (поверхности и рабочий торец)
Диск	Бронза БрЛЖ9-4, АЖМЦ10-3-1,5, ОФ 6,5-0,15	—	0,63-0,16 (торцы)
Ротор	Сталь 20Х, 40Х, 38Х2МЮА	HRC60-64	0,63-0,16 (торцы, пазы и цапфы)
Радиально-поршневой насос			
Поршень	Сталь ШХ15 Чугун	HRC57—59	0,16-0,08
Ротор	СЧ 32-52	HB10	(цилиндрическая поверхность) 0,16-0,08 (поверхности цилиндров, отверстие под втулку)
Реактивное кольцо	Сталь ШХ15	HRC58—62	0,32-0,16 (наружная и внутренние поверхности)
Ось	Сталь 20Х	HRC50-56	0,16-0,08 (шейки)
Втулка	Бронза АЖ 9-4Л, БрОФ 10-1, Чугун СЧ 32-52		0,16-0,08 (наружная поверхность)

Аксиально-поршневые гидромашины			
Блок цилиндров	Сталь ХВГ Бронза БрОЦС 10-2-3, БрО12 и др.	HRC60-64	0,040- 0.02 (опорный торец)
Опорный диск	Сталь Х12Ф1, 12ХН3А, 38Х2МЮА, Бронза БрОЦС 10-2-3, и др.	HRC20-27	0,040- 0.02 (опорный торец)
Поршень	Сталь 20Х, 40Х, ШХ15	HRC62-64	0,032-0,08 (цилиндрическая поверхность)
Поршневой эксцентриковый насос			
Поршень	Сталь 40Х	HRC50—55	0,016-0.08 (коническая и наружная поверхности)
Клапан	Сталь 18ХНВА	HRC 62-64	0,016—0,08 (конические поверхности)
Эксцентриковый вал	Сталь 18ХНВА	HRC 62-64	0,32-0,08 (беговые дорожки подшипников)
Гидравлический цилиндр			
Гильза	Сталь 35,45 (бесшовная труба)	—	0,32-0.08 (внутренняя поверхность),
Шток	Сталь 45, 30ХГСЛ	HRC38—40	0.32-0.08 (цилиндрическая поверхность)
Поршень	Чугун СЧ 21-40	—	1,25 — 0,32 (цилиндрическая поверхность)
Поршневое кольцо	Чугун СЧ 21-40	—	1,25 — 0,63 (наружные поверхности)

Рабочие колеса центробежных насосов.

Геометрическая сложность конструкции определяет необходимость их изготовления только с помощью литья, порошковой металлургии или фрезерования. Литейная технология является более дешевой по сравнению с порошковой, но нуждается в совершенствовании для придания необходимых свойств поверхности. Детали рабочих органов могут быть изготовлены с помощью различных технологий, например, путём литья в землю (из чугуна). Основным видом брака при литье является наличие поверхностных дефектов в виде пор и каверн в широком диапазоне размеров (рис.13), что связано с технологическими параметрами литья и использования формовочных и отделочных смесей, не обеспечивающих высокую газопроницаемость и наличие пригаров.



Рис.13 Примеры дефектов при литье

Анализ аварийности в зависимости от материала рабочих ступеней: наибольшее количество аварий приходится колеса, изготовленные из чугуна 85,2 %, затем следует порошковый материал для обычных условий - 10,0 %, нерезист - 9,5 % и углепластик - 0,0 %. В связи с тем, что по совокупности факторов чугун, как материал колес остается наиболее рациональным вариантом, актуальной является задача совершенствования технологии получения колес из чугуна.

Рабочие колеса можно изготовить из легированных чугунов. Легированные чугуны разделяют на следующие группы [5]:

1. По химическому составу: марганцевые, алюминиевые, хромистые, кремнистые, никелевые. Низколегированный чугун используется в качестве конструкционного материала, в связи с тем, что легирующие элементы увеличивают механические свойства. Характеристикой чугуна является

перлитная или игольчатая структура. Среднелегированный чугун имеет обычно мартенситную структуру и высокую износостойкость при повышенной и нормальной температуре.

2. По эксплуатационным условиям можно разделить на: износостойкие, коррозионностойкие, немагнитные, жаростойкие и жаропрочные высоколегированные чугуны. В большинстве случаев они обладают ферритной или аустенитной структурой. Применяются чугуны в качестве немагнитных, антикоррозионных, жаростойких или в качестве сплавов с особыми свойствами. В таблицах один и два представлены физико-механические свойства чугунов.

Таблица 6. Марки и физико-механические свойства легированных чугунов

Марка чугуна	Механические свойства	
	σ _т , МПа	НВ, МПа
Хромистые чугуны		
ЧХЗТ	200	4400...5860
ЧХ9Н5	350	4900...6070
ЧХ16М2	170	4900...6070
ЧХ28Д2	390	3900...6070
Никелевые чугуны		
ЧН4Х2	200	4600...6450
Алюминиевые чугуны		
ЧЮХШ	390	1830...3560
ЧЮ6С5	120	2360...2940
ЧЮ7Х2	120	2540...2940
Марганцевые чугуны		
ЧГ6СЗШ	490	2150...2540
ЧГ7Х4	150	4900...5860

σ_т – предел прочности, НВ- твердость по Бринелю

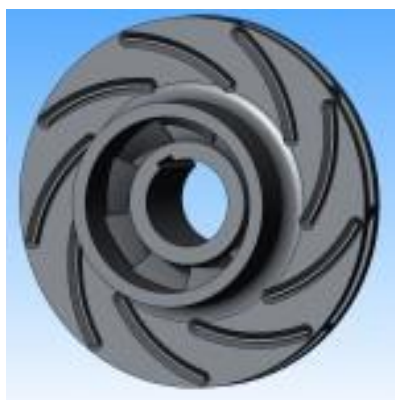
Высокохромистые (до 34% хрома) и хромникелевые чугуны применяют для производства деталей, которые работают в условиях ударного абразивного изнашивания, при больших температурах. Также за счет легирования чугуна, жаростойкость достигается кремнием (5...6% Si) и алюминием (1...2% Al). Свойства чугунов можно в значительной степени изменять соответствующей термической обработкой в нужном направлении. Для изготовления рабочих колес может применяться чугун марки —Нирезист®, Так, в [6] описано рабочее колесо, выполненное из чугуна аустенитного модифицированного типа —Нирезист®, соответствующего ТУ 26-06-1305-95. Химический состав чугуна (в мас.%): углерод 2,7-3,1, кремний 1,2-1,9, марганец 0,85-1,5, хром 0,7-1,5, никель 15-17, медь 6,1-8, алюминий 0,01-0,3, кальций 0,02-0,1, редкоземельные металлы 0,01-0,08, ниобий 0,005-0,02, барий 0,05-0,1, тантал 0,003- 55 0,01, фосфор 0,001-0,25, сера 0,001-0,03, магний 0,01-0,07, железо - остальное, механические свойства: твердость НВ от 1200 до 1300. Таким образом, для изготовления рабочих колес применяются высоколегированные многокомпонентные составы.

Разработка способа получения высокопрочного чугуна с шаровидным графитом – одно из перспективных направлений в производстве чугунных изделий. В этом чугуне отлично сочетаются высокие технологические и физико-механические свойства. Замена простого серого чугуна на высокопрочный, дает возможность существенно уменьшить массу отливок, за счет утоньшения их сечения, при этом увеличиваются показатели надежности при эксплуатации.

Самой сложной задачей является изготовление отливок из чугуна марок ВЧ60, ВЧ40 в соответствии с ГОСТ 7293-85. При этом, использование чугуна этих марок дает возможность по максимуму применить его хорошие физико-механические свойства. При изготовлении отливок из чугуна марки ВЧ40, состав хрома в шихте не должен превышать 0,1%; для других типов ВЧ — состав остаточного хрома допускается не более 0,2%.

Готовое рабочее колесо подвергают жидкофазной и химико-термической обработке рассмотренным далее. Борирование — химико-термическая обработка, которая насыщает поверхностный слой стали бором при нагреве в соответствующей среде. Тысячные доли бора увеличивают износостойкость стали в 2 раза. Борирование чаще всего проводят при электролизе расплавленной буры ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$). Изделие служит катодом. Температура насыщения 930—950° С, выдержка 2 — 6 часов. Износостойкость борированных сталей марки-45, в режиме сухого трения-скольжения выше в 4-6 раз износостойкости цементированных; в 3-8 раз цианированных; 1,5-3 раза нитро- цементированных; в 4 раза закаленной низкоотпущенной стали 45; в 2 раза хромо-силицированных; [29].

Колесо рабочее конденсатного насоса КН 50-55



Так же одним из прогрессивных способов изготовления рабочих колес, является механическое фрезерование. Например рабочее колесо конденсатного насоса КН 50-55. Изготавливается фрезерованием из заготовки формы основного диска с лопастями и последующей сваркой покрывного диска. При этом, изготовление данным способом требует современного технологического оборудования (Станки с ЧПУ) и предварительно созданной модели рабочего колеса в программе 3-d моделирования. Модель используется для моделирования проточной части насоса с целью модернизации и улучшения характеристик.

Рабочие колеса центробежных компрессоров.

Назначение, условия работы, конструктивные особенности. Рабочее колесо является основным и наиболее нагруженным элементом проточной части центробежного компрессора. При вращении колеса с большой скоростью (окружные скорости достигают 300 м/с) под действием центробежных сил в материале колеса возникают большие внутренние напряжения. Кроме того, колесо подвергается воздействию давления, температуры, агрессивной рабочей среды. Возможны

вибрации колеса. Для обеспечения надежной работы компрессора рабочее колесо должно иметь достаточную прочность, а также совершенные аэродинамические формы проточной части для получения высокого КПД установки.

Рабочее колесо (рис. 137) состоит из основного диска 3, лопаток 2 и покрывного диска 1. Рабочие колеса центробежных компрессоров отличаются большим разнообразием конструктивных исполнений.

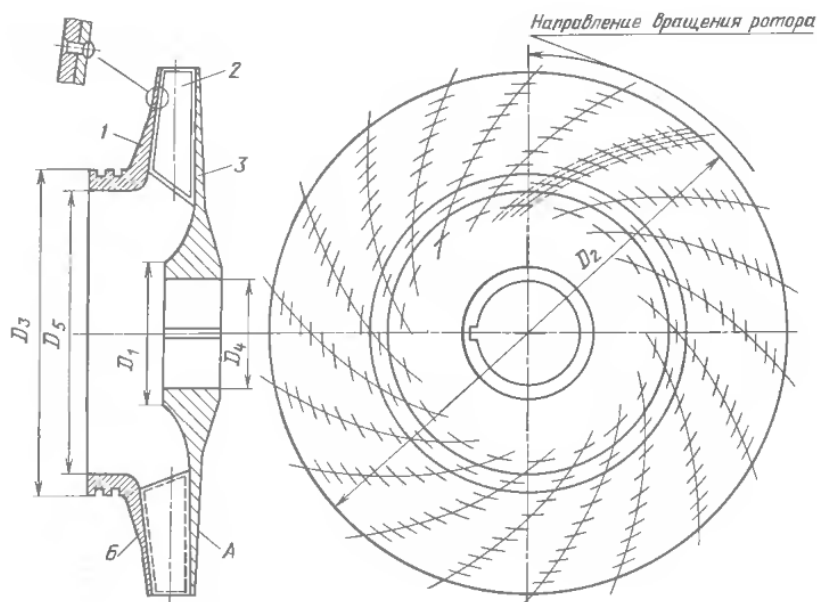


Рис. 137. Рабочее колесо

Так, по относительной ширине канала (отношение ширины канала на выходе к наружному диаметру колеса) рабочие колеса делятся на малорасходные (с малой относительной шириной) и высокорасходные (с большой относительной шириной). По форме лопаток колеса могут быть с обычными (цилиндрическими) или с пространственными лопатками. Рабочие колеса отличаются по числу и длине лопаток, характеру их соединения и т. д.

Различный характер конструктивных решений объясняется многообразием технических и эксплуатационных требований, предъявляемых к конструкциям машин, а также необходимостью учета возможностей предприятий, изготавливающих центробежные компрессоры.

Все рабочие колеса можно разделить на три технологические группы:

1) открытая конструкция; отдельно изготавливаются все элементы рабочего колеса (основной, покрывной диски и лопатки), а затем соединяются между собой клепкой, сваркой или пайкой; рабочее колесо представляет собой полностью сборную конструкцию (рис. 138, а);

2) полуоткрытая конструкция (рис. 138, б); отдельно изготавливают цельнофрезерованный (лопаточный) и покрывной диски, а затем соединяют между собой клепкой или пайкой; конструкция колеса — сборная;

3) закрытая конструкция (рис. 138, в); монолитное колесо; изготавливается литьем, фрезерованием, электроэрозионным способом.

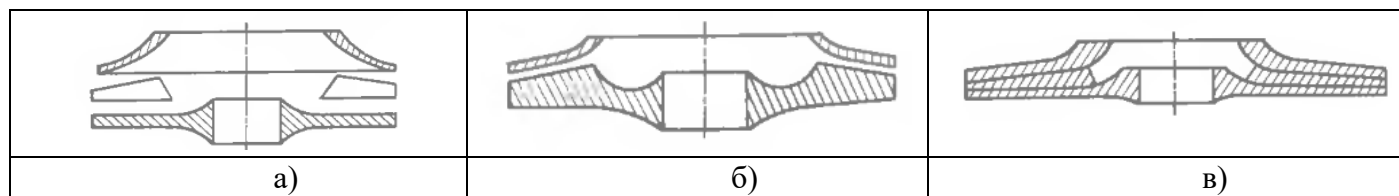


Рис. 138. Конструкции рабочих колес: а — открытая; б — полуоткрытая; в — закрытая

Производство рабочих колес различных технологических групп существенно отличается по технологическим процессам, применяемому оборудованию, приспособлениям. Однако такая классификация позволяет, несмотря на многообразие колес, создать типовые технологические процессы и тем самым уменьшить трудоемкость технологической подготовки производства. Материал и способы получения заготовок. Выбор материала рабочих колес зависит от расчетных напряжений, а также от химического состава рабочей среды.

Если в качестве рабочей среды применяется газ, не обладающий коррозионной активностью, применяют углеродистые стали марок 40, 45, 40Х. При использовании агрессивных рабочих сред рабочие колеса изготавливают из легированных и хромоникелевых сталей марок 30ХГС, Х15Н9Ю и т. п.

Заготовки рабочих колес открытого и полуоткрытого типов (т. е. заготовки дисков), как правило, поковки, полученные методом свободнойковки на молотах или прессах. К качеству металла предъявляются высокие требования. Поковка не должна иметь трещин, пор, флокенов, инородных включений. В качестве исходного материала используют среднюю часть слитка. Верхнюю и нижнюю части слитка, как менее качественные (наличие раковин, пор и других дефектов), удаляют и их можно использовать для переплавки.

Применениековки позволяет получить металл однородной структуры. Каждая заготовка сопровождается паспортом, куда вносят данные химико-физического состояния слитка поковки, и далее данные о свойствах материала после выполнения каждой технологической операции, связанной с изменением этих свойств. Заготовки подвергают ультразвуковой и магнитной дефектоскопии.

Опыт применения ультразвуковой дефектоскопии позволил установить следующие нормы годности заготовок и деталей, широко применяемых на компрессорных заводах:

- 1) полное отсутствие дефектов или наличие отдельных разрозненных неметаллических включений размером до 2 мм;
- 2) единичные, разработанные в теле ступицы неметаллические включения размером 2—4 мм;
- 3) наличие зоны скопления мелких неметаллических включений размером до 4 мм в количестве не более 10 шт. на площади не менее 100 мм²;
- 4) наличие трех зон скопления мелких неметаллических включений размером до 2 мм, причем площадь каждой зоны должна быть не более 400 мм² при расстоянии между зонами не менее 120 мм.

В особо ответственных случаях при больших окружных скоростях и температурах материал колес подвергают контролю на наличие остаточных напряжений. Для этого вырезают образцы в виде кольца и измеряют деформации.

Основными поверхностями рабочих колес (см. рис. 137) являются отверстия основного и покрывного дисков D4 и D5 и соответствующие им торцовые поверхности; шпоночный паз в отверстии основного диска; наружные цилиндрические поверхности дисков D1, D3 и D2.

Анализ технических требований. Точность размеров основных поверхностей назначают по квалитетам 7—8 с параметром шероховатости поверхности отверстия основного диска $Ra=1,25$ мкм; поверхности лопаток и поверхности А, Б (см. рис. 137) основного и покрывного дисков $Ra=0,63$ мкм. Все остальные поверхности $Ra = 2,5$ мкм. Требование к параметру шероховатости рабочих колес обусловлено условиями их эксплуатации: для малонагруженных высокорасходных колес рекомендуются $Rz=20 \dots 40$ мкм, для малорасходных колес, работающих с высокой степенью нагружения, — $Ra = 0,63 \dots 0,8$ мкм.

Полирование рабочих поверхностей малорасходных колес компрессоров сверхвысокого давления позволяет довести КПД последней ступени до 74 % и для колес первой ступени до 77 %.

Для обеспечения надежного крепления основного диска к лопаткам при клепке отклонение от плоскостности привалочной поверхности диска не должно превышать 0,05 мм на длине 400 мм. Зазор между привалочной поверхностью диска и лопаткой допускается не более 0,03 мм, а зазор между спинкой лопатки и приложенным угольником — не более 0,2 мм. При сборке лопаток с дисками методом диффузионной сварки зазор в привалочных поверхностях допускается не более 0,03—0,05 мм, при вакуумной пайке 0,08 мм, при сварке колес зазор может составлять 0,2—0,3 мм.

Техническими требованиями оговаривается отклонение от соосности отверстий покрывного и основного дисков от 0,01 до 0,05 мм, а также биение их торцов не более 0,05 мм. Несоблюдение этих требований нарушит взаимное расположение элементов рабочего колеса, затруднит сборку и может привести к снижению эксплуатационных характеристик компрессора. Допуск параллельности боковых поверхностей шпоночного паза относительно оси в пределах 0,02—0,05 мм. Допускаемый небаланс для рабочих колес 0,25—0,5 г.

Специфическими требованиями к рабочим колесам являются данные по массе. Рабочие колеса следует взвесить с точностью до 10 г и результаты записать в технологический паспорт. Данные по массе колес необходимы для сборки ротора. Подбор колес одинаковой массы на вал ротора позволит сократить длительность операции по подгонке массы, снизив трудоемкость как механической обработки, так и балансировки.

Выбор маршрута обработки и оборудования. Типовые технологические процессы изготовления сборных рабочих колес (открытого и полукоткрытого типа) центробежных компрессоров отражают все основные технологические процессы, используемые в отечественной промышленности и за рубежом (табл. 6 и 7). В табл. 6 представлены типовые технологические процессы изготовления дисков для рабочих колес различных конструкций.

Таблица 6 – Технологические операции изготовления дисков

Операция	Диск без лопаток для колес (см. рис. 138. а)		Диск с цельнофрезерованными лопатками для колес (см. рис. 138. б)	
	клепанных	ПАЯНЫХ	клепанных	паяных
Токарная предварительная	Черновая обработка по контуру			
Термическая обработка	+	+	+	+
Токарная контрольная	Вырезание пробы в виде кольца для механических испытаний			
Токарная	Предварительная обработка по контуру		Растачивание отверстия и подрезание торцов. Обработка полотна диска со стороны лопаток с припуском 10—15 мм	
Дефектоскопия	+	+	+	+

Разметочная		Разметка для тали и	установки де-копира
Копировально-фрезерная		Обработка контура лопатки	
Слесарная		Шлифование и полирование рабочих каналов	
Токарная	Окончательная обработка наружных поверхностей диска	Окончательная обработка диска	
Раднально-сверлильиая	Обработка отверстий под заклепки		

В табл. 7 — технологические процессы изготовления рабочих колес. В табл. 8 приведены технологические процессы изготовления цельных колес (закрытого типа) с применением литья, фрезерования и электроэрозии, которые отличаются от процессов для сборных колес значительно меньшим числом операций (шесть операций вместо четырнадцати).

Таблица 7 – Технологические операции изготовления рабочих колес

Операция	Сварное колесо	Паяное колесо	Клепанное колесо
Лопатка штампованные			
Комплектовочная	+	+	+
Слесарная	Подгонка лопаток к основному диску		
Слесарная	Сборка лопатки с диском на прихватке (специальное приспособление)		Сборка лопатки с диском на болтах (специальное приспособление)
Сверлильная			Сверление, зенкование отверстия под заклепки (специальное приспособление)
Сборочная	Приварка лопатки к основному диску с подогревом до 250—350 *С (специальное приспособление)	Пайка лопатки к основному диску (специальное приспособление)	Клепка лопатки к основному диску
Токарная	Проточка лопатки под покрывной диск		Точение головки заклепок и тыльной стороны диска
Токарная			Шлифование полки по покрывному диску (специальное приспособление)
Слесарная	Зачистка швов	Подгонка лопатки под покрывной диск	
Лопатки штампованные ■ фрезерованные			
Слесарная	Прицентровка покрывного диска к основному и соединение (специальное приспособление)		
Сверлильная			Сверление и эскивание отверстия под заклепки (специальное приспособление)
Сборочная	Приварить покрывной диск к основному с подогревом до 250—350 °С (специальное приспособление)	Припаять покрывной диск к основному (специальное приспособление)	Приклепать покрывной диск к основному (специальное приспособление)

Токарная	Окончательная обработка внешних контуров, полирование	Снятие выступающих поверхностей заклепок, отработка покрывного диска
Токарная	Окончательная обработка внешних контуров, полирование	
Слесарная	Полирование рабочих каналов, скругление острых кромок	Полирование выполняется при изготовлении деталей (дисков и лопаток)

Таблица 8 – Технологические операции изготовления цельных рабочих колес

Операция	Литое колесо	Фрезерованное колесо	Электроэрозивное колесо
Токарная	Предварительное точение	Предварительное точение, вырезание образцов для механических испытаний	
Токарная	Получистовое точение	Точение профиля колеса с припуском 2 мм, входной канал точить окончательно	
Сверлильная		Сверление технологических отверстий по числу каналов (специальное приспособление)	
Фрезерная		Фрезерование рабочих каналов колеса (специальное приспособление)	
Электро-эрозивная			Обработка рабочих каналов колеса (специальное приспособление)
Токарная	Окончательная обработка внешних контуров колеса, полирование		

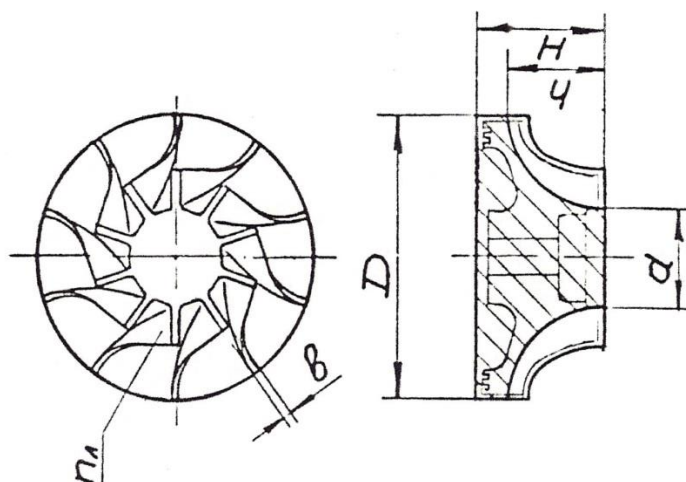
Изготовление клепаных колес со штампованными лопатками — наиболее распространенный в нашей стране технологический процесс и применяется для изготовления рабочих колес с лопатками простой конфигурации, работающих при окружных скоростях до 100 м/с. Изготовление клепаных колес требует больших затрат ручного труда, поэтому такие технологические процессы целесообразно применять в единичном и мелкосерийном производствах.

Для токарной обработки и сверления используют оборудование как универсальное, так и станки с ЧПУ, позволяющие по программе сверлить большое число отверстий в дисках и лопатках. Значительное место при сборке элементов рабочих колес занимают слесарно-сборочные работы, поэтому здесь находят применение многочисленные специальные приспособления, облегчающие процесс сборки колес.

В настоящее время возможно изготовление предполагаемых конструкций РК компрессора несколькими способами:

- моноколеса - механическим путем из цельковой заготовки;
- монолитные - точным литьем;
- монопорошковые - методами порошковой и гранульной металлургии;
- моноспаенные или моносварные - сборкой двух или трех деталей пайкой или сваркой.

Указанные работы не рассматривают существующие способы изготовления моноколес из штампованных на молотах и кривошипных прессах заготовок с большими припусками и уклонами механическим путем, в том числе сборкой из двух или трех частей (механической сборкой).



Разработка РК из цветных сплавов по схеме "диск вместе с лопатками" с готовыми после пластического деформирования служебными поверхностями позволяет снизить трудоемкость и металлоемкость, повысить механические и эксплуатационные свойства моноштампованных РК вентиляторов.

Рассмотрим технологический аспект на примере изготовления моноштампованных рабочих колес газовых и гидравлических лопаточных машин из цветных сплавов. Каждый из указанных технологических способов изготовления РК лопаточных машин обладает своими определенными достоинствами и недостатками:

1. Изготовление моноколес из цельной заготовки механическим путем характеризуется высокой трудоемкостью, низким коэффициентом использования материала (КИМ) и отсутствием направленных волокон в направлении действия максимальных нагрузок. Коэффициент необрабатываемых поверхностей (КНП) равен нулю.

2. Изготовление моноколес из штампованных заготовок на молотах и кривошипных прессах, по сравнению с п. 1, характеризуется более низкой трудоемкостью, более высоким КИМ и частично направленными волокнами в направлении действия максимальных нагрузок при эксплуатации. При этом КНП также равен нулю.

3. Изготовление монолитных колес методами точного литья позволяет снизить трудозатраты при окончательной обработке литой заготовки, однако, технологический цикл точного литья длительный (15 - 30 дней) и трудоемкий. КИМ повышается до 0,5, а КНП - до 0,6.

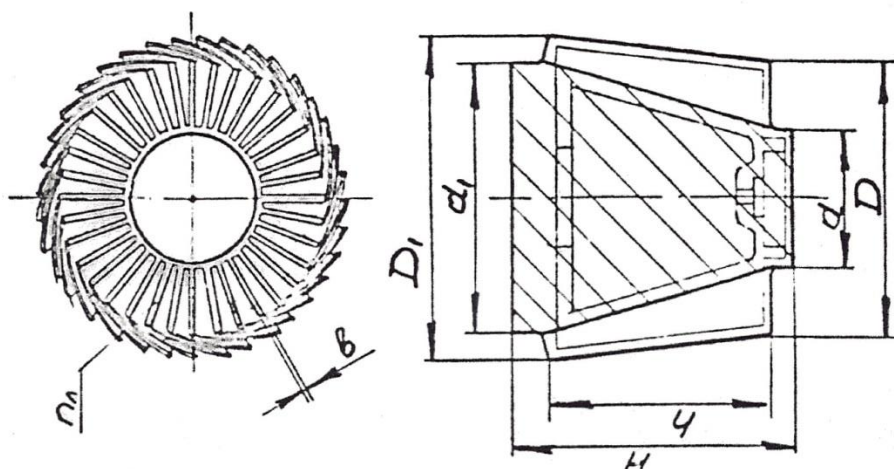
Монолитным колесам присущи следующие недостатки: литой металл склонен к образованию усталостных трещин из очагов на необработанных поверхностях проточных каналов; в заготовках РК из литейных сплавов присутствуют литейные дефекты: поры, рыхлоты, засоры, являющиеся концентраторами напряжений.

Материал литых заготовок РК лопаточных машин характеризуется нестабильными механическими свойствами, относительно низкой пластичностью и ударной вязкостью. Вследствие этого для монолитных РК принимается повышенный запас прочности по разрушающей частоте по сравнению с РК из деформируемых материалов.

4. Существенным достоинством обладают моноштампованные РК из деформируемых сплавов, штампуемые в изотермических условиях на гидравлических, гидровинтовых прессах в горячих штампах и на высокоскоростных молотах в холодных штампах, оборудованных автономными системами выталкивания. Это позволяет изготавливать моноштампованные заготовки методами точной объемной штамповки с минимальными уклонами $0,4...0,5^\circ$ или без них, с готовыми

необрабатываемыми, после штамповки, функциональными поверхностями проточных каналов. При этом обеспечивается высокая прочность, пластичность и ударная вязкость. Одновременно практически отсутствуют дефекты, достигается однородная мелкозернистая структура с неперерезанными волокнами, направленными по направлению действия максимальных нагрузок при эксплуатации.

Моноштампованные РК изготавливаются различными методами выдавливания: прямым - обратным; радиальным - аксиальным и комбинированным, или изготавливаются сочетанием перечисленных методов. В авиационной промышленности накоплен определенный опыт изготовления цельноштампованных РК по схеме "диск вместе с лопатками" с готовыми после штамповки функциональными поверхностями в проточных каналах (рис. 2, 3). Необходимые механические свойства обеспечиваются правильной технологией процессов точной объемной штамповки.



Моноштампованные РК изготавливаются из алюминиевых высокопрочных сплавов (В95), титановых и нержавеющей сталей в многоканальных (многоразъемных) штампах сборно-разборной конструкции для воздушных турбоагрегатов ГТД, авиационных турбохолодильников, турбодетандеров и других агрегатов и установок.

Данный технологический процесс изготовления моноштампованных колес РК центробежных компрессоров и турбоагрегатов позволяет выдавливать галтели (переход от диска к лопаткам) в широком диапазоне размером от 1,5 до 5,0 мм, а также выдавливать тавр на входе в колесо от 2,5 до 6,0 мм и более. КИМ повышается до 0,7 и КНП - до 0,6. Механические свойства на 10...15% выше по сравнению с прессованной заготовкой.

Перерезанные волокна на служебных поверхностях отсутствуют, что позволяет повысить надежность моноштампованных РК центробежных вентиляторов, в том числе и стабильность механических свойств по всему сечению штампованной поковки РК.

Прочие конструктивные детали гидромашин

Валы. К приводным валам гидромашин предъявляются высокие требования по износостойкости и геометрической точности. Материалом для валов служат стали 38ХМЮА, 30ХМА, 12ХН2А, реже сталь 40Х. В качестве заготовок обычно используется прокат или штамповка. Термическая обработка в зависимости от применяемого материала сводится к объемной закалке, цементации с последующей закалкой и азотированию.

После штамповки заготовку отжигают для снятия внутренних напряжений. При значительных объемах выпуска применяют токарные полуавтоматы с гидрокопировальным устройством. Если в конструкции вала предусмотрены шлицы, то их фрезерование производится концевыми фрезами на вертикально-фрезерном станке. При крупносерийном производстве шлицы нарезают червячными фрезами на зубофрезерном станке методом обкатки. В шлицевых соединениях повышенной точности шлицы шлифуют на специальных шлицешлифовальных станках.

Пружины. Для гидроприводов применяют в основном витые цилиндрические пружины сжатия, воспринимающие продольно-осевую сжимающую нагрузку.

Пружины сжатия изготавливают в поджатыми на концах витками и шлифованными торцевыми установочными поверхностями. Для ответственных пружин перпендикулярность продольной оси к опорной плоскости не более 0,1 на 100 мм длины. Ввиду того, что рассматриваемые пружины часто подвергаются значительным динамическим воздействиям, к материалам для пружин предъявляют высокие технические требования. Так, после термообработки проволока должна обладать наряду с устойчивыми упругими свойствами значительной прочностью и выносливостью, а также достаточной пластичностью и сопротивлением ударным нагрузкам. На поверхности витков не допускаются мелкие трещины, надрезы и другие микродефекты.

При выборе материала пружинной стали учитывают прокаливаемость, возможность поверхностного упрочнения и экономического процесса изготовления.

Широкое распространение для пружин с диаметром прутка до 8 мм получила углеродистая холоднотянутая проволока, подвергаемая на заводе изготовителе специальной обработке (патентированию) и последующему волочению. Патентированная углеродистая проволока отличается высокой прочностью, пластичностью, возможностью дополнительного поверхностного упрочнения.

Для особо ответственных пружин, применяющихся в автоматах постоянной мощности, предохранительных клапанах периодического действия, подвергающихся импульсному воздействию, целесообразно применять специальные легированные стали с тщательным контролем состава, режимов навивки, термообработки и последующей упрочняющей обработки.

Проволоку диаметром от 3 до 12 мм можно заказывать в шлифованном состоянии. Шлифование и полирование прутков обеспечивает высокое качество покрытия и повышают предел усталости. Шлифуют и полируют прутковую пружинную сталь на бесцентрово-шлифовальных и ленточных шлифовально-полировальных станках.

Технологический процесс изготовления пружин включает следующие этапы:

- 1) контроль качества и подготовку проволоки в навивке;
- 2) навивку;
- 3) обработку опорных витков;
- 4) термическую обработку;
- 5) очистку;
- 6) осадку и заневоливание;
- 7) нанесение защитных покрытий;
- 8) упрочнение;
- 9) контроль и испытания.

Уплотнительные устройства. В гидрооборудовании наиболее распространены резиновые уплотнения. Их применяют для герметичности узлов, совершающих возвратно-поступательное или вращательное движение, а также для неподвижных соединений.

Технические требования к уплотнениям:

- 1) уплотнения неподвижных соединений должны обеспечивать герметичность в течение четырех лет при следующих условиях: максимальном рабочем давлении 25×10^6 Н/м², температуре рабочей среды от -25 до $+80^\circ\text{C}$, температуре хранения и транспортирования в нерабочем состоянии от -60 до $+50^\circ\text{C}$;
- 2) уплотнения подвижных соединений при тех же условиях должны обеспечить герметичность в течение 4000 ч;
- 3) манжетные армированные уплотнения вращающихся соединений должны обеспечивать герметичность в течение не менее 4000 ч при длительном рабочем давлении 6×10^4 Н/м², температурном диапазоне по п.1 и при окружных скоростях от 6,5 до 11 м/с.

Уплотнения, применяемые в конструкциях гидроагрегатов, подразделяют на:

- 1) уплотнения неподвижных соединений металлическими, резинометаллическими и резиновыми кольцами круглого сечения;
- 2) уплотнения вращающихся валов резиновыми армированными манжетами;
- 3) уплотнения соединений, осуществляющих возвратно-поступательное движение, манжетами U-образного сечения.

Металлические кольца изготавливают из отоженной меди. Резинометаллическое кольцо представляет собой кольцо из кадмированной стали, на внутренней кромке которого для достижения уплотнительного эффекта с помощью вулканизации сделано утолщение трапецевидного сечения из резины. Принцип действия кольца основан на уплотняющем эффекте утолщения резины при деформации. Кольцо деформируется, пока не возникает контакт между металлическими поверхностями.

Для всех видов резиновых уплотнений используют маслостойкую резину.

Резиновые уплотняющие кольца изготавливают формовым способом с последующей вулканизацией под прессом в такой последовательности:

- 1) из пластифицированной резиновой массы делают шнур; концы его утоняют и соединяют внахлестку;
- 2) пресс-форму тщательно очищают и на рабочие поверхности наносят тонкий слой смазки;
- 3) заготовку укладывают в подогретую пресс-форму, которую устанавливают на плиту гидравлического пресса;
- 4) производят прессование, постепенно повышая давление;
- 5) производят вулканизацию (выдержка при постоянном давлении и температуре); для резины марок 3826 и В-14 время выдержки 30 мин при $143 \pm 2^\circ\text{C}$;
- 6) раскрывают пресс-форму, вынимают кольцо и производят визуальный контроль;
- 7) обрезают облой и контролируют кольцо по размерам.

При изготовлении U-образных манжет, прессуемых из различных композиций, последовательность операций аналогичная. Режим прессования зависит от состава (композиции) резиновой смеси.

Трубопроводы и арматура. В качестве материала для трубопроводов используют цельнотянутые металлические трубы из различных марок сталей. Для давлений до 10^7 Н/м² применяют трубы из алюминиевых сплавов типа АМгМ. В авиации трубопроводы изготавливают из сталей X18H10T, OX18H10T и т.д.

Штуцера, ниппели, гайки делают из сталей 45, 40X, 1X18H9T, 30ХГСА и т.д.

Перед изготовлением трубопровода качество каждой партии труб проверяют на образцах на раздачу, сплющивание, бортование, загиб на 90^0 , на растяжение и на их механическую прочность под действием давления. Образцы считают годными, если после испытаний на поверхности образца не будет трещин и надрывов материала.

Для придания требуемой конфигурации трубопроводы подвергают гибке, которая является одной из ответственных операций. Не допускается гибка труб песком и с подогревом места перегиба, так как оставшийся после гибки песок полностью не удаляется и засоряет гидросистему. В качестве наполнителей при гибке рекомендуется применять сплав Вуда и четырехводную калиевую селитру. Наполнители наливают в трубы в расплавленном виде при температуре до 100^0 .

Одним из перспективных методов является гибка с подачей внутрь трубы гидростатического давления рабочей жидкости. При этом система внутренних напряжений в металле трубы, возникающая при гибке, уравнивается внутренним давлением жидкости.

Гибка производится в трубогибочных приспособлениях или на станках.

На месте изгиба не должно быть вмятин, складок и выпуклостей.

Для присоединения арматуры к концам трубы применяют сварку, пайку и развальцовку. Для труб из алюминия используют аргонодуговую сварку, для стали 20 – газовую. При пайке основной металл детали не доводят до расплавления, а следовательно сохраняют его прочность. Качество пайки зависит от способности припоя смачивать соединяемые поверхности. Паянные соединения хуже сопротивляются усталостным разрушениям в условиях вибрации.

Для развальцовки алюминиевых и стальных труб пользуются многороликовой оправкой, выполняющей две операции – развальцовку и торцовку.

После контроля герметичности (для сварных и паянных соединений) наружные и внутренние поверхности трубопроводов очищают от окалины и грязи. Наружные поверхности подвергают очистке под окраску и затем окрашивают в соответствии с требованиями технической документации.

Последовательность обработки внутренних поверхностей такая:

- 1) дробеструйная очистка до получения блестящей поверхности;
- 2) продувка чистым сжатым воздухом до удаления пыли и грязи;
- 3) обезжиривание уайт-спиритом;
- 4) травление 15%-ным раствором соляной кислоты с присадкой ПБ-5 в количестве 1,5 г/л до полного удаления окалины и шлама;
- 5) промывка горячей водой и фосфатирование 30-40%-ным раствором ортофосфорной кислоты при температуре $70-80^0\text{C}$ в течение 1 ч;
- 6) промывка горячей водой и обработка 30%-ным раствором кальцинированной соды до получения нейтральной реакции;
- 7) промывка рабочей жидкостью, монтаж и консервация.

Заготовками для деталей арматуры служат детали, полученные литьем по выплавляемым моделям или штамповкой. Наружные поверхности, кроме посадочных мест или присоединительных резьб, как правило не обрабатывают.

Механическая обработка заключается в сверлении, зенкерование и развертывании маслопроводящих каналов, а также в обточке, нарезании резьбы и обработке привалочных плоскостей с одной установки детали, что обеспечивает требуемую перпендикулярность торцов к оси резьбы. Все детали арматуры подвергают гальваническим покрытиям.

5. Технологический процесс изготовления детали

5.1 Разработка маршрутного технологического процесса обработки детали

Вначале определяют маршруты обработки элементарных поверхностей деталей (плоских, цилиндрических, наружных, внутренних, резьбовых и т.д.).

Предварительный выбор методов обработки элементарных поверхностей и числа необходимых переходов (операций) производят на основе данных справочных таблиц экономической точности обработки или на основе обобщенных таблиц примерных маршрутов, исходя из требований, предъявляемых к конечной точности и качеству поверхности, вида исходной заготовки, свойств материала и типа производства.

Для каждого типа поверхности определяют представителя, т.е. поверхность для которой заданы наиболее жесткие требования по точности и качеству, и устанавливают один или несколько методов окончательной ее обработки, т.е. последний технологический переход (или операцию). Зная вид и точность исходной заготовки, таким же образом выбирают первый, начальный метод обработки.

Определив первый и окончательный переходы, устанавливают необходимость промежуточных переходов число которых тем больше, чем ниже точность исходной заготовки и выше конечные требования к поверхности. Число вариантов обработки поверхности может быть довольно большим, и их сокращение возможно с учетом некоторых нюансов, к которым относятся, например, целесообразность обработки данной поверхности на одном станке за несколько последовательных переходов и ее обработке совместно с другими поверхностями заготовки за один установ, ограничение возможности применения некоторых методов из-за недостаточной жесткости детали и т.п.

Определение числа и последовательности технологических переходов при обработке элементарных поверхностей является основой для расчета общих и промежуточных припусков и операционных размеров на обработку, выявления необходимых стадий обработки, формирования маршрута обработки деталей в целом и разработки отдельных операций.

Припуск – слой материала, удаляемый с поверхности заготовки в целях достижения заданных свойств обрабатываемой поверхности детали. Припуск на обработку поверхности детали может быть назначен по справочным таблицам или на основе расчетно-аналитического метода.

5.2 Разработка технологических операций

Производительность технологических операций в значительной степени зависит от их структуры, которая определяется следующими параметрами:

- числом заготовок, одновременно устанавливаемых в приспособление или на станке (одно- или многоместная обработка);
- числом инструментов, используемых при выполнении операции (одно или многоинструментная обработка);
- последовательностью работы инструментов при выполнении операции (последовательность переходов).

Последовательное вступление инструментов в работу или последовательное расположение нескольких заготовок в приспособлении по направлению движения подачи характеризует структуру операции с последовательной обработкой. При параллельном расположении обрабатываемых

заготовок в приспособлении (т.е. при их расположении перпендикулярно к направлению движения подачи) и при одновременной обработке нескольких поверхностей одной или нескольких заготовок формируется структура операции с параллельной обработкой. При множественной обработке заготовок, расположенных в приспособлении в несколько рядов вдоль и поперек движения подачи, операция характеризуется как операция с параллельно-последовательной обработкой.

Экономическая эффективность технологических процессов обработки деталей в значительной степени зависит от того насколько рационально построен общий план (маршрут) обработки. Под технологическим маршрутом изготовления детали понимается последовательность выполнения технологических операций (или уточнение последовательности по типовому или групповому процессу) с определением содержания операций, выбором оборудования и технологической оснастки для их выполнения. Технологические маршруты весьма разнообразны и зависят от многих факторов: конфигурации детали, ее размеров, точности, наличия термической обработки, программы выпуска и др. Вместе с тем для качественного проектирования маршрута могут быть рекомендованы некоторые общие принципы, характерные для всех классов обрабатываемых деталей:

1. На первых (одной – двух) операциях обрабатывают поверхности, которые будут использоваться в качестве технологических баз.
2. Используя чистовые базы, обрабатывают остальные поверхности.
3. Вспомогательные поверхности обычно обрабатывают на чистовой стадии.
4. Предварительное содержание операций объединяют по принципу возможности выполнения на одном станке.

5.3 Механическая обработка

В процессе механической обработки материала снимается стружка путем резания резцом, сверлом, шлифовальным кругом -или другим инструментом. При изготовлении деталей гидропривода различают в основном три этапа механической обработки: предварительный, чистовой и отделка.

Наиболее распространенный вид механической обработки — точение, при котором главным движением является вращение обрабатываемой детали, а вспомогательным — линейное, перемещение (подача) резца.

Наружные поверхности золотников, поршней, валов, гильз обтачивают на revolverных и токарных станках, а при серийном и массовом производстве — на многошпиндельных автоматах 1А225-6, 1А240-4 и 1А240-6, токарно-револьверных автоматах 1Б112, 1Б118, автоматах продольного точения 1П12 и 1П16 и т. д.

Отверстия растачивают с помощью расточных головок на вертикальных, горизонтальных или наклонных токарно-расточных станках. Растачивание отверстий по 2—3-му классам точности широко распространено, особенно для отверстий в корпусных деталях гидроприводов с точно закоординированными осями. Тонкое растачивание по 1—2-му классам точности применяют, как правило, для точных отверстий малого диаметра, а также для поршневых гнезд в блоках цилиндров, изготавливаемых из бронзы. При крупносерийном производстве деталей (типа крышек гидроцилиндров) применяют метод одновременной обработки наружных и внутренних поверхностей на многолезцовых токарных, многошпиндельных полуавтоматах с горизонтальным и вертикальным расположением шпинделей (полуавтоматы типа 1284, 1285).

Отверстия сверлят в основном спиральными сверлами. При этом может вращаться инструмент (на вертикальных, радиальных, многошпиндельных сверлильных станках) или деталь (на токарных, revolverных и агрегатных станках). Последним способом обрабатывают глубокие отверстия, так как уход сверла от заданного направления в этом случае получается меньшим. Точность и чистота

отверстий при сверлении получаются невысокими (из-за скопления стружки в канавках сверла и изнашивания уголков на периферии режущей кромки). Стойкость сверла повышают при использовании пластин из твердых сплавов для режущих кромок.

Для увеличения диаметра просверленных отверстий, применяют зенкеры. Прочность последних выше, чем у сверла, из-за меньшей глубины канавок на его боковой поверхности. На торцевой поверхности зенкера отсутствуют перемычки (режущие кромки). Это позволяет обрабатывать диаметры свыше 30 мм (главным образом в корпусных деталях), с большей подачей на один оборот, а при использовании твердых сплавов — с высокими скоростями резания.

Для получения высокой точности и чистоты после операций сверления и зенкерования прибегают к развертыванию. Чтобы последовательно применить сверление, зенкерование и развертывание, на вертикально- и радиально-сверлильные станки устанавливают быстросменные патроны. Указанные операции выполняют параллельно при использовании многопозиционных сверлильных станков.

Фрезерование — весьма производительный способ обработки привалочных плоскостей корпусных деталей гидромашин и гидроаппаратуры, пазов и щелей в дроссельных устройствах, различных плоских и фасонных поверхностей, шпоночных пазов и т. д. Наиболее распространено двустороннее фрезерование торцовыми, дисковыми и кольцевыми фрезами, трехстороннее фрезерование концевыми и шпоночными фрезами, торцовое фрезерование торцовыми, дисковыми и концевыми фрезами и фасонное фрезерование с помощью фасонных цилиндрических и концевых фрез.

Значительное повышение производительности (в 2—5 раз) при фрезеровании достигается применением фрез с переменным шагом зубьев, разработанных В. Я. Карасевым. Вследствие неравномерности шага зубьев усилие резания вызывает апериодические колебания, что снижает вибрацию и позволяет работать с увеличенной подачей и глубиной резания. Режимы резания при фрезеровании ограничены прочностью зуба, чистотой и точностью обработки, жесткостью системы станок—фреза—деталь, стойкостью фрезы и мощностью станка.

Из-за малой доли машинного времени в общем времени цикла строгание и долбление не относятся к высокопроизводительным процессам. Применяются они крайне редко (в основном в индивидуальном производстве).

Для окончательной обработки сквозных точных отверстий в деталях из стали, чугуна и цветных сплавов применяется протягивание. Этот способ весьма эффективен, он широко используется при массовом производстве деталей типа втулок шестеренных насосов, корпусов гидродемпферов, клапанов и деталей с внутренними шлицами. Скорость резания (перемещения) протяжки 1—10 м/мин. Поле допуска окончательно обработанного отверстия 0,02—0,04 мм. Для повышения стойкости инструмента в некоторых случаях протягивание производят последовательно несколькими протяжками, распределяя между ними полную величину припуска.

5.4 Разработка режимов обработки

Методика нахождения режимов резания для различных методов обработки подробно изложена в справочной литературе. При этом наиболее выгодными считаются такие режимы обработки, которые обеспечивают наименьшую себестоимость механической обработки при удовлетворении всех требований к качеству продукции и производительности обработки.

В общем случае необходимо соблюдать определенную последовательность назначения режимов резания $t \rightarrow S \rightarrow V \rightarrow n$, которая включает следующие этапы:

1. Выбор глубины резания t (мм) по условию удаления припуска под обработку за один рабочий ход, но в зависимости от требований по точности и шероховатости, предъявляемых к обработанной

поверхности; припуск разделяют по стадиям обработки: предварительная, окончательная и отделочная.

Определение глубины резания за один рабочий ход:

а) при обработке поверхностей тел вращения:

$$t = \frac{0,5}{D_i - D_{i-1}}, \quad (12)$$

где D_i – диаметр после обработки, мм;

D_{i-1} – диаметр до обработки, мм.

2. Выбор подачи на один оборот S_0 (мм/об) с учетом стадии обработки (предварительная, чистовая или отделочная) и нагрузочно-прочностных характеристик технологической системы.

При черновой обработке подачу выбирают максимально возможную.

При чистовой обработке подачу выбирают в зависимости от требований к точности и шероховатости поверхностей.

3. Определение скорости резания V (м/мин) с учетом выбранных глубины резания и подачи, свойств обрабатываемого и режущего материалов, геометрии и стойкости инструмента по эмпирическим зависимостям, имеющим общий вид:

$$V = \frac{C_v}{T^m \cdot t^x \cdot S^y} \cdot k_v \quad (13)$$

где C_v , m , x , y – коэффициенты, учитывающие вид обработки;

T – период стойкости инструмента, мин;

k_v – коэффициент, учитывающие конкретные условия обработки.

4. Определение частоты вращения n_p (мин⁻¹):

$$n_p = \frac{1000V}{\pi \cdot D}, \quad (14)$$

По паспортным данным станка определяют частоту, близкую к расчетной.

При отсутствии этих данных ряд частот вращения можно определить по зависимости:

$$n_{np} = n_{\min} \varphi^{i-1}, \quad (15)$$

где n_{np} – принимаемая (ближайшая меньшая) частота вращения;

n_{\min} – минимальная частота вращения для данного станка;

φ – знаменатель ряда геометрической прогрессии, условно принимаемый равным 1,26;

i – номер ступени, на которой обеспечивается равенство.

После назначения частоты вращения шпинделя определяют минутную подачу:

$$S_M = S_0 \cdot n_{np}, \text{ (мм/мин)} \quad (62)$$

5.5 Специальные виды обработки

К специальным видам обработки деталей гидроприводов относятся: термическая и химико-термическая, а также обработка холодом, финишная (отделочная) и очистка от технологических загрязнений.

Все специальные виды обработки непосредственно влияют на качество изготовления и работоспособность деталей гидропривода.

Термическая обработка. При производстве деталей гидроприводов используют все виды отжига, закалки и отпуска. Кроме этого, применяют поверхностное упрочнение — закалку токами высокой частоты (т. в. ч.), а также химико-термическую обработку (цементацию и азотирование), в результате чего изменяется структура и химический состав поверхностного слоя.

Правильно выбранные режимы термической обработки обеспечивают высокое качество структурных превращений, минимальное коробление и деформацию деталей, а следовательно, высокую твердость, износостойкость, стабильность размеров и формы при эксплуатации и хранении. Выбор режимов термической обработки излагается в специальной литературе.

Обработка холодом проводится с целью стабилизировать размеры детали устранением остаточного аустенита, превращающегося при отрицательных температурах в мартенсит, а также для повышения твердости и износостойкости. Обработке холодом подвергают детали шатунно-кривошипных групп насосов, прецизионные пары гидроаппаратуры, изготовленные из сталей 20Х, 12ХН3А, 18ХНВА, ТХ15, Х12Ф1.

Детали простой конфигурации обрабатывают холодом непосредственно после закалки. Для деталей сложной конфигурации во избежание трещин обработке холодом подвергают закаленную и отпущенную сталь. Эффективность обработки при отрицательной температуре зависит от интервала времени между закалкой и низкотемпературным отпуском. Допустимая продолжительность выдержки закаленных деталей при температуре окружающей среды до обработки холодом для сталей 12ХН2А и 18Х2Н4МА — 3 ч; для сталей ХГ, ШХ15, Х12Ф1 — 2 ч, для стали 20Х — 30 мин. Обработку холодом ведут при температуре -70°C с выдержкой 1—3 ч на холодильных машинах типа ХКМ-2.

Способы финишной (отделочной) обработки. В технологических процессах обработки основных деталей гидроприводов, имеющих высокую твердость ($HRC\ 58—62$), низкую шероховатость поверхности и повышенные требования к точности геометрической формы (например, неплоскостность 0,005 мм), финишными операциями являются шлифование, хонингование и доводка.

Шлифование применяют как окончательную или как предварительную операцию перед последующей доводкой. Наиболее распространены следующие способы шлифования:

- наружное круглое с продольными и поперечными подачами;
- бесцентровое с продольной и поперечной подачами;
- плоское шлифование периферией и, реже, торцом круга;
- внутреннее;
- суперфиниширование.

Минимальные припуски на шлифование до шероховатости назначают от 0,2 до 0,5 мм, в зависимости от обрабатываемого размера. Припуск для тонкого шлифования не должен превышать соответственно 0,03—0,04 мм.

При выборе режима шлифования и оптимальной характеристики шлифовального круга учитывают материал, размеры и формы шлифуемой детали, длину и площадь контакта круг – деталь, вид шлифования и оборудования, требуемую точность.

Неправильный выбор режимов приводит к схватыванию абразивных зерен шлифовального круга с обрабатываемым металлом, что вызывает брак детали.

К особенностям тонкого шлифования деталей гидропривода относится также выхаживание, т.е. продолжение обработки с прекращением поперечной подачи. При этом срезание стружки постепенно прекращается, шероховатость поверхности снижается, а твердость поверхности и точность обработки увеличивается.

Хонингование применяют главным образом для предварительной обработки малых глубоких прецизионных отверстий корпусов гидроаппаратуры. При изготовлении гильз гидроцилиндров в настоящее время хонингование в качестве финишного процесса как правило, не применяют, оно заменено раскатыванием.

Доводка выполняется в среде смазки с помощью мелкозернистого свободного абразивного порошка. Эта операция, как завершающая, включается в технологический процесс, изготовления всех прецизионных деталей гидропривода для стальных и чугунных пар (поршней, золотников, пластин,

распределителей и т. д.). Доводка обеспечивает получение шероховатости поверхности в пределах 13—14-го классов чистоты и точные геометрические размеры детали. Доведенные детали, как правило, не взаимозаменяемы. Доводка ведется при малых скоростях и при переменном движении заготовки относительно доводочного инструмента, называемого притиром. Этим обеспечивается неповторяемость траекторий абразивных зерен, производящих резание при доводке, а следовательно, и снижение шероховатости поверхности. При использовании специальных доводочных станков рабочее движение представляет собой сложное движение, состоящее из возвратно-поступательного, вращательного и скользящего. В зависимости от требуемой точности и шероховатости поверхности (от степени зернистости применяемых порошков) процесс доводки разделяют на предварительный и окончательный. Окончательная доводка близка к полированию, абразивные зерна снимают только слой окислов, не затрагивая основного материала.

Доводку производят на притирах из чугуна, алюминия, красной меди, мягкой стали и стекла. Абразивные порошки, наносимые на притир, бывают двух видов: твердые (на основе карбида бора, кремния и белого электрокорунда) и мягкие (на основе окиси железа и окиси хрома).

Очистка от технологических загрязнений. Технологические загрязнения, неизбежные в процессе производства, представляют собой мельчайшие Металлические частицы в виде стружки, осколков острых кромок и заусенцев, остатков абразивной пыли и пасты, продуктов засорения в результате хранения, транспортирования, сборки и т. д.

Распространенными видами очистки являются очистка от свежего абразива, отмочка, мойка, ультразвуковая промывка. Детали очищают от остатков свежей абразивной пыли сразу после окончательной доводки. Обдувка воздухом не влияет на степень очистки поверхности, но зато активизирует общую засоренность на участке.

Отмочку производят с целью размягчить остатки паст и другие загрязнения, что способствует более эффективной очистке при последующих операциях. Детали отмачивают в керосиновой ванне при температуре 60—70° С в течение 30—45 мин.,. Отмоченные детали моют в специальных машинах. Для мойки используют жидкости типа ОП-6, а также 20%-ный содовый раствор или уайт-спирит. Мойку производят с помощью сопел-гидропоршней, которые вставляются внутрь детали и имеют на боковых поверхностях отверстия для выхода моющей жидкости. Мойку, как правило осуществляют в 2 или 3 этапа.

Широкое распространение в производстве гидропривода получила ультразвуковая промывка. Она основана на кавитации жидкости под воздействием ультразвуковых колебаний. В местах разрыва струи образуются пузырьки, наполненные парами жидкости и растворенными в ней газами, которые разрываясь, производят очищающее действие.

ЧАСТЬ 2. ОСНОВЫ ПРОТОТИПИРОВАНИЯ

1.1. Общие термины

Сейчас очень важно представить новые продукты на рынок как можно быстрее, но для этого требуется сделать много шагов, выполнить множество процессов. Дизайн изделия, его тестирование, производство, оценка рынка — все это надо спрессовать и по времени, и по материальным затратам. Эффективно использовать имеющиеся ресурсы можно, только разрабатывая новые продукты и подходы. Одним из таких подходов является быстрое прототипирование.

Быстрое прототипирование (rapid prototyping in additive manufacturing) - применение аддитивного производства, направленное на снижение времени для производства прототипов.

Аддитивное производство (additive manufacturing) - процесс изготовления деталей, который основан на создании физического объекта по электронной геометрической модели путем добавления материала, как правило, слой за слоем, в отличие от вычитающего производства (механической обработки) и традиционного формообразующего производства (литья, штамповки).

Прототип (prototype) — это вид изделия, получаемый одношаговым или многошаговым процессом и являющийся опытным образцом или рабочей моделью, который служит для предварительной оценки характеристик, дизайна или свойств изделия.

И как следствие, прототипирование — это процесс создания прототипов. Он начинается с выполнения компьютерной программы для построения реального (функционального) прототипа. Прототип характеризуют три важных аспекта.

1. Сборка прототипа выполняется из частей или компонентов.
2. Прототип может быть различным — от виртуального до физического.
3. Степень аппроксимации прототипа — от очень расплывчатого до идеально точной копии.

Сборка прототипа подразумевает создание конечного продукта из частей. Законченный прототип (модель) не полностью, но в основном характеризует

продукт. Это нужно, например, для группы людей, которые оценивают его внешний вид, какие-то функциональные качества или последующие операции с ним. Например, на прототипе можно тестировать угол наклона спинки офисного стула, чтобы снизить риск искривления позвоночника в результате продолжительного сидения. Прототип фрагмента черепа позволяет криминалистам(археологам) судить, каков был при жизни его владелец, а хирургам — спланировать ход операции по его восстановлению.

Другой аспект — как прототип будет произведен. Виртуальный прототип — это некая математическая модель, последовательность операции по изготовлению физического прототипа. Виртуальный прототип можно изучать еще на стадии дизайна и судить о его качествах, базируясь на законах физики. Например, визуализация течения потоков воздуха при обтекании крыла позволит оценить его подъемную силу, особенности поведения данной формы крыла на до- и сверхзвуковых потоках. Когда реальный прототип очень большой и дорогой в изготовлении, виртуальный прототип — хороший помощник. Макет сотового телефона очень помогает конструктору оценить, как он ложится в руку, привлекателен ли эстетически.

Третий аспект — степень точности воспроизведения прототипа. Например, модель может лишь отдаленно напоминать реальный продукт, но позволит оценить его геометрические характеристики. Или, наоборот, грубая модель может внешне точно копировать реальный продукт, но быть изготовленной из различных материалов, чтобы оценить их привлекательность и функциональность. Ну и наконец, точная копия продукта, безусловно, нужна на финальной стадии выпуска его в производство. Быстрое прототипирование обычно позволяет воспроизвести физический прототип довольно близким к реальному изделию. Многофункциональность и возможность сборки прототипа из отдельных частей дают ему неоспоримое преимущество перед конструкторским чертежом.

1.2. Преимущества и проблемы реализации аддитивных технологий

В настоящее время скорость и стоимость внедрения в производство новой техники напрямую зависят от эффективности работы каждой технологической цепочки на всех этапах от конструирования и проектирования изделия до создания его первоначального макета в натуральную величину. Резко ускорить прохождение этих этапов помогают внедряющиеся во всем мире высокотехнологичные методы трехмерного компьютерного моделирования и создания твердых копий деталей машин.

Актуальной является также задача сведения комплекса типовых процессов в единый технологический процесс (установку), позволяющий в сжатые сроки (за несколько часов вместо нескольких месяцев) изготовить прототипы инструментов и изделий с любой степенью сложности и точности внутренней или внешней поверхности без предварительных затрат на подготовку оснастки. Не менее нужным является умение изготавливать единичные копии моделей сложной формы в таких сферах человеческой деятельности, как протезирование или реставрационные работы.

Таким образом необходимо чтобы новые изделия (продукты) были как можно более быстро и дешево разработаны, произведены и представлены на рынок. Стандартные многоступенчатые процедуры конструирования и проектирования не способны обеспечить выполнение этих требований современной динамики производства. Поэтому процессы проектирования и производства должны быть непосредственно интегрированы в процедуру обработки. Речь идет об объединении уже хорошо развитых систем автоматического проектирования (САПР) (англ. Computer Aid Design (CAD)), реализованных на примере профессиональных пакетов программ типа КОМПАС-3D, с новой высокой технологией послойного синтеза объемных изделий и деталей машин.

В основе своей процессы быстрого прототипирования состоят из следующих шагов:

- подготовка геометрического образа трехмерного объекта,
- формирование поперечных сечений изготавливаемого объекта,

- послойное наложение этих сечений в процессе синтеза,
- комбинирование слоев из конкретного материала.

Таким образом, чтобы создать физический объект в ходе этих процессов, требуются данные лишь о поперечных сечениях. Кроме того, исчезают следующие проблемы, часто возникающие в связи с другими производственными процессами:

- Отпадает необходимость в топологическом проектировании и распознавании по элементам, поскольку планирование процессов, в ходе которого используется эта информация, не требуется. Достаточно иметь трехмерную поверхностную или твердотельную модель детали, на основе которой будут сгенерированы данные о поперечных сечениях.

- Не требуется определять геометрию пустого пространства, поскольку в ходе процессов быстрого прототипирования материал добавляется, а не снимается, как это делается на станке с ЧПУ.

- Не нужно определять несколько наборов оборудования или сложные последовательности обработки материала, поскольку деталь изготавливается за один прием.

- Нет необходимости рассматривать конструкции зажимов и креплений.

- Не нужно проектировать и изготавливать формы и штампы.

Технология быстрого прототипирования нужна:

- для проверки на выполнимость новых понятий (концепций) проекта;
- оценки пригодности/работоспособности разрабатываемых сложных механизмов;
- возможности параллельной разработки нового изделия (программы) в нескольких направлениях;
- реализации высокой точности, скорости и воспроизводимости копий деталей и машин;
- возможности прямого использования этих копий в тестовых испытаниях;
- изготовления эталон-моделей и мастер-форм в технологии литья.

Совмещение CAD- и технологий быстрого прототипирования предлагает инструментальные средства и процедуры, которые превосходно подходят для быстрого и эффективного в стоимостном плане преобразования виртуальных (компьютерных) образов (изделий) в рыночные продукты.

Выгоды использования технологии быстрого прототипирования:

- уменьшение time-to-market (время до выхода продукта на рынок);
- сокращение ошибок и проблем уже на стадии проектирования;
- высокая конкурентоспособность;
- улучшенное качественное управление производством;
- авторская защита понятий (концепций) проекта.

Недостатки аддитивных технологий:

- *Толщина слоя:* 0,02 мм — 0,1 мм.
- *Точность воспроизведения:* толщина слоев влияет на точность

воспроизведения. Хорошим считается результат порядка нескольких миллиметров.

Воспроизводимость изделий обычно хорошая, но усадка присутствует практически всегда, составляет десятки микрометров и должна учитываться. Многие аддитивные технологии требуют наличия поддержек, что увеличивает время изготовления, требует постопераций по их удалению и ухудшает шероховатость поверхности.

- *Размеры изделий:* в основном ограничены размерами камеры синтеза.
- *Материалы:* для каждой технологии их спектр ограничен.
- *Прочность изделия:* послойное построение изделий предполагает

ухудшение прочности в направлении роста.

- *Скорость изготовления:* от нескольких часов до нескольких дней.
- *Стоимость изготовления.*

- *Системная интеграция:* установки до настоящего времени работают

независимо друг от друга, хотя большинство связаны посредством Интернета с CAD - станциями. Уход за установкой и постоперации все еще требуют большого количества ручного труда.

1.3. Классификация методов, систем и установок аддитивных технологий

Организация ASTM, занимающаяся разработкой отраслевых стандартов, разделяет аддитивные технологии на семь категорий.

1. **Material Extrusion** - выдавливание материала. В точку построения по подогретому экструдеру подаётся пастообразный материал, представляющий собой смесь связующего и металлического порошка. Построенная сырая модель помещается в печь для того, чтобы удалить связующее и спечь порошок, так же, как это происходит в традиционных технологиях. Эта аддитивная технология реализована под марками MJS (Multiphase Jet Solidification - многофазное отверждение струи), FDM (Fused Deposition Modeling - моделирование методом послойного наплавления), FFF (Fused Filament Fabrication - производство способом наплавления нитей).

2. **Material Jetting** - разбрызгивание материала. Например, в технологии Polyjet воск или фотополимер по многоструйной головке подается в точку построения. Эта аддитивная технология также называется Multi Jetting Material.

3. **Binder Jetting** - разбрызгивание связующего. Например, струйные Ink-Jet-технологии впрыскивания в зону построения не модельного материала, а связующего реагента (технология аддитивного производства ExOne).

4. **Sheet Lamination** — соединение листовых материалов, представляющих собой полимерную плёнку, металлическую фольгу, листы бумаги и др. Используется, например, в технологии ультразвукового аддитивного производства Fabrisonic. Тонкие пластины из металла сваривают ультразвуком, после чего излишки металла удаляют фрезерованием. Аддитивная технология здесь применяется в сочетании с субтрактивной.

5. **Vat Photopolymerization** - фотополимеризация в ванне. Технология использует жидкие модельные материалы - фотополимерные смолы. Примером могут служить SLA-технология компании 3D Systems и DLP-технология компаний Envisiontec, Digital Light Proccession.

6. ***Powder Bed Fusion*** - расплавление материала в заранее сформированном слое или последовательное формирование слоев порошковых строительных материалов и выборочное (селективное) спекание частиц строительного материала. В категорию Powder Bed Fusion входит многочисленная группа SLS-технологий, в которых в качестве источника тепла применяется лазер. К этой же категории относят такие технологии, как Arcam-технология, использующая электронный луч, и технология SHS (Selective Heat Sintering), в которой источником тепла являются ТЭНы.

7. ***Directed energy deposition*** - прямое подведение энергии в место построения. Материал и энергия для его плавления поступают в точку построения одновременно. Рабочий орган — головка, оснащённая системой подвода энергии и материала. Энергия поступает в виде сконцентрированного пучка электронов (компания Sciaky) или луча лазера (компании POM, Optomes). Иногда головка устанавливается на «руке» робота.

В некоторых классификациях аддитивные технологии подразделяют по следующим методам:

1) формирования слоя (рис. 1.1);



Рисунок 1.1 - Классификация аддитивных технологий по методу формирования слоя: а - Bed Deposition; б - Direct Deposition

2) фиксации слоя (рис. 1.2);

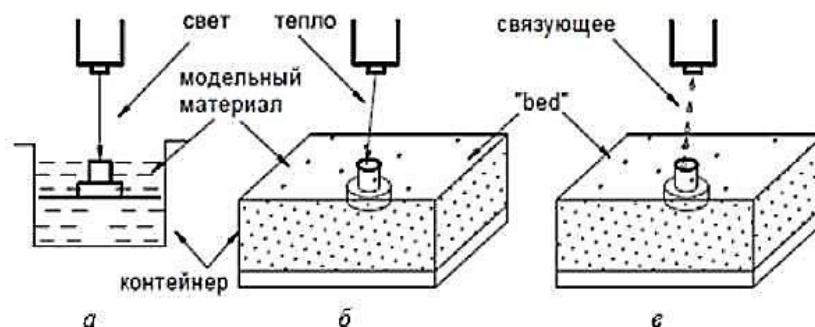


Рисунок 1.2 - Классификация аддитивных технологий по методам фиксации слоя: *а* — фотополимеризацией; *б* - сплавлением; *в* - склеиванием

3) по применяемым строительным (модельным) материалам:

- жидким - фотополимеры (акриловые, эпоксидные и др.)
- сыпучим (порошки): полимеры - полиамид, полистирол, полиметилметаакрилат (ПММА), воск и др.; керамика - SiO_2 , ZrO_2 , Al_2O_3 и др.; металлы - Al, Cu, Ti-Al, Ti-Al-V, Ag, Au, Co-Cr, Inconel, Ni-Fe, инструментальные стали и др.; композиционные материалы, например, металлокерамика Co-WC;
- нитевидные, прутковые: полимеры - АБС, полиуретан и др.; металлы (аналогичные порошковым);
- листовые, пленочные: полимеры - ПВХ-пленки и др.; металлы - металлическая фольга, листовой прокат.

4) по ключевым технологиям (лазерным, нелазерным) (рис. 1.3);

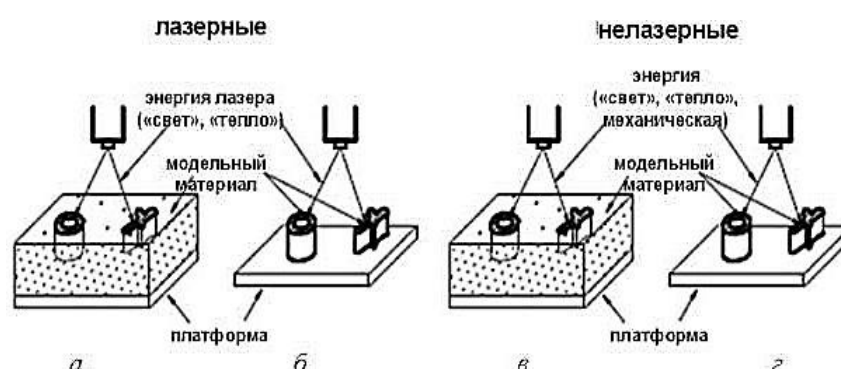


Рисунок 1.3 - Классификация аддитивных технологий по ключевым технологиям: *а, в* - Bed Deposition; *б, г* - Direct Deposition

5) по методам подвода энергии для фиксации слоя построения:

- с помощью теплового воздействия,
- облучения ультрафиолетовым или видимым светом,
- посредством связующего состава и т.д.

С развитием технологических методов и оборудования, применяемого для производства деталей с помощью аддитивных технологий, приведенные классификации, очевидно, будут расширяться и дополняться. На рис. 1.4 приведена более подробная классификация аддитивных технологий с учетом физического состояния и механизма нанесения материала в процессе формирования детали.

Тем не менее, из всех перечисленных классификационных признаков следует выделить, пожалуй, первый, принципиально отличающий два вида аддитивных технологий, определяемых как Bed Deposition и Direct Deposition.

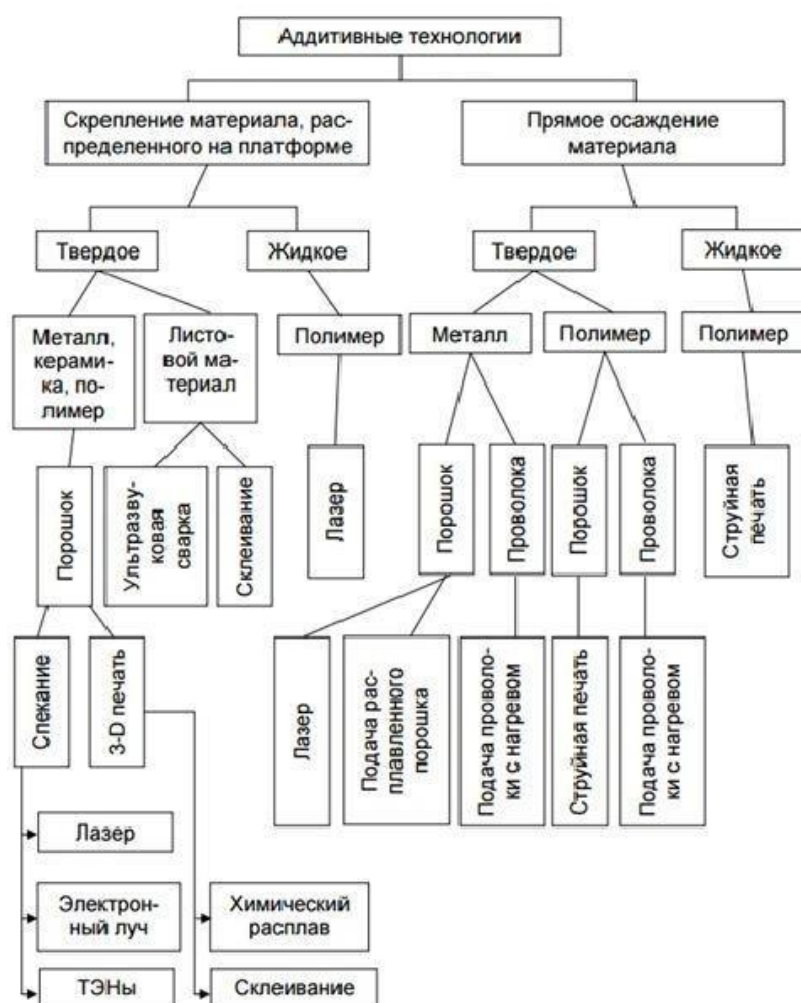


Рисунок 1.4 - Классификация аддитивных технологий с учетом физического состояния и механизма нанесения материала в процессе формирования детали

1.4. Основы автоматизации процесса послойного создания изделия

Сущность большинства применяемых технологий «прямого выращивания» заключается в быстром переводе тонкого слоя жидкого или плавкого порошкообразного сырья в твердое состояние и послойном синтезе изделия. Такой перевод осуществляется обычно лазерным излучением или плазменными потоками, при этом движение луча или концентрированного потока управляется по программе. В качестве сырья в настоящее время при послойном синтезе широко используются металлические порошки и порошки керамики с металлическими связующими.

Изучение сущности и особенностей методов получения деталей машин без формообразующей оснастки, сравнение их преимуществ и недостатков, определение областей рационального применения синтезируемых изделий позволили классифицировать процессы оперативного макетирования и производства и выделить основные направления развития методов послойного синтеза деталей машин.

Традиционные технологии послойного синтеза деталей реализуются только для определенных материалов и формируют плоские поверхностные слои. Перспективным представляется использование новых конструкционных материалов, в том числе композиционных, слоистых, с формируемым градиентом свойств. Это требует применения новых технологий формообразования слоев и сборки изделий, использующих для изменения свойств материала различные концентрированные источники энергии, что в свою очередь ставит задачи распределения потоков энергии не только по заданному контуру или поверхности, но по глубине слоя.

В результате при проектировании технологий послойного синтеза с сопутствующей сборкой изделий применяются как технологии получения деталей из конструкционных материалов, использующие концентрированные потоки энергии, так и методы автоматизации процессов быстрого прототипирования и производства изделий.

Различия в автоматизации процессов послойного синтеза изделий определяются применяемыми рабочими органами установок для обработки, транспортировки и контроля. Для технологий, использующих концентрированные потоки энергии, алгоритмы построения изделия зависят от рабочего цикла процесса, последующей сборки и окончательной обработки изделий.

Исследование технологий обработки слоев концентрированными потоками энергии и сопутствующей сборкой изделий показало:

- 1) процессы оперативного макетирования и производства требуют разработки как интенсивных технологий получения масштабных макетов, легко разрушаемых прототипов, деталей машин и конструкций, так и информационных технологий их моделирования;
- 2) перспективными являются процессы прямого создания не только геометрической формы изделия, но и его композиционного материала путем последовательного формирования различных слоев и управления их свойствами с сопутствующей сборкой изделия;
- 3) информационные технологии должны моделировать не только изделие и процесс его получения, но и структуру композиционного материала совместно с процессом его послойного синтеза.

Анализ сущности и особенностей традиционных методов получения изделий без формообразующей оснастки стереолитографией (Stereolithography Application -SLA), послойным формированием моделей из листового материала (Laminated Object Manufacturing - LOM), селективным лазерным спеканием (Selective Laser Sintering - SLS), послойной заливкой экструдированным расплавом (Fused Deposition Modeling - FDM) и другими процессами позволил рассмотреть частные и выделить общие принципы построения технологий послойного синтеза (рис. 1.5).

Так, для *SLA-процесса* рабочий цикл состоит из следующих переходов:

- 1) опускания платформы с моделью в ванну с жидким фотополимером;
- 2) выравнивания толщины пленки на поверхности модели или платформы;
- 3) отверждения слоя сфокусированным ультрафиолетовым излучением;

- 4) повторения рабочего цикла до обработки последнего слоя;
- 5) подъема платформы и извлечения модели. Для

LOM-процесса цикл включает:

- 1) раскатывание листового материала заготовки;
- 2) разравнивание листового материала нагретым валиком;
- 3) раскрой лазерным лучом листового материала;
- 4) повторение рабочего цикла до обработки последнего слоя;
- 5) сварку, спекание, склеивание слоев.

В *SLS-процессе* цикл содержит следующие переходы:

- 1) создание тонкого слоя из порошкового материала на рабочем столе;
 - 2) разравнивание слоя порошкового материала разогретым валиком;
 - 3) обработку лазером слоя порошка в текущем сечении материала;
 - 4) повторение рабочего цикла до обработки последнего слоя;
 - 5) удаление детали из зоны обработки;
- б) стряхивание свободного порошка. При

FDM-процессе рабочий цикл имеет:

- 1) подогрев материала в экструзионной головке до температуры плавления;
- 2) дозированную подачу разогретого материала в зону обработки;
- 3) нанесение материала на предыдущий слой или на подложку.

При обработке последнего слоя у всех методов рабочий цикл заканчивается. Для повышения качества поверхности формируемого изделия и снижения длительности процессов прототипирования и производства (LOM, FDM, SLA, SLS и др.) предложены алгоритмы рационального разбиения на слои, с учетом оценки качества поверхности изделия сложной формы (рис. 1.6). При сравнении алгоритмов различных методов послойного синтеза и сборки возможен выбор наиболее рациональных процессов макетирования и производства конкретного изделия.

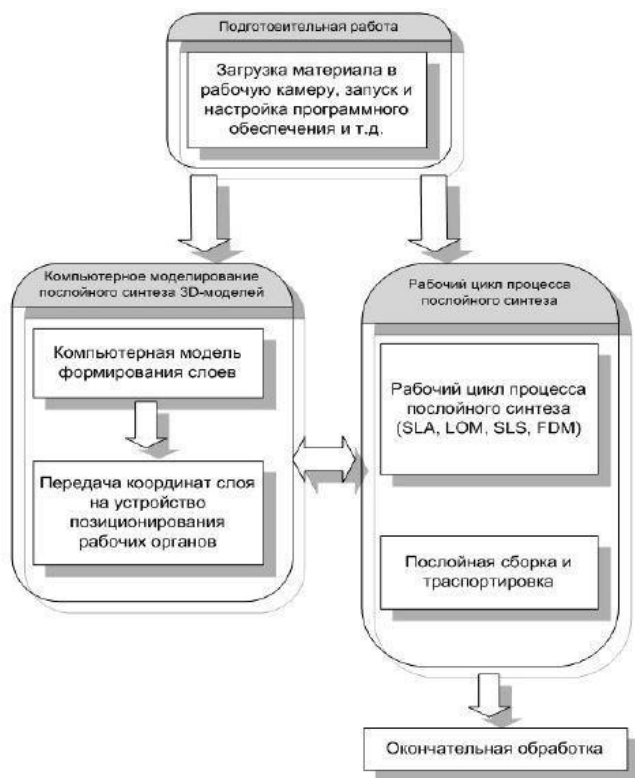


Рисунок 1.5 - Основные этапы методов послойного синтеза изделий



Рисунок 1.6 - Блок-схема алгоритмов разбиения на слои и сборки изделия

алгоритмов разбиения на слои и сборки изделия состоит из 7 блоков:

1. Компьютерная модель изделия, включающая его геометрическое описание, определение критериев оптимальности конструкции путем выявления

«мертвых» зон для формообразующих потоков энергии или вещества, в которых достижение требуемых параметров качества проблематично, и поэтому необходимо изменение элементов конструкций.

2. Выделение слоя максимальной возможной толщины h_{\max} с проверкой и корректировкой слоя, если он является последним. В LOM- и FDM-процессах используется разбивка на слои одинаковой толщины в зависимости от толщины листового материала (LOM) или размеров отверстия сопла и удельного расхода разогретого материала на подачу экструзионной головки (FDM). При этом в LOM-процессе для слоев одинаковой толщины используются разные углы наклона кромок, вписанных в геометрический профиль, а в FDM-процессе разные углы наклона сопла экструзионной головки (рис. 1.7, а). При использовании SLA- и SLS-процессов, а также FDM-процесса - толщина может быть неравномерна для различных слоев (рис. 1.7, б). Разбивка компьютерной модели изделия на слои непосредственно влияет на геометрические параметры качества поверхности (R_{\max} , R_z , R_a и др.).

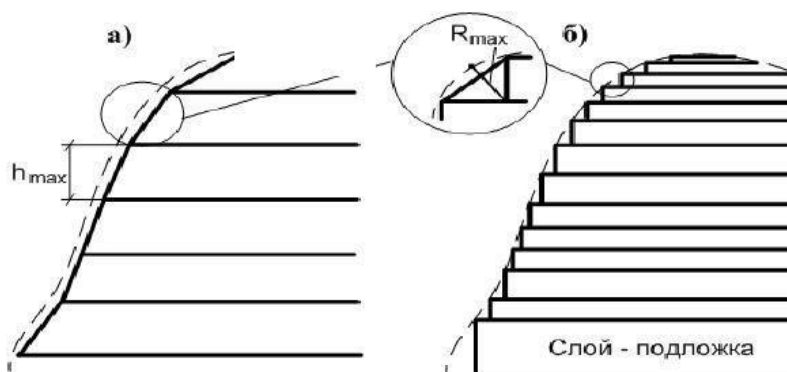


Рисунок 1.7 - Схема разбивки изделия на слои: для LOM- и FDM-процессов (а); для SLA- и SLS-процессов (б)

3. Оценка рельефа поверхности R_{\max} по периметру слоя осуществляется путем проверки геометрических параметров качества, получаемых в текущем слое (рис. 1.7). При неудовлетворительной оценке процесс корректируется.

4. Корректировка путем изменения толщины слоя с использованием коэффициентов понижения α производится при недопустимых параметрах рельефа

поверхности (например: $\alpha = 0,7 \dots 0,9$ для SLA- и SLS-процессов; $\alpha = 3/4, 1/2, 1/4, \dots$ - для LOM- и FDM-процессов).

5. Присоединение слоя к предыдущему или подложке сопровождается проверкой сцепления текущего слоя с предыдущим по размеру площади перекрытия слоев, а также по размеру реальной поверхности контакта (например, для пористых материалов).

6. Проверка завершения синтеза изделия заканчивает цикл послойного «выращивания» и подсчитывает общее количество слоев изделия.

7. Верификация модели - завершающий этап компьютерного сопоставления «выращенной» модели с исходной.

Расчет общего количества слоев (блок 6) позволяет оценить эффективность процесса, выбираемого для послойного синтеза изделия заданной формы одним из предлагаемых методов (LOM, FDM, SLA, SLS и др.).

Верификация модели полученной послойным синтезом (блок 7) дает возможность проверить удовлетворение требований к геометрическим параметрам качества сложнопрофильных поверхностей, заложенных в компьютерную модель изделия (блок 1).

Регулирование толщины слоя (блок 4) и угла «разделки» его кромок (блок 2) позволяет управлять геометрическими параметрами качества сложнопрофильной поверхности (блок 3) и вносить корректировки в начальный выбор методов оперативного макетирования и производства.

Проверка сцепления слоев изделия, в ряде случаев связана с использованием различных материалов для соседних слоев, и требует помимо определения площади их перекрытия (блок 5), также анализа рельефа плоской или сложнопрофильной поверхности.

1.5. Обобщенная схема операций при послойном создании изделия

Аддитивное производство подразумевает, что основными принципами технологии является генерация модели средствами трехмерных САПР и последующее прямое создание изделия. Технология аддитивного производства значительно упрощает процесс производства сложных трехмерных объектов по компьютерным данным. Традиционные процессы производства требуют детального анализа геометрии изделия, определения порядка (последовательности) производства его частей, а главное, подготовительной оснастки и пр. Напротив, аддитивное производство нужны только основные данные о геометрии изделия и понимание того, как работает машина для быстрого прототипирования и какие материалы будут использованы.

Знание о том, как функционирует АП, имеет в виду описание последовательности этапов создания изделия, включая следующие принципиальные вопросы: как добавляется материал в слои, как каждое сечение изделия может быть получено на основе компьютерных данных об изделии и т. п. Обычно в физическом мире каждый слой должен иметь конечную толщину, так что результат должен соответствовать оригинальным данным. Чем тоньше слои, тем ближе изделие к оригиналу. Точность воспроизведения конечной детали, свойства материала, из которого она сделана, будут определять механические и эксплуатационные свойства изделия. Толщина слоев влияет на скорость производства детали и то, потребуются ли так называемые постпроцессы. Размер рабочего объема машины для быстрого прототипирования влияет на количество деталей, которые можно создать одновременно, а все вышеперечисленное влияет на конечную стоимость изделия и процесса.

Обобщенный процесс аддитивного производства включает:

1.5.1. Трехмерное моделирование средствами САПР

Изначально должен быть выбран пакет САПР, в котором разрабатываемое трехмерное изделие будет смоделировано. Конструктор может использовать примитивы, существующие в указанных САПР, либо чертить изделие с нуля. Однако на выходе должен быть создан CAD-файл STL-формата (от

STereoLithography — названия первого коммерчески успешного метода быстрого прототипирования). STL-файл описывает изделие в понятной машине форме.

1.5.2. Конвертация данных и их передача

Различные пакеты CAD используют разные алгоритмы для того, чтобы представить твердые предметы. Для того чтобы установить последовательность и единообразие, формат STL-файла был принят в качестве стандарта в индустрии быстрого прототипирования. В STL-формате данные о трехмерном объекте и форме его трехмерной поверхности представляются как агрегат плоскостных треугольников и содержат координаты вершин и вектора нормали к их поверхности. Так как STL-формат использует плоскостные элементы, он не может представить криволинейные поверхности точно. С увеличением числа треугольников улучшается точность воспроизведения, но при этом увеличивается размер файла данных. Большие сложные массивы данных требуют больше времени для предварительной обработки и построения, поэтому конструктор должен сбалансировать точность будущего изделия с управляемостью данных о нем, для того чтобы STL-архив оставался работоспособным. Поскольку STL-формат общепризнан, процесс работы с ним идентичен для всех методов быстрого прототипирования.

Конвертация данных и их передача в машинный блок установки для быстрого прототипирования подразумевают также процесс разделения на слои STL-данных об изделии. На этом шаг предварительной подготовки STL-архива данных об трехмерном изделии должен быть представлен в виде отдельных слоев. Существует несколько программ, позволяющих потребителю отрегулировать размер, положение и ориентацию модели.

Ориентация при построении (выращивании) изделия важна по нескольким причинам. Во-первых, свойства прототипов могут изменяться от одного направления к другому. Например, обычно прототипы в вертикальном направлении Z менее точны и не так устойчивы, как в плоскости X- Y. Во-вторых, ориентация изделия часто обуславливает количество времени, необходимое для построения модели. Если рабочее пространство машины для быстрого

прототипирования достаточно для выращивания сразу нескольких изделий, разумно расположить их в камере для выращивания так, чтобы одновременно создать максимальное количество моделей. Устанавливая самый короткий размер в направлении Z, можно уменьшить число слоев и таким образом сократить время построения. Средства предпроцессингового программирования могут «нарезать» слои STL-модели толщиной от 0,01 до 0,7 мм в зависимости от метода построения. Программа может также воспроизвести вспомогательную структуру, для того чтобы поддержать модель во время ее выращивания. Каждый производитель машин для быстрого прототипирования разрабатывает и поставляет собственные средства программирования для предпроцессирования, что усложняет ход согласования данных, если возникает необходимость воссоздать (повторить) изделие на другой машине (в другом процессе быстрого прототипирования).

1.5.3. Проверка и подготовка установки к работе

После запуска и подготовки машины быстрого прототипирования к работе вне ее надо установить параметры источника энергии. Следует также выбрать и загрузить исходный материал, предусмотреть связанные с ним условия работы (связи, допуски, поддержки), указать толщину слоя приращения, выбрать место изготовления в рабочей камере, установить времена задержки и пр.

1.5.4. Послойное построение изделия

На этом шаге будет фактически выращена конструкция изделия. Используя разные подходы (возможно, сразу несколько методик), машины быстрого прототипирования слой за слоем строят (или удаляют!) изделие из полимеров, керамики, металла, бумаги, порошкового материала и т. п. Большинство машин могут работать практически автономно. Время от времени требуется мониторинг работы машины, чтобы гарантировать отсутствие ошибок при синтезе изделия, энергетических или программных сбоев.

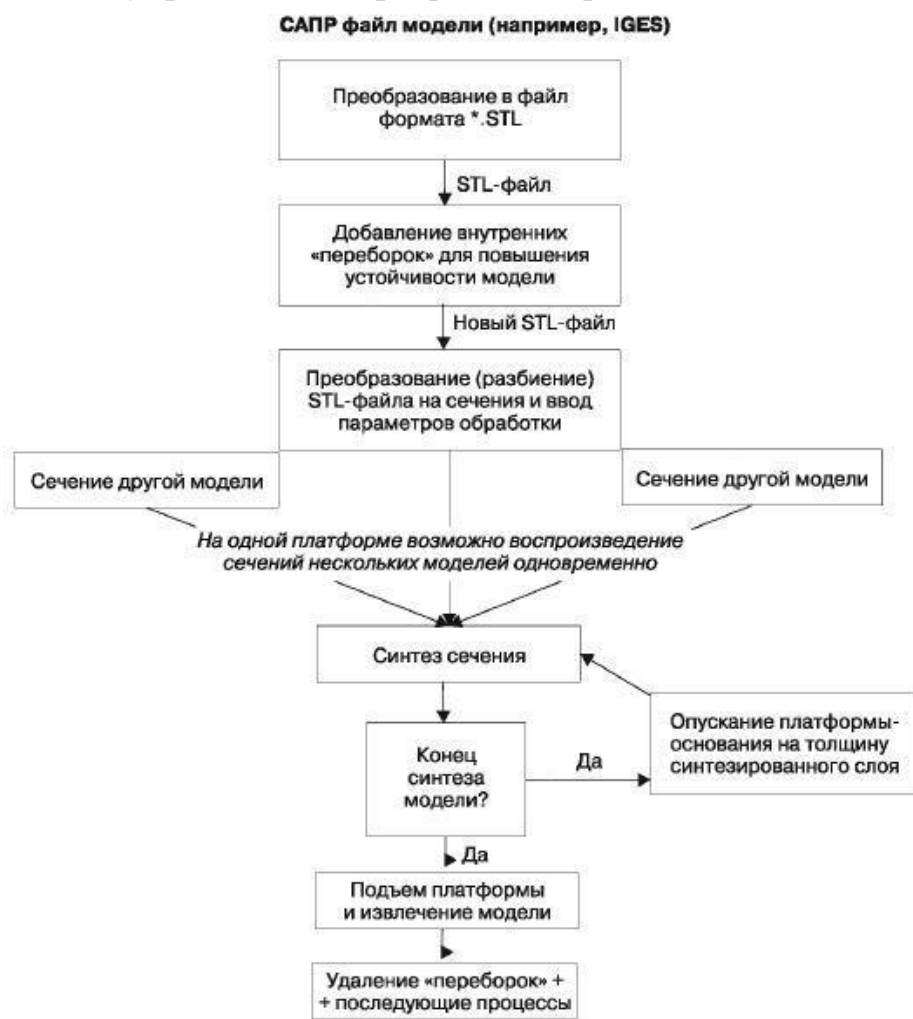
1.5.5. Удаление поддержек и другие постпроцессы

После завершения синтеза деталь должна быть извлечена из рабочего объема установки. Возможно, это потребует осторожного понижения температуры в ней до температуры окружающей среды. Некоторым фоточувствительным материалам

нужна полная дополнительная засветка готового изделия для окончательного его отверждения. Прототипы могут требовать также небольшой чистки, удаления поддержек и поверхностного покрытия. Зашкурить, герметизировать и/или покрасить модель, чтобы улучшить ее потребительские свойства, — это традиционные пост-процессинговые операции. Изделие готово к использованию. Возможно, потребуется операция сборки отдельно выращенных деталей.

На рис. 1.8 показана обобщенная управляющая программа работы с STL- файлом, где содержатся сведения обо всех сечениях данной модели, всех ее составных частях (здесь может быть использовано несколько файлов), допустимых отклонениях по уровню на один слой порошковой композиции при опускании платформы.

Рисунок 1.8 - Блок-схема управляющей программы обработки с STL-



файлом

1.6. Специфика работы на разных аддитивных установках

Разработчики систем быстрого прототипирования в последнее время ориентируются на выпуск недорогих и быстродействующих машин, снижая стоимость и увеличивая объем рабочей камеры.

Область применения быстрого прототипирования определяется достижимой точностью изготовления детали и механическими свойствами используемого материала — растяжимостью, твердостью и прочностью на разрыв.

Рассмотрим классификацию оборудования для быстрого прототипирования по уровню применяемости.

Потребительский уровень. Тип принтеров, который предназначен, в основном, для личного использования. Поставляется в виде конструктора, либо в сборе. Так как платформа у них, в основном, одна и та же, их характеристики тоже весьма схожи.

Данные принтеры оборудованы простым и понятным интерфейсом, печатают, как правило, ABS и PLA пластиком и предназначены для печати изделий средней сложности и точности.

Персональный уровень. Пограничный класс принтеров, который является домашним, но в то же время относится к нижней ступени промышленных принтеров для бизнеса. Данные принтеры обладают более высоким качеством и точностью печати, которые присущи профессиональным 3D-принтерам.

Работа с принтерами этого класса сводится к загрузке образа и нажатию кнопки «пуск». В то же время это ограничивает возможности в плане различных дополнительных параметров печати. Персональные принтеры пригодны для использования в офисах, однако шумность и высокий температурный режим некоторых моделей предполагает их размещение на некотором удалении от рабочей зоны.

Профессиональный. Системы этого класса включают в себя все достижения и возможности доступные индустрии. Предназначение профессиональных систем может быть очень разным, от прототипирования до полномасштабного

производства, что в свою очередь делает их отличным вариантом как для крупного бизнеса, так и для высокотехнологичных компаний с малым штатом сотрудников. Данные принтеры, ввиду большого количества режимов и дополнительных опций, уже требуют определенных навыков для работы с ними, поэтому безоператора здесь не обойтись. По части рабочего пространства профессиональные 3D-принтеры требуют отдельного помещения с хорошей вентиляцией и с подведенной высоковольтной линией. Профессиональные 3D-принтеры предназначены для печати изделий высокого качества и точности.

Производственный. Машины данного класса являются совокупностью точности и качества профессиональных принтеров, большой площадью печати, высокого уровня автоматизации и контроля процессов. На них, как и на профессиональных установках, можно печатать не только прототипы, но и конечный потребительский продукт.

Для работы на производственных 3D-принтерах необходимы опытные операторы. По части рабочего пространства нужно четко спланировать будущую линию и позаботиться о подводе высоковольтной линии и газовой трубы. На выходе получится высокотехнологичное производство, которое может быстро менять профиль и использовать материалы от ABS пластика до титана.

3D-ручка. 3D-ручка есть не что иное, как ручной экструдер. В роли ЧПУ станка выступает сам пользователь. Основные элементы 3D-ручки: сопло, механизм подачи пластиковой нити, нагревательный элемент, вентилятор для охлаждения верхней части сопла и ручки в целом, микроконтроллер для управления работой вентилятора, механизма подачи и нагревательного элемента. Так как практически все программные функции 3D-принтеров выполняет сам пользователь, 3D-ручки не требуют соединения с компьютером или создания цифровых моделей. Требуется лишь электропитание - как правило, используются обычные блоки питания с преобразователем напряжения 12В. Как и в FDM-принтерах, нагрев сопла занимает несколько минут, после чего ручка готова к печати. Подача материала осуществляется при нажатии соответствующей кнопки. Некоторые модели, оснащаются регулятором скорости печати.

1.7. Пути повышения точности воспроизведения моделей и качества поверхности

Технология, предполагающая послойный принцип построения детали, обеспечивает определенный уровень качества поверхности модели, основным критерием обычно является чистота поверхности. Машина строит модель послойно согласно созданным перед началом построения «сечениям». После завершения построения модель имеет ступенчатую поверхность, а высота ступеньки соответствует шагу построения. Например, при построении модели шара: на полюсе он будет иметь плоскую площадку, шероховатость на участке, близком к полюсу будет максимальной, но, чем ближе к экватору, тем лучше будет качество поверхности (рис. 1.9).

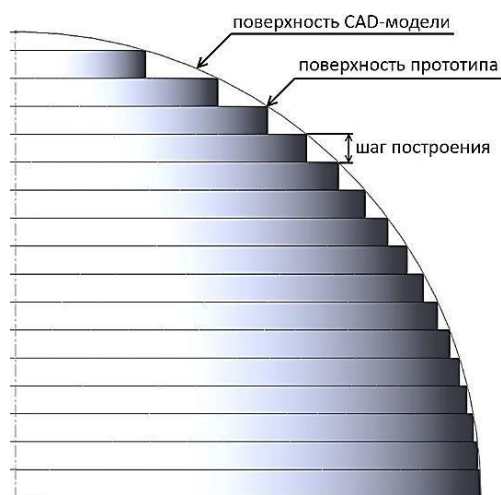


Рисунок 1.9 - Послойный принцип построения модели

Качество поверхности прототипа часто зависит от ориентации модели на рабочей платформе при построении. При построении плоской детали, расположив её горизонтально, можно получить низкую шероховатость горизонтальной поверхности; для получения лучшего качества на боковых поверхностях модель необходимо сориентировать под углом к плоскости платформы.

Важным параметром, определяющим качество поверхности, является качество исходной трёхмерной CAD-модели. Виртуальная модель представляет собой 3D-поверхность в виде замкнутой сетки из треугольников. Шероховатость поверхности напрямую зависит от качества создания сетки (рис. 1.10).

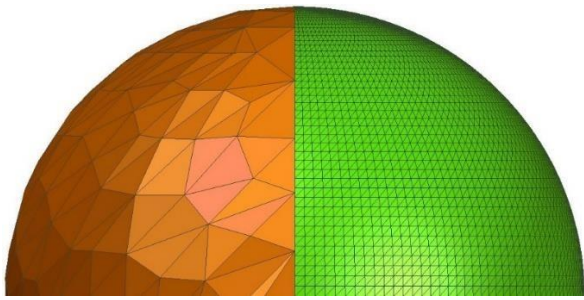
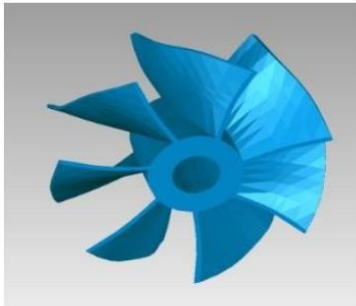
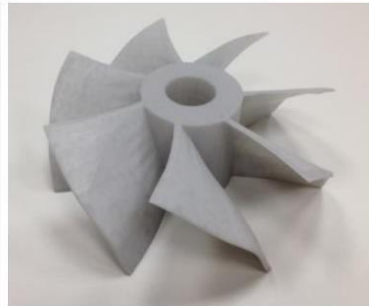


Рисунок 1.10 - Модель шара: слева – низкого качества, справа – высокого

Так, при использовании трёхмерной модели низкого качества макрошероховатость, заложенная в файле, может проявиться при построении физической модели и дать ложное представление о качестве принтера или эффективности выбранной технологии (рис. 1.11).



CAD-модель



SLA-модель



Отливка, сталь

Рисунок 1.11 - Низкое качество CAD-модели обуславливает низкое качество поверхности отливки

Во многих случаях большая или меньшая шероховатость не имеет принципиального значения для потребителя. При необходимости поверхность модели можно улучшить посредством ручной обработки (шлифовки, полировки, окраски, лакировки). Но в ряде случаев это технически затруднительно или может привести к потере точности (геометрии) модели.

Технологии SLS, DLP, Poly-Jet и др., использующие жидкий фотополимер в качестве модельного материала, предполагают наличие так называемых поддерживающих структур – поддержек, на которых закрепляется тело модели при построении (рис. 1.12). Эти поддержки строятся автоматически по специальной

программе и представляют собой тонкие столбики. В зависимости от технологии они строятся из специального легкорастворимого в воде материала (по технологии Poly-Jet компании Objet) или из основного модельного материала (классическая лазерная стереолитография – SLA). После построения поддержки удаляются механически (SLA) или смываются водой (технология Poly-Jet), поэтому одна из поверхностей модели более шероховатая, чем остальные.

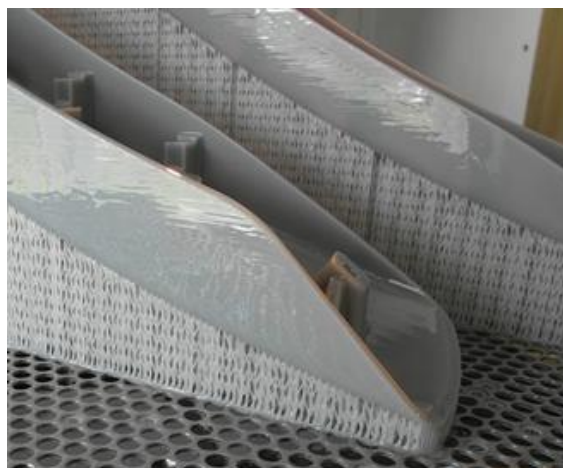


Рисунок 1.12 - SLA-модель с поддерживающими структурами Качество построенной

модели зависит также и от квалификации персонала:

насколько правильно была сориентирована модель на рабочей платформе перед построением, насколько верно был выбран режим генерации поддерживающих структур, насколько качественно был сделан исходный 3D-файл.

В качестве примера в таблице 1.1 приведены результаты сравнительных измерений поверхностей одной и той же детали, построенной на разных машинах. Для большей достоверности измерения проводились на горизонтальных (тип А) и вертикальных (тип В) поверхностях. Измерения только одного вида поверхности может привести к неверному представлению о возможностях машины, поскольку, например, машина, работающая с жидким фотополимером, может построить очень гладкую, почти зеркальную горизонтальную плоскость, но на вертикальной стенке может быть заметная шероховатость.

Таблица 1.1 - Сравнение шероховатостей моделей, полученных различными аддитивными технологиям

Технология	Аддитивная машина	Материал	Профилометр							
			Mahr MarSurf PS1				Zeiss O-inspect 01-422			
			R _a		R _z		R _a		R _z	
			Тип А	Тип В	Тип А	Тип В	Тип А	Тип В	Тип А	Тип В
SLA	Viper Pro 8000	AccuraXtreme	0,08	3,18	0,31	18,5	0,03	3,8	0,54	7,02
		Accura 60	0,13	2,82	0,66	13,9	0,19	2,4	0,5	4,42
		Accura 55	0,1	1,35	0,63	13	0,15	0,4	0,42	4,14
		Accura SI10	1,32	5,17	9,7	7,9	1,93	4,4	7,4	23,2
SLS	Sinterstation HiQ	Dura form PA	10	12,47	50,6	61,7	4,24	7,55	17,1	41,1
		Duraform GF	10,39	9,46	67	51,6	6,36	6,51	30,3	22,7
SLM	SLM 280	AlSi10 Mg	8,12	8,63	43,3	39,1	10,76	3,55	39,2	14,2
DLP	Ultra	SI500	0,53	0,55	3,87	2,26	1,44	1,36	5,4	6,6
Ink-Jet	Invision XT	Visi Jet EX200	2,55	9,38	11,9	46,1	0,91	6,12	3,7	19,5
LOM	SD300	PVC	0,06	5,25	0,52	24,9	0,06	5,25	0,41	4,14

Из приведенных данных, очевидно, что и внутри отдельной технологии могут быть существенные нюансы в оценке шероховатости, связанные с типом модельного материала (его качеством и, соответственно, ценой!). Видно также, что технологии, базирующиеся на использовании жидких фотополимеров (SLA, DLP), позволяют получить более гладкие поверхности по сравнению с SLS или FDM- технологиями. То же касается и точности: чем выше точность построения, тем дороже 3D- принтер. По этому параметру аддитивные машины имеют значительные отличия. При рассмотрении технических характеристик принтеров, безусловно, следует обращать внимание на параметр, называемый layers thickness – толщина слоя построения, или шаг построения.

На точность влияет ряд параметров, и шаг построения является не единственным и, зачастую, не главным. Заявляемый шаг построения, например, 0,08 мм для SLS-машины вовсе не означает, что модель размерами 250x250x250 мм будет построена с отклонениями по осям измерений $\pm 0,08$ мм. Скорее всего, отклонения будут находиться в пределах нескольких десятых долей миллиметра ($\pm 0,3...0,8$ мм). На конечный результат будет сильно влиять тип материала (полиамид, полистирол) и в ещё большей степени – конфигурация модели, а также квалификация персонала: правильно ли выбраны режимы спекания, ориентация

моделей в объеме построения, расположение моделей относительно друг друга и т.д. При этом нужно помнить, что SLS – это тепловой процесс, в ходе которого в рабочую камеру подводится значительное количество тепла, температура массива в камере достигает 150°C. Естественно, что строящаяся модель подвергается существенным тепловым нагрузкам и может деформироваться.

Данный эффект может быть усилен или ослаблен действиями персонала как на стадии подготовки задания на построение, так и в процессе работы машины и извлечения моделей из камеры. Неверные действия могут привести к короблению модели, и формальная точность, выраженная понятием *layers thickness*, не будет иметь никакого значения: отклонения от исходной геометрии могут составлять миллиметры.

Другие технологии также имеют свои особенности, например, разную реальную точность построения по осям: в плоскости X-Y одно значение, в направлении Z – другое. Поэтому при выборе технологии и 3D-принтера не лишним будет построить тестовые модели на разных АМ-машинах, провести измерения и оценить, соответствуют ли результаты ожиданиям заказчика и требованиям к модели для конкретных задач. Тем не менее, общепринятым можно считать мнение, что наилучшая точность построения достигается в SLA-машинах. Одной из причин этого является то, что в SLA-технологии процесс построения происходит при комнатной температуре в отсутствии термических нагрузок. Большое значение имеет также качество модельных материалов. Современные SLA-материалы, во-первых, малоусадочные и, во-вторых, имеют определенную вязкость, позволяющую получать стабильно в процессе построения тонкие слои до 0,025 мм. Реальная точность построения SLA-машин составляет 0,025...0,05 мм на дюйм линейного размера. Это значит, что модель с характерным размером 250 мм будет иметь отклонения в пределах $\pm 0,25 \dots 0,5$ мм. Однако эти отклонения могут быть существенно уменьшены за счет введения соответствующих корректировочных коэффициентов на стадии подготовки задания на построение, и следующая модель может быть построена значительно точнее, правда, в этом случае первая модель будет в качестве тестовой.

1.8. Тесты производительности и контроля

Обычно сравнение методик быстрого прототипирования проводят, взяв за отправную точку возможности стереолитографии. Она дает точность -100 мкм (0,004 дюйма) при размерах детали до 15 см. Порошковые методики и LOM обычно имеют точность меньше указанной. В струйных методиках БП ситуация на порядок лучше. Но тут важно знать не только геометрию изделия (его размеры), но и используемый материал, а также метод оценки точности и производительности.

Для анализа методик быстрого прототипирования по времени и стоимости был изготовлен разными методами перепускной клапан диаметром 15 см, сравнительные параметры изготовления которого занесены в табл. 1.2.

Таблица 1.2 - Сравнение методик быстрого прототипирования по времени и стоимости

Параметр	Технология					
	MJM	FDM	3DP	SLS	LOM	SLA
Материал	Воск	АБС-пластик	Гипс	Полистирол	Бумага	Эпоксидный фото-полимер
Точность в сравнении с CAD, дюймов	0,013	0,014	0,025	0,018	0,010	0,006
Время синтеза	7 ч 17 мин	42 ч 10 мин	5 ч 40 мин	6 ч 51 мин	19 ч 39 мин	26 ч 19 мин
Стоимость клапана, \$	146,0	421,6	113,2	268,0	393,2	789,9

На основании таблицы можно проследить закономерность: увеличение точности воспроизведения приводит к увеличению стоимости и времени изготовления.

1.9. Сравнительная оценка аддитивных установок по размерам рабочей камеры, точности и времени воспроизведения

Сравнение процессов быстрого прототипирования обычно производят по следующим критериям.

Размер детали. Габариты детали, которую может построить система прототипирования, ограничена размерами «строительной камеры». В зависимости от типа машины, ее модификации и метода синтеза размеры моделей. Очевидно, что большие детали могут быть изготовлены по частям и затем собраны в одну деталь.

Скорость. Скорость построения модели зависит от таких факторов, как размер детали, геометрическая сложность, используемые материалы, программное обеспечение и др.

Материалы. Спектр материалов для прототипов, различающихся по степени прочности и качеству образуемой поверхности. В зависимости от процесса в модельном прототипировании используют следующие материалы: полистирол, термопластик, бумага, акрил, поликарбонат, нейлон, ABS, синтетические смолы и др.

Точность. Точность прототипа (степень соответствия CAD-модели) зависит от ряда факторов:

- правильности построения CAD-файлов;
- продуманной системы поддержек;
- разрешения (толщины слоев);
- выбора методики синтеза;
- свойств исходного материала.

Смолы, например, имеют свойство коробиться или усаживаться при высыхании. Другие материалы не обеспечивают качества поверхности модели, достаточного для дальнейшего ее использования (при изготовлении литьевых форм), или достаточной прочности.

Стоимость. Стоимость некоторых установок довольно высока. Однако они за короткое время окупаются, так как функциональность изготавливаемых прототипов велика.

В табл. 1.3 проиллюстрировано сравнение по времени, точности и размерам рабочих камер для изготовления изделий размером 0,76...14 см различными методами БП.

Таблица 1.3 - Сравнение методик аддитивного производства по времени и точности воспроизведения

Методика*	Точность, мм	Максимальный размер изделия, мм**	Время процесса
Заливка экструдруемым расплавом (FDM)	0,005	254 x 254 x 254 (Stratasys)	12 ч 39 мин
Процесс листового ламинирования (LOM)	0,010	812x558x508 (Cubic Technologies)	11 ч 02 мин
Селективное лазерное спекание (SLS)	0,005	381 x 330x457 (3D Systems)	4 ч 55 мин
Процесс отверждения на основании (SGC)	0,006	508 x 355 x 508 (Cubital)	11 ч 21 мин
Стереолитография (SLA)	0,003	990 x 787 x 508 (Sony)	7 ч 03 мин
3D-печать (RepRap)	0,100	240 x 240 x 240 (Fab@Home)	Не определено

*В скобках приводится английское сокращение. **В скобках указан производитель.

1.10. Применение аддитивных технологий в различных отраслях промышленности, в образовании, сфере услуг, медицине

Авиационно-космическая промышленность. Авиационно-космическая промышленность по самой своей природе этот рынок требует мелкосерийного производства высококачественных деталей, поэтому избавление от инструментальной оснастки, предлагаемое аддитивными технологиями, приносит существенные выгоды.

В настоящее время ряд систем и материалов прошли сертификацию, и сегодня аддитивные технологии используются для мелкосерийного производства деталей летательных аппаратов. Так, например, компания General Electric (GE) производит топливные форсунки для нового турбовинтового двигателя LEAP с помощью процесса DMLS из кобальтохромового порошка. Впервые 3D печать используется для массового производства различных деталей, необходимых для тысячи реактивных двигателей (рис. 1.13).



Рисунок 1.13 - Детали авиационного двигателя, полученные промышленным методом с помощью селективного лазерного сплавления

Компания Airbus использовала технологию селективного лазерного плавления для уменьшения массы шарнирного крепления, применив в его конструкции легковесные и прочные решётчатые конструкции (рис. 1.14).

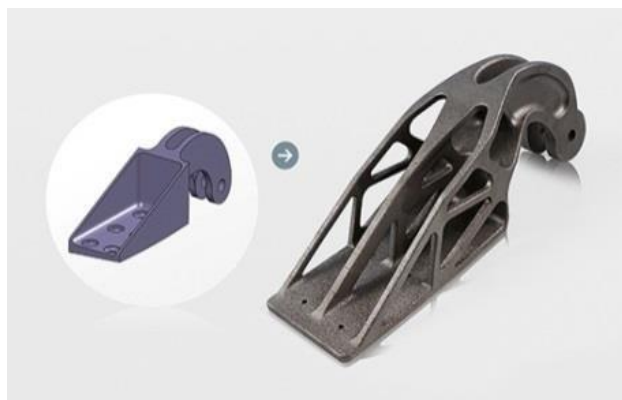


Рисунок 1.14 - Шарнирное крепление до и после оптимизации конструкции под аддитивное производство

В табл. 1.4 показано преимущества внедрения аддитивных технологий на примере производства кронштейнов компанией Airbus Defence and Space.

Таблица 1.4 - Преимущества аддитивных технологий

Экономия	Применение аддитивных технологий
Трудоемкость работ Расходы на производство	Технология позволяет сократить время изготовления 3 деталей до 1 месяца, а время сборки со смежными компонентами — на 5 дней
	Вместо ряда традиционных операций обработки можно создавать деталь в одном технологическом действии
	Вес напечатанной детали на 300 г легче традиционной конструкции, что дает почти 1 кг экономии для целого спутника
Издержки при эксплуатации	Напечатанные из порошка титана детали с большей вероятностью сохраняют находящееся на спутнике оборудование от возможных сбоев

SLM-метод широко применяется в двигателестроении инженерами NASA. При помощи SLM установки был произведен и успешно протестирован инжектор двигателя для ракеты RL-10. Испытание инжектора ракетного двигателя (РД) компании Aerojet Rocketdyne совместно с Научно-исследовательским центром NASA им. Гленна (Кливленд) продемонстрировало внушительные результаты в области аддитивных технологий (табл. 1.5).

Таблица 1.5 - Сравнение методик изготовления детали

Параметры	3-D печать методом SLM	Традиционные способы обработки
Срок сдачи детали	3 недели (из них 40 часов на изготовление)	6 месяцев
Количество компонентов детали	1 часть	4 части
Количество спаянных (сварных) соединений	0 спаек	5 спаек
Стоимость детали	5 тыс. долл.	10 тыс. долл.

Российская компания *ОАО «НИАТ НТК»* провела работы по замене сварных топливных форсунок авиационного двигателя на «выращенные» из никелевого сплава *CL 100NB* (рис. 1.15). В результате значительно снижен процент брака, масса изделия уменьшена на 17%.



Рисунок 1.15 - Сварная и «выращенная» топливная форсунка

Для ремонта дорогостоящих изделий, например, рабочих органов турбин ГТД, валов (рис. 1.16) и т.д., а также для нанесения защитных и износостойких покрытий, используют такие аддитивные технологии, как *DMD* и *LENS*. Использование стереолитографии позволило на стадии разработки узлов ГДТ уменьшить стоимость экспериментов, сократить общее время проектирования, повысить точность расчетных исследований и резко понизить общее количество запусков установки.

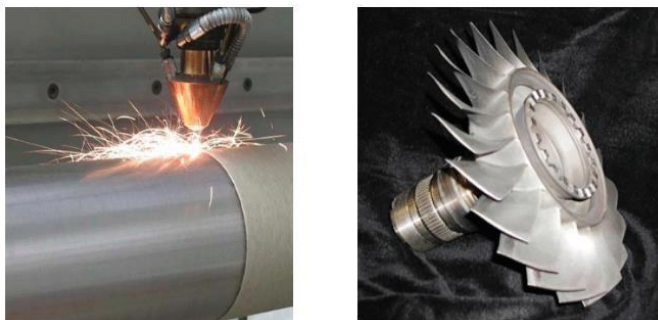


Рисунок 1.16 - Восстановление деталей авиационного двигателя

Специалисты Всероссийского научно-исследовательского института авиационных материалов (ВИАМ) впервые в России изготовили по аддитивной технологии прототип малоразмерного газотурбинного двигателя (МГТД) для беспилотных летательных аппаратов.

МГТД (рис. 1.17) был изготовлен полностью на базе аддитивного производства ВИАМ по новой технологии послойного лазерного сплавления с использованием металлопорошковых композиций жаропрочного и алюминиевого сплавов, созданными специалистами института. Эта технология позволяет получить деталь в 30 раз быстрее, чем традиционными способами, толщина стенки камеры сгорания этого двигателя составила 0,3 мм.



Рисунок 1.17 - Малоразмерный газотурбинный двигатель

Литейное производство. Для традиционного литейного производства аддитивные технологии дают новые возможности для оптимизации затрат и повышения эффективности производства.

При их использовании отпадает необходимость в дорогостоящей инструментальной оснастке, выдерживающей десятки и сотни тысяч циклов. Например, пресс-форма может быть выращена вместе с каналами охлаждения произвольной конфигурации, что невозможно сделать при обычных методах механообработки. Для изготовления пресс-форм с медными охлаждающими сердечниками, а также с так называемой конформной системой охлаждения, конфигурация которой соответствует геометрии формуемой детали, используют аддитивные машины *POM*, *Omtomes* и *Fabrisonic*. Применение литейных форм с равномерным или регулируемым охлаждением позволяет сократить время пребывания отливки в форме до 30%.

Автомобилестроение.

Концерн BMW изготавливает эргономичные инструменты, детали концептуальных, эксклюзивных или ретро-автомобилей. В 2015 г. BMW оснастил гоночные автомобили DTM водяным насосом с рабочим колесом, изготовленным 3D-печатью (рис. 1.18). Высокоточная деталь из алюминиевого сплава подвергается большим напряжениям и показывает высокую надежность..



Рисунок 1.18 - Деталь насоса

Компании Stratasys и Kor Ecologic напечатали на 3D-принтере рабочий гибридный автомобиль (рис. 1.19). При этом были использованы принтеры Dimension 3D и Fortus 3D, производимые компанией Stratasys.



Рисунок 1.19 - Двухместный автомобиль Urbee Hybrid, созданный при помощи 3D-принтера

Для создания целых автомобилей американская фирма Local Motors (рис. 1.20) использует технологию 3D-печати.



Рисунок 1.20 - Автомобиль Американской фирмы Local Motors

Образование.

Для повышения качества знаний студентами, учреждение среднего профессионального образования Саратовский колледж промышленных технологий и автомобильного сервиса изготовил наглядные пособия сборочных изделий для дисциплины «Конструирование деталей машин» и профессионального модуля «Разработка технологических процессов для сборки узлов и изделий в механосборочном производстве» (рис. 1.21).

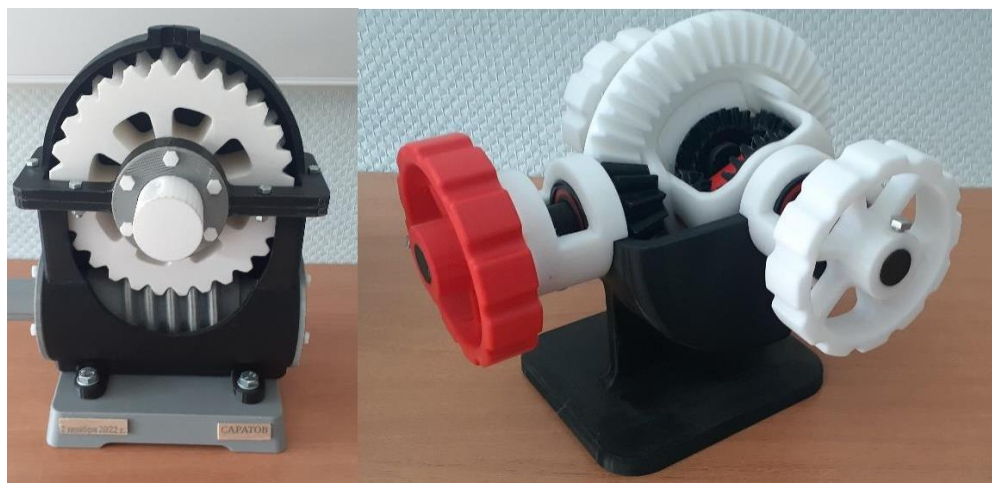


Рисунок 1.21 – Наглядные пособия ГАПОУ СО «СКПТиАС»

Сфера услуг.

Аддитивное производство – экономически оправданное решение для изготовления небольших партий ювелирных украшений. При изготовлении пробных партий для маркетинговых исследований, выставок и показов, при высокой срочности заказов или же в случаях невозможности изготовления изделий традиционным способом. Появление новой цифровой технологии прямого аддитивного производства изделий из металлов, в том числе драгоценных, обеспечивает исключительную свободу дизайна (рис. 1.22). Использование технологии позволяет изготавливать эксклюзивные изделия ранее недоступных форм и дизайнерских решений.

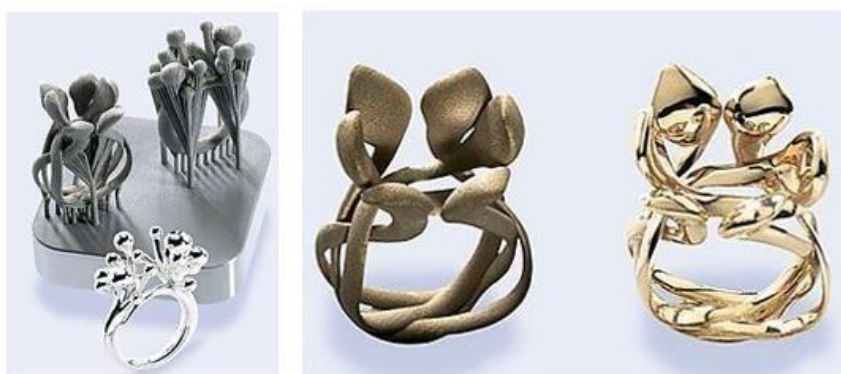


Рисунок 1.22 - Ювелирные украшения, полученные методом селективного лазерного плавления LaserCUSING

Нейлоновый Аэровелосипед (рис. 1.23), созданный Европейским аэрокосмическим и оборонным концерном (European Aerospace and Defence Group (EADS)), обладает рядом преимуществ по сравнению с более традиционными велосипедами: он наполовину легче, но его прочность равна прочности стали. Кроме того, такое производство велосипеда является гораздо более экологически чистым, чем обычный производственный процесс.



Рисунок 1.23 - Аэровелосипед (Airbike)

Компания 3D Systems добилась успехов в *области печати пищи*, и исследовала возможности использования принтеров для создания целого ряда различных продуктов. Созданный ими аппарат Chefjet, способен создавать шоколадные изделия и конфеты.

Производители создают узкоспециализированные инструменты с помощью 3D принтеров: от обычных гаечных ключей, отвёрток и молотков до инструментов, которые предназначены для работы в очень конкретных обстоятельствах. Так, компания «Stratasys» создала аккумуляторные дрели, которые включают в себя целый ряд различных полимеров.

Медицина. В медицине часто необходимо изготавливать продукцию, персонализированную с точки зрения формы и функций, что обусловлено уникальностью каждого пациента. Технологии аддитивного производства способны сделать производство персонализированной продукции экономически целесообразным при минимальных изменениях в дизайне.

Применение в медицине аддитивных технологий подразделяют на следующие категории:

- биомоделирование, включающее в себя изготовление физических моделей анатомического строения человеческого тела и, говоря шире, биологических структур для хирургического тестирования и планирования операций;
- проектирование и изготовление персонализированных имплантатов для реконструктивных операций, реабилитации и пластической хирургии;
- производство имплантатов с пористой структурой (матриц) и тканевая инженерия; изготовление специализированных хирургических инструментов и приспособлений;
- доставка лекарственных средств и изготовление микронных медицинских устройств.

С помощью EBM-системы Arcam налажено массовое производство ацетабулярных колпачков, применяемых при протезировании тазобедренного сустава. Использование аддитивных технологий позволяет производить имплантаты с пористой структурой, облегчающей прорастание тканей. В работах приводятся результаты экспериментов по изготовлению биоактивных и биосовместимых имплантатов.

Технологии аддитивного производства применяются для серийного производства стоматологических изделий. Для стоматологических изделий очень хорошо подходит процесс SLM, поскольку изделия имеют сложную геометрию, требуют значительной индивидуализации.

Аддитивные технологии находят свое применение также в сфере слухового протезирования: два ведущих производителя слуховых инструментов, Siemens и Phonak, применяют системы аддитивного производства для серийного производства индивидуализированных слуховых аппаратов. В настоящий момент для изготовления слуховых аппаратов используются процессы SLS.

1.11. Дорожная карта развития аддитивных технологий

Приоритетные направления развития аддитивных технологий:

В области моделирования процесса и его контроля:

- разработка многомасштабной системы моделирования «процесс—структура — свойства», интегрированной с инструментами CAD/CAE/CAM;
- создание систем с обратной связью, адаптивного управления с возможностями упреждения и отклика для процессов аддитивного производства. Алгоритмы системы управления должны базироваться на прогнозирующих моделях реакции системы и вариации процессов;
- создание новых сенсоров для диагностики процессов в камере синтеза и разработка (совершенствование) новых методов обработки информации при диагностике.

В области установок и превращения в материалах:

- развитие понимания физики процессов аддитивных технологий для охвата всей совокупности явлений;
- создание масштабируемых скоростных методов линейных и угловых перемещений в процессах обработки материалов с целью увеличения производительности и рабочих объемов машин аддитивного производства;
- использование уникальных возможностей аддитивных технологий для создания эпитаксиальных металлических структур, уникальных структур, возможности врезки готовых (например, датчики, сенсоры) компонентов во время процесса изготовления изделия;
- развитие инструментария для изготовления методами аддитивных технологий структур на уровне «атом за атомом» и конструирования аддитивных нанофабрикаторов;
- определение («зеленых», то есть экологичных) материалов, включая многоразовые, пригодные для переработки и биodeградируемые материалы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что означает термин Быстрое прототипирование?
2. Что означает термин Аддитивное производство?
3. Что означает термин Прототип?
4. Перечислите аспекты, характеризующие прототип.
5. Из каких шагов состоят процессы быстрого прототипирования?
6. По каким методам подразделяют аддитивные технологии?
7. Из каких переходов состоит рабочий цикл SLA-процесса?
8. Из каких переходов состоит рабочий цикл LOM -процесса?
9. Из каких переходов состоит рабочий цикл SLS -процесса?
10. Из каких переходов состоит рабочий цикл FDM -процесса?
11. Опишите обобщенный процесс аддитивного производства.
12. Перечислите основные группы вариантов применения быстрого прототипирования.
13. Перечислите уровни применяемости оборудования для быстрого прототипирования.
14. Перечислите факторы от которых зависит точность прототипа (степень соответствия CAD-модели).
15. По каким критериям производят сравнение процессов быстрого прототипирования?

ТЕМА 2. ТЕХНОЛОГИЯ 3D ПЕЧАТИ МЕТОДОМ ПОСЛОЙНОГО НАПЛАВЛЕНИЯ

2.1. Подача пластика в экструдер. Расплавление пластика в экструдере

Экструдер — это машина, которая превращает сырьё в виде мелких частиц в расплав определённой формы. В качестве таких частиц могут использоваться гранулы, порошок, разнообразные пасты или лом.

Процесс экструзии заключается в прохождении сырья через специальный формующий инструмент (экструзионную головку, фильерную пластину). Форму готового продукта задаёт калибрующее устройство с определённым сечением. Она будет зависеть от вида отверстия в формующем устройстве. Если это щель, на выходе получится листовый материал, если кольцо, то изделие будет иметь форму трубы.

Основная функция экструдера 3D принтера - обеспечение равномерного выдавливания расплавленного пластика для формирования слоев 3D модели.

Разделим экструдер на два узла: холодный узел (coldend, колдэнд) (рис. 2.1) и горячий узел (hotend, хотэнд, хотенд).

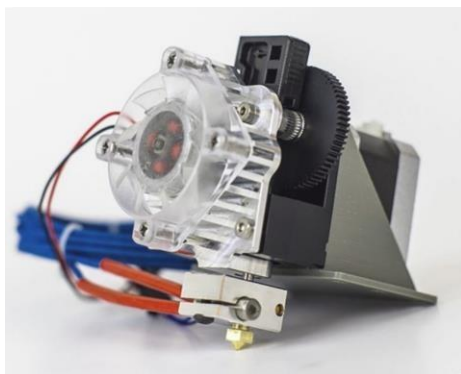


Рисунок 2.1 - Холодный узел экструдера

Холодный узел относится к верхней части экструдера 3D-принтера, в которую подается нить, а затем проходит в хотенд (горячий узел), далее нить плавиться и экструдироваться на платформу 3D принтера.

Экструдера 3D-принтеров в свою очередь подразделяются на два типа Директ (direct, прямой привод) или Боуден (Bowden), от этого зависит конструкция

холодного узла (рис. 2.2). Пример директ экструдера E3D Titan Aero изображен на рис. 2.1.

Холодный узел состоит из двигателя экструдера приводящий в движение зубчатую передачу, которые обычно устанавливаются либо на раме принтера, либо на самой печатающей головке, в зависимости от типа экструдера и трубки из тефлона, которая обязательно нужна любому экструдеру типа Боуден для точного направления пластиковой нити и минимального отклонения в процессе 3D печати отката нити.

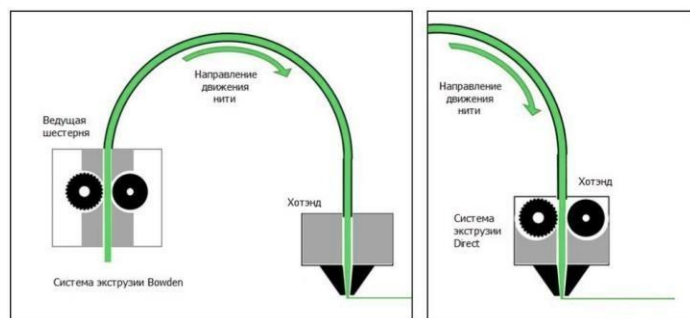


Рисунок 2.2 - Сравнение экструдеров и принцип работы

Директ экструдеры для 3D принтеров отличается размещением двигателя непосредственно над хотэндом (рис. 2.3). Такое расположение сводит к минимуму расстояние от зубчатой передачи до хотэнда и обеспечивает более надежную 3D-печать гибких нитей типа TPU, TPE, SEBS, Flex и т.д.

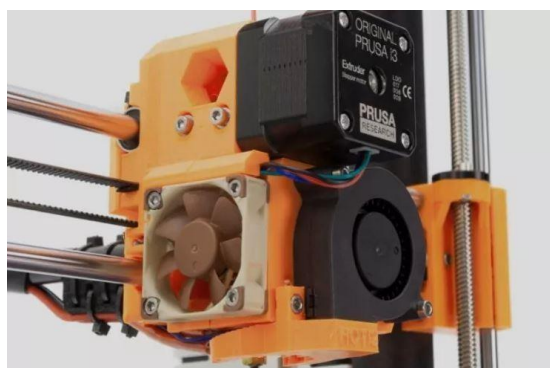


Рисунок 2.3 - Директ экструдер Prusa i3 Mk3

Наличие директ экструдера не обязательно означает, что он может отлично печатать гибкими нитями. Для успешной печати гибкими материалами необходимо контролировать положение зажима и устройство зубчатой передачи.

Еще одно преимущество использования директ экструдера заключается в более точном управлении втягиванием. Благодаря расположению непосредственно над хотэндом, меньше расстояние между зажимом и пластиковой нитью, проходящей через тепловой барьер. Следовательно, у нити меньше места для изгиба и деформации под воздействием давления.

Директ экструдеры для 3D-принтера делают печатающую головку более громоздкой, как следствие выше инерционность, что требует более надежной конструкции рельс, если требуется получить хорошее качество печати. Так же это отражается на скорости 3D принтера, директ экструдеры по сравнению с боуден печатают на более низких скоростях. Возможные дефекты — это рябь на поверхности отпечатка.

Боуден экструдеры для 3D принтера предусматривает сборку двигателя и зубчатой передачи на раме принтера. Основное преимущество боуден экструдера — это скорость, т.к. печатающая головка имеет меньший вес.

Недостатком боуден экструдеров, является то, что в процессе перемещения нити по тефлоновой трубке, соединяющей механизм подачи и хотэнд, она может отклоняться и чем длиннее трубка, тем больше может быть отклонение, особенно это проявляется при втягивании нити и работе с гибкими пластиками. Размер втягивания и параметры 3D печати для гибких нитей подбираются опытным путем.

Еще одна проблема, которую необходимо решить при настройке боуден экструдеров — это трение. Поскольку нить необходимо проталкивать на некоторое расстояние внутри трубки, важно, чтобы двигатель и зубчатые передачи давали на нить достаточный крутящий момент и надежно прижимал пластиковую нить.

В большинстве настольных дельта 3D-принтеров используются боуден экструдеры.

Хотенды (хотэнды) для 3D принтера стандартные. Хотенд — это узел который непосредственно нагревает пластиковую нить, через который расплавленный пластик выдавливается на стол 3D принтера (рис. 2.4).

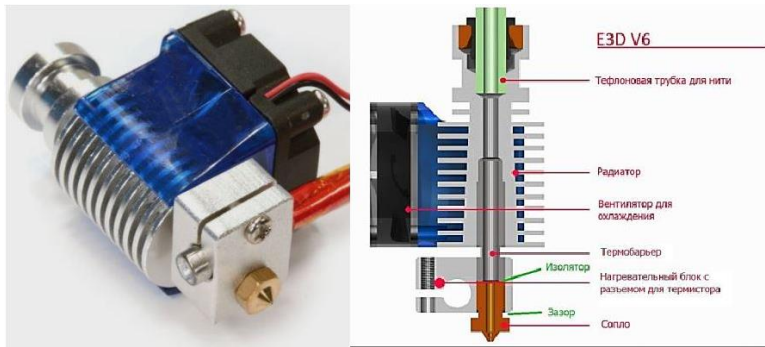


Рисунок 2.4 - Хотэнд E3D V6

Термобарьер, который ввинчивается в радиатор, часто представляет собой трубку из нержавеющей стали (или другого металла с низкой теплопроводностью, например, из титана) с резьбой.

Верхняя часть, которая активно охлаждается радиатором и специальным вентилятором (или системой водяного охлаждения, в некоторых экстравагантных случаях), предотвращает нагрев и ослабление нити до того, как она будет экструдирована.

Нижняя часть состоит из нагревательного блока, картриджа, термистора, температурного реле и сопла, изготовленного из латуни (рис. 2.5).



Рисунок 2.5 – Нагревательный блок, сопло и термобарьер хотэнда

Блок нагревателя, обычно изготовленный из алюминия, нагревает его картридж. Внутри блока нагревателя находится термистор — небольшой датчик, который передает значение температуры на материнскую плату 3D-принтера, что позволяет поддерживать её в заданном диапазоне.

2.2. Послойное нанесение расплавленного пластика. Достоинства и недостатки применяемой технологии

FDM (Fused Deposition Modeling) – метод послойного наплавления с использованием пластиковой нити. Принцип работы основан на изготовлении объекта путем послойного нанесения предварительно расплавленного гранулированного пластика или расплавленной пластиковой нити. Другое название этой технологии – FFF (Fused Filament Fabrication) (рис. 2.6).

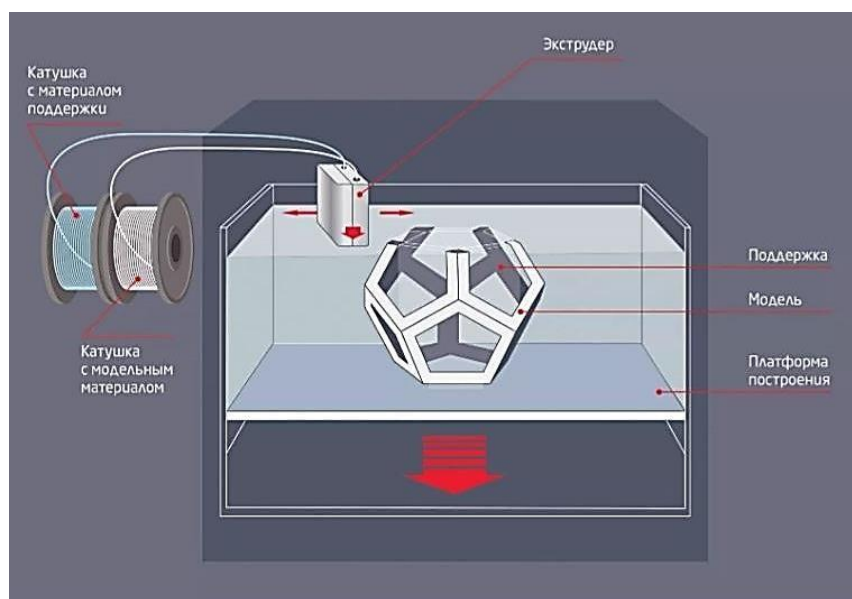


Рисунок 2.6 - Схема 3D-принтера, использующего FDM-технологию

Принцип действия FDM -технологии

1. Трехмерная модель создаётся в CAD-системе и экспортируется как поверхностная электронная модель в формате STL-файла.
2. Поверхностная электронная модель рассекается в программном обеспечении для 3D-принтера на горизонтальные слои, которые затем отправляются на печать.
3. Термопластичный моделирующий материал в форме тонкой нити, диаметром 1,75 мм, подаётся в экструзионную (выдавливающую) головку с системой регулировки температуры, где он разогревается до полужидкого состояния.

4. Выдавливающая головка наносит материал очень тонкими слоями на неподвижное основание, формируя за один проход законченный слой изделия. Последующие слои наносятся на предыдущие, отвердевают и таким образом соединяются друг с другом.

5. Заключительный этап – удаление поддерживающих структур. В качестве расходного материала при FDM-технологии используют различные пластики, есть и модели 3D-принтеров, позволяющие работать с оловом, сплавами металлов с невысокой температурой плавления и шоколадом.

Достоинства FDM-технологии:

- возможность создания сложных деталей малых и больших габаритов;
- широкий выбор термопластиков или композитов, благодаря чему можно без труда подобрать необходимый по свойствам материал, а также выбрать предпочтительный цвет готового изделия;
- возможность проведения дополнительной обработки моделей;
- низкая себестоимость материалов и, как следствие, конечного изделия;
- доступная цена расходных материалов.

Недостатки FDM-технологии:

- невысокая скорость работы;
- небольшая разрешающая способность как по горизонтали, так и по вертикали, что приводит к более или менее заметной слоистости поверхности изготовленной модели;
- проблемы с фиксацией модели на рабочем столе (первый слой должен прилипнуть к поверхности платформы, но так, чтобы готовую модель можно было снять);
- для нависающих элементов требуется создание поддерживающих структур, которые впоследствии приходится удалять, но даже с учетом этого некоторые модели попросту невозможно сделать на FDM-принтере за один цикл, и приходится разбивать их на детали с последующим соединением склейкой или другим способом.

2.3. Печать простейших прототипов и функциональных изделий из пластика

Изготовление прототипов представляет собой важный этап на пути создания нового изделия. Оно позволяет изготовить опытный образец продукта для оценки его технических характеристик и потребительских качеств. Современные технологии прототипирования позволяют быстро и дешево производить штучные изделия, вносить корректировки в проект и ускорять его готовность к серийному выпуску. С помощью прототипа можно проанализировать эргономичность, тактильные ощущения, удобство применения, визуальное восприятие, дизайн, прочность и многие другие параметры будущей продукции. Кроме того, технические образцы незаменимы при проведении выставок и презентаций.

Изготовление прототипов методом послойного наплавления с использованием пластиковой нити проходит в несколько этапов:

1. Моделирование изделия на компьютере.
2. Подготовка модели к печати.
3. Изготовление опытного образца.
4. Постобработка изделия.
5. Тестирование полученной модели на соответствие различным требованиям.
6. Доработка изделия при необходимости.

Моделирование изделия на компьютере включает в себя проектирование изделия по эскизам, фотографиям, чертежам, готовым моделям (рис. 2.7) в системах автоматизированного проектирования и сохранение модели в форматах .m3d и .stl (рис. 2.8).

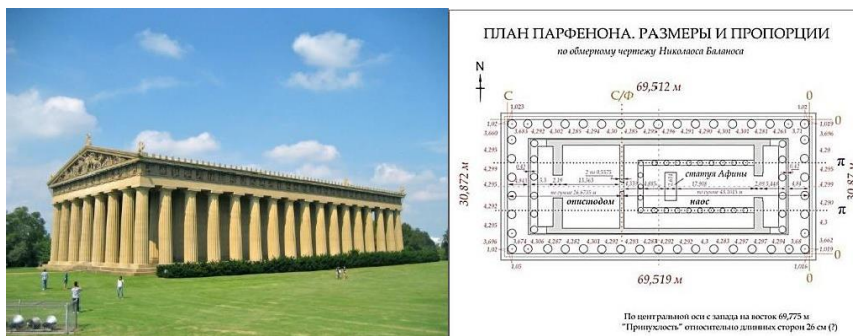


Рисунок 2.7 – Исходные данные для моделирования изделия

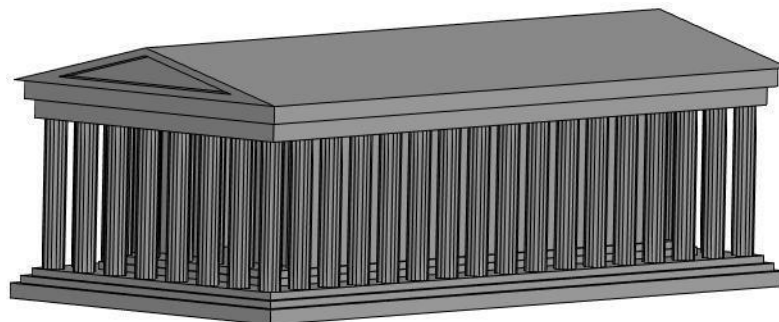


Рисунок 2.8 – Модель изделия в системе автоматизированного проектирования

Формат .m3d необходим для последующей доработки прототипа. Формат. stl универсальный, который содержит всю информацию о поверхности объекта в структуру которого входят: полигоны (фасеты) и их нормали. Первые нужны для задания поверхности, а вторые для указания где находится внешняя сторона полигона. Информация о файле STL описывает только геометрию модели, нет спецификаций о текстуре, цвете или материале вашей модели.

Подготовка модели к печати включает в себя создание управляющей программы, в которой выбираем материал будущего прототипа, указываем диаметр прутка пластика, отмечаем наличие поддержек и охлаждения, уточняем «Высоту слоя», регулируем плотность заполнения и указываем тип заполнения полнотелых моделей (рис. 2.9).

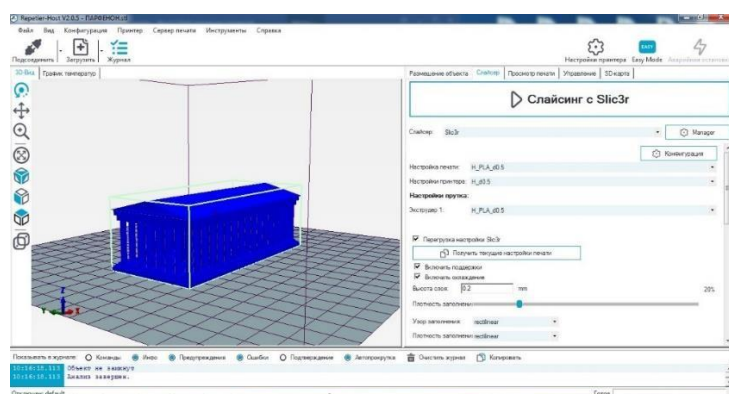


Рисунок 2.9 - Подготовка модели к печати

Изготовление опытного образца включает в себя печать прототипа на 3D- принтере в соответствии с созданной управляющей программой (рис. 2.10).

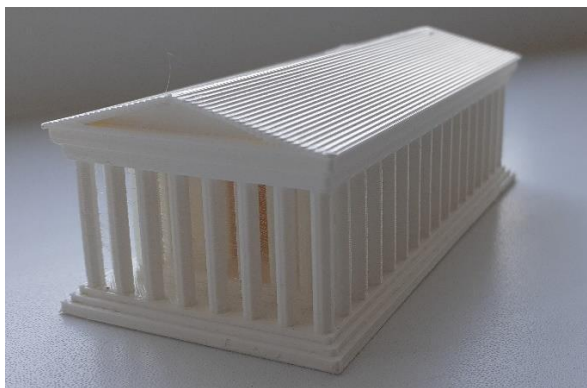


Рисунок 2.10 – Опытный образец макета греческого храма Парфенон

Постобработка изделия, изготовленного по FDM-технологии, включает в себя удаление поддерживающего материала; улучшение текстуры материала; повышение точности; улучшение эстетического восприятия; при необходимости, сборка модели. Тестирование модели полученной методом послойного наплавления с использованием пластиковой нити на соответствие различным требованиям к изделию должны учитывать внешний вид, геометрические размеры, химический и фазовый составы, механические свойства; предел текучести или временное сопротивление и относительное удлинение, пористость.

Доработка изделия при обнаружении недостатков в конструкции на ранних стадиях проектирования и производства поможет избежать дорогостоящего перепроектирования и использования дополнительных инструментов.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое экструдер?
2. В чём заключается процесс экструзии?
3. Какова основная функция экструдера 3D принтера?
4. Опишите конструкцию холодного узла экструдера.
5. Опишите конструкцию горячего узла экструдера.
6. Опишите принцип работы горячего узла экструдера.
7. Дайте определение FDM-технологии.
8. Опишите принцип действия FDM –технологии.
9. Какой расходный материал используют при FDM-технологии?
10. Перечислите этапы изготовления прототипов методом послойного наплавления с использованием пластиковой нити.
11. Для чего необходим формат файла *.m3d?
12. Для чего необходим формат файла *.stl?
13. Что включает в себя подготовка модели к печати при FDM-технологии?
14. Что включает в себя постобработка изделия, изготовленного по FDM-технологии?

ТЕМА 3. ТЕХНОЛОГИЯ 3D ПЕЧАТИ МЕТОДОМ СТЕРЕОЛИТОГРАФИИ

3.1. Технологическое применение SLA

SLA (Stereolithography Apparatus) - технология лазерной стереолитографии, основанная на послойном отверждении жидкого материала под действием луча лазера.

Стереолитографический аппарат был запатентован в 1986 году Чаком Халлом (Chuck Hull), соучредителем компании 3D Systems, и как раз с этого момента принято отсчитывать историю аддитивных технологий. Халл является изобретателем первой коммерческой технологии быстрого прототипирования, а также формата файлов STL, в котором стандартно сохраняются данные трехмерных моделей.

Лазерную стереолитографию отличает использование фотополимеров в жидком состоянии, которые накладываются тонкими слоями. Материал затвердевает под лазерным лучом или ультрафиолетовой лампой, после чего мы получаем готовую 3D-модель. Технология заключается, таким образом, в построении твердого тела в жидкой среде (рис. 3.1).

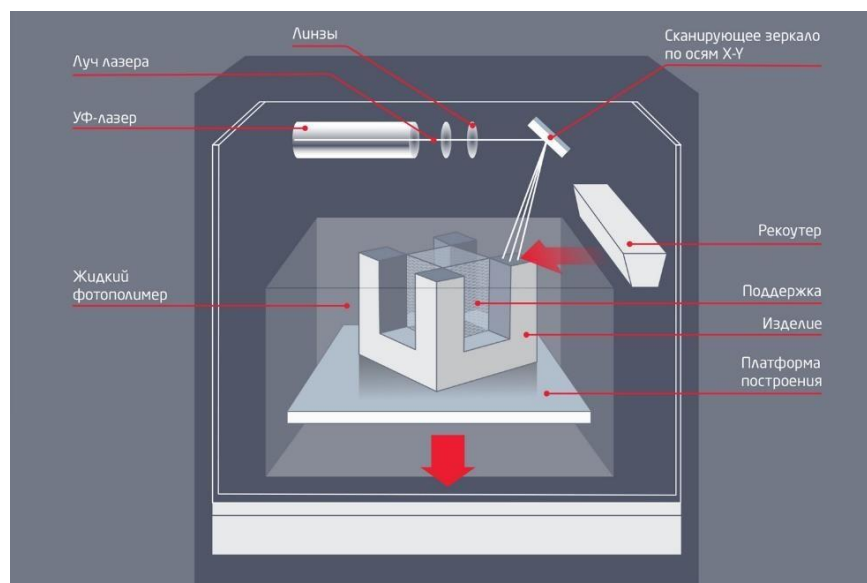


Рисунок 3.1 - Схема стереолитографического 3D-принтера

Принцип действия SLA-технологии

1. Фотополимерная смола заливается в емкость, в которую ставят подвижную платформу для выращивания изделия.
2. Платформа помещается на такую глубину, чтобы ее покрывал супертонкий слой фотополимера – толщиной от 0,05 до 0,13 мм. Это самое минимальное значение, доступное современным 3D-принтерам, – таким образом, лазерная стереолитография обеспечивает более высокую точность в сравнении с другими технологиями 3D-печати.
3. Затем в компьютерной программе активируется лазер. Лазерный луч прорисовывает первый слой на поверхности фотополимера, вызывая его затвердевание.
4. Для создания нового слоя платформа погружается на глубину, соответствующую толщине одного слоя. Выполняется необходимое количество таких циклов.
5. Когда объект построен, он подвергается обработке специальным раствором и финальной полимеризации мощным УФ-излучением.
6. В завершение процесса вручную удаляют поддержки, которые используются во многих аддитивных процессах.

В качестве расходного материала при SLA-технологии используют фотополимеры (светополимеры) - вещества, которые изменяют свои свойства под действием ультрафиолетового света. В обычном состоянии они характеризуются податливостью, но под действием ультрафиолетовых лучей приобретают прочность. Длительность облучения и длина волны устанавливаются в зависимости от материала для SLA-принтера, размеров выращиваемого изделия и окружающих условий.

Лазерная стереолитография может использоваться при создании оснастки, приспособлений или прототипов, а также при производстве промышленной керамики, формовании и литье по выжигаемым моделям (рис. 3.2).



Рисунок 3.2 - Примеры изделий, изготовленных на SLA-машинах

Преимущества SLA - технологии:

- изготовление моделей любой сложности;
- легкая обработка полученного прототипа;
- высокое качество поверхности модели;
- возможность создания конечных фотополимерных изделий;
- объемная камера построения;
- широкий выбор материалов.

Недостатки SLA - технологии:

- изготовленные модели хрупкие и не подходят для функциональных прототипов;
- негативное воздействие солнечного света на механические свойства и внешний вид изделия;
- поддержки и пост-обработка при печати требуются всегда.

3.2. Технологическое применение DLP

Метод DLP (Digital Light Processing) был изобретен несколько позже – в 1987 году

Ларри Хорнбеком из Texas Instruments, – правда, не для аддитивного производства, а для кинопроекции, где эта технология нашла широкое применение.

В DLP-печати используется проектор. Проектор излучает свет сразу на весь слой смолы, избирательно отверждая деталь с помощью тысяч мельчайших зеркал, называемых цифровыми микрзеркальными устройствами (digital micromirror devices, DMD), направляющими световую проекцию (рис. 3.3).

В этих проекторах для создания изображений используются пиксели, а слоисостоят из вокселей, как в обычных 2D- или 3D-камерах.

Пиксель (иногда пэл, англ. pixel, pel — сокращение от pictures element, которое в свою очередь сокращается до pix element, в некоторых источниках picture cell — букв. элемент изображений) — наименьший логический элемент двумерного цифрового изображения в растровой графике, или физический элемент матрицы дисплеев, формирующих изображение. Пиксель представляет собой неделимый объект прямоугольной или круглой формы, характеризуемый определённым цветом. Растровое компьютерное изображение состоит из пикселей, расположенных по строкам и столбцам. Также пикселем называют элемент светочувствительной матрицы (сенсель — от sensor element).

Воксель - это изображение трехмерной области пространства, ограниченной заданными размерами, которая имеет свои собственные координаты узловой точки в принятой системе координат, свою собственную форму, свой собственный параметр состояния, который указывает на его принадлежность к некоторому моделируемому объекту, и обладает свойствами моделируемой области.

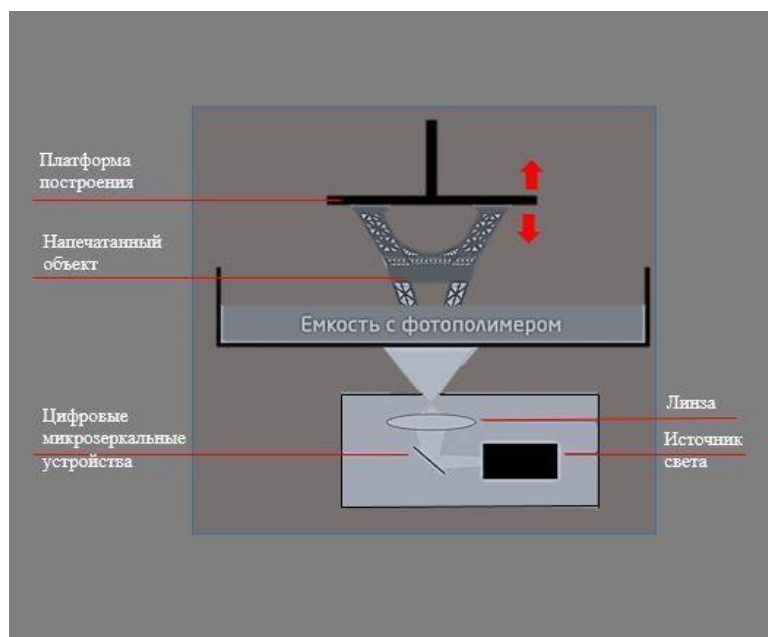


Рисунок 3.3 - Схема DLP-принтера

Принцип действия DLP-технологии

1. Фотополимерная смола заливается в емкость, в которую ставят подвижную платформу для выращивания изделия.
2. Платформа помещается на глубину, отступая от ее дна на толщину самого первого слоя будущего объекта.
3. Затем в соответствии с компьютерной программой на фотополимер направляется поток света из ультрафиолетового DLP-проектора, вызывая его затвердевание.
4. Для создания нового слоя платформа поднимается на глубину, соответствующую толщине одного слоя. Выполняется необходимое количество таких циклов.
5. Когда объект построен, он подвергается обработке специальным раствором и финальной полимеризации мощным УФ-излучением.
6. В завершение процесса вручную удаляют поддержки.

В качестве расходного материала при DLP-технологии используют фотополимерные смолы, имитирующие любые материалы, начиная от сверхтвердых пластиков и вплоть до резины. Все они представлены в большом варианте цветов.

Данную технологию используют при изготовлении мастер-копий и моделей для литья и прототипов функционального тестирования. С ее помощью печатают виниры, зубы для протезирования, коронки и другие стоматологические изделия; ювелирные изделия, в том числе и дизайнерской продукции; элементы сложных пространственных конфигураций малых объемов; игрушки, декоративные элементы, сувенирную продукцию; изделия медицинского назначения; элементы для сенсорных, измерительных устройств, систем «умного» освещения; матрицы для производства силиконовых форм и другие изделия, требующие высокой детализации.

Преимущества DLP - технологии:

- изготовление моделей любой сложности;
- легкая обработка полученного прототипа;
- высокая скорость печати;
- возможность создания конечных фотополимерных изделий;
- широкий выбор материалов.

Недостатки DLP - технологии:

- точность DLP печати значительно ниже, чем SLA;
- возможна паразитная засветка;
- поддержки и пост-обработка при печати требуются всегда.

3.3. LCD-технология, фотополимеризация с помощью жидкокристаллического экрана

LCD-печать (Liquid Crystal Display, жидкокристаллический дисплей) заключается в одновременной засветке целых слоев для отверждения фотополимера, но без применения зеркал. Вместо этого мощные жидкокристаллические панели излучают на модель свет с помощью светодиодов. ЖК-панель блокирует засветку в тех областях, которые не подлежат фотополимеризации.

Жидкокристаллический экран пропускает свет только через участки, подлежащие отверждению, на готовую деталь, упрощая процесс и устраняя необходимость в каких-либо зеркалах или гальванометрах (рис. 3.4).

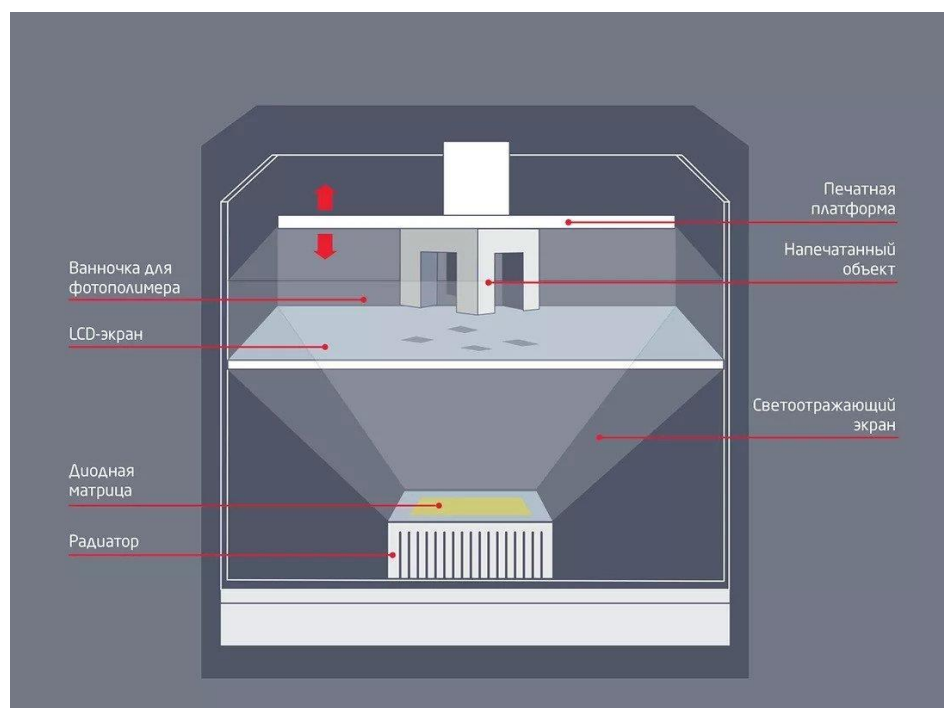


Рисунок 3.4 - Схема LCD-принтера

Принцип действия LCD -технологии

1. Фотополимерная смола заливается в емкость, в которую ставят подвижную платформу для выращивания изделия.
2. Платформа помещается на глубину, отступая от ее дна на толщину самого первого слоя будущего объекта.

3. Затем в соответствии с компьютерной программой на фотополимер жидкокристаллический экран пропускает свет на участки, подлежащие отверждению.

4. Для создания нового слоя платформа поднимается на глубину, соответствующую толщине одного слоя. Выполняется необходимое количество таких циклов.

5. Когда объект построен, он подвергается обработке специальным раствором и финальной полимеризации УФ-излучением.

6. В завершение процесса вручную удаляют поддержки.

В качестве расходного материала при LCD-технологии используют фотополимерные смолы, имитирующие любые материалы, начиная от сверхтвердых пластиков и вплоть до резины. Все они представлены в большом варианте цветов.

Данную технологию используют при изготовлении мастер-копий и моделей для литья и прототипов функционального тестирования. С ее помощью печатают виниры, зубы для протезирования, коронки и другие стоматологические изделия; ювелирные изделия, в том числе и дизайнерской продукции; элементы сложных пространственных конфигураций малых объемов; игрушки, декоративные элементы, сувенирную продукцию; изделия медицинского назначения; элементы для сенсорных, измерительных устройств, систем «умного» освещения; матрицы для производства силиконовых форм и другие изделия, требующие высокой детализации (рис. 3.5 – 3.6).

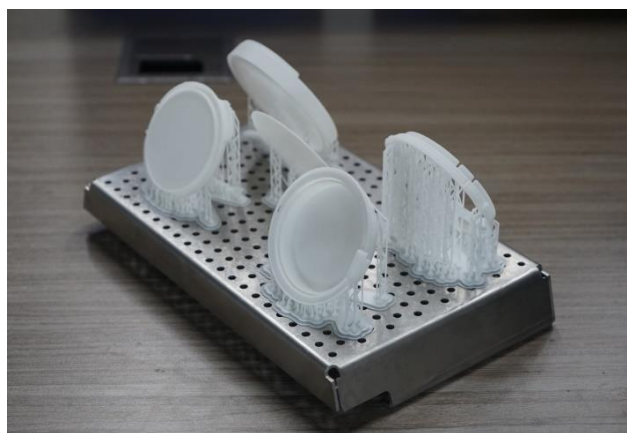


Рисунок 3.5 - Пример LCD-печати промышленных деталей



Рисунок 3.6 - Печать изделий для стоматологии на LCD-принтере

Преимущества LCD - технологии:

- изготовление моделей любой сложности;
- легкая обработка полученного прототипа;
- высокая скорость печати;
- возможность создания конечных фотополимерных изделий;
- широкий выбор материалов.

Недостатки LCD - технологии:

- точность LCD печати значительно ниже, чем DLP;
- качество печати может быть не одинаковое на всей области печати. Так как в качестве УФ источника используется массив светодиодов, а не один источник света, рабочая область может подсвечиваться неравномерно;
- скорость печати ниже, чем DLP. Светодиоды светят «слабее» проектора, поэтому время засветки слоя немного больше, но все равно LCD принтер печатает быстрее SLA.
- возможна паразитная засветка;
- поддержки и пост-обработка при печати требуются всегда.

3.4. Полимеризация пластика в ультрафиолетовой печи. Жидкие фотополимеры

Дополнительное отверждение изделия в ультрафиолетовой печи (англ. post curing) – один из этапов процесса 3D-печати по технологии стереолитографии.

Находясь в жидком состоянии, фотополимерная смола состоит из различных веществ, таких как мономеры, олигомеры, фотоинициаторы. Из большого количества веществ, входящих в состав смолы, эти три вещества – основные (рис. 3.7).

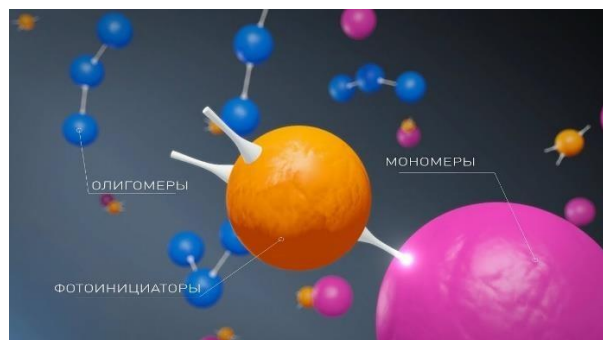


Рисунок 3.7 – Состав жидкой фотополимерной смолы

Мономеры – это основа любого полимера. Мономеры – это жидкое вещество, достаточно токсичное, с резким запахом. Для фотополимеров, обычно, используют или акриловый, или (мет)акриловый мономер. Поскольку акриловая связь под действием ультрафиолета легко разрушается, они объединяются между собой в более длинные цепочки. В стоматологических смолах используют метилметакрилат, как менее токсичное вещество.

Олигомеры - это предполимеризовавшийся мономер. Олигомеры делят на: эпоксиметакрилат (жёсткие и хрупкие – твердость вещества); уретан(мет)акрилат (максимально универсальные, от очень эластичных до жестких, но не хрупких); полиэфир-метакрилат (средняя жесткость и хрупкость). Можно получать смолы, которые будут напоминать вещества от силикона до очень твердых, практически граничащих с эпоксидами.

Фотоинициаторы - это связующее вещество и катализатор химической реакции полимеризации.

Воздействие на фотополимерную смолу ультрафиолетового излучения лазера приводит к тому, что фотоинициаторы вступают в реакцию, а мономеры связываются вместе и образуют полимер. Это первичная стадия отверждения.

Отвержденная смола представляет собой сшитую макромолекулу, то есть каждая ее часть непосредственно связана с любой другой ее частью. Однако после 3D-печати останется много не сшитых в достаточной степени участков, что влияет на прочность на разрыв и на другие свойства. Для завершения молекулярной связи и создания любой возможной перекрестной связи может быть использован ультрафиолетовый свет.

Солнечный свет преломляется в радуге в свои спектральные цвета. Видимый спектр имеет длину волны от 400 нм до 800 нм. Ультрафиолетовое излучение имеет невидимый спектр с длиной волны между 100 нм и 400 нм (рис. 3.8).

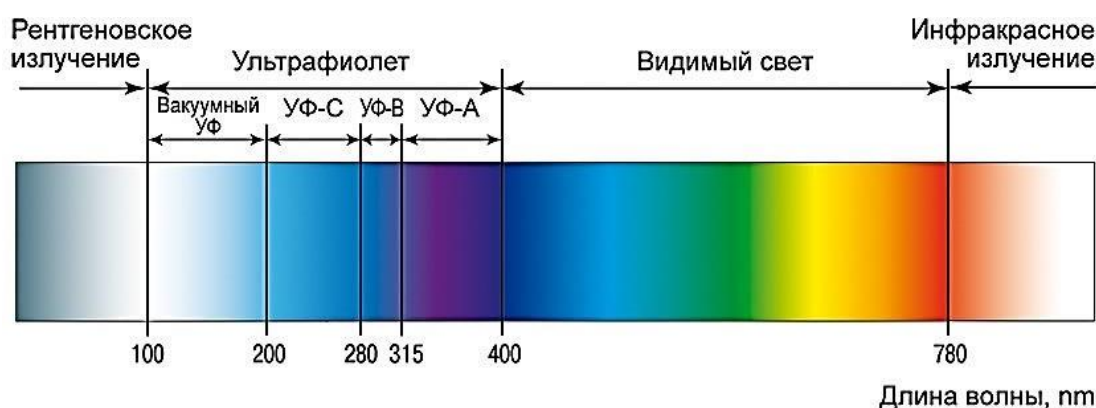


Рисунок 3.8 – Спектры солнечного света Ультрафиолетовое излучение между 200 нм и 400 нм используется в промышленности и в быту для запуска реакций, таких как полимеризация, синтез или деградация различных веществ.

Для ультрафиолетовой полимеризации используются ультрафиолетовые лампы и LED диоды, которые имеют излучение в УФ-спектре.

УФ-излучение разрушает углерод-углеродную двойную связь одиночной молекулы (мономер, олигомер). Одиночные молекулы сшиваются с молекулярными цепями. Это сшивание называется полимеризация (УФ-сушка). Подходящие добавки, такие как фотоинициаторы, ускоряют цепную реакцию.

3.5. Печать высококачественных и детализированных прототипов

Прототип любой сложности и для любых целей можно посредством стереолитографии, которые становятся незаменимы в научно-исследовательских изысканиях.

Изготовление прототипов методом стереолитографии проходит в несколько этапов:

1. Моделирование изделия на компьютере.
2. Подготовка модели к печати.
3. Изготовление опытного образца.
4. Постобработка изделия.
5. Тестирование полученной модели на соответствие различным требованиям.
6. Доработка изделия при необходимости.

Моделирование изделия на компьютере включает в себя проектирование изделия (рис. 3.9) в системах автоматизированного проектирования.



Рисунок 3.9 – Моделирование изделия

Подготовка модели к печати включает в себя создание управляющей программы, в которой выбираем материал будущего прототипа, ориентацию объекта, опорные структуры и толщину слоя.

Изготовление опытного образца включает в себя печать прототипа на 3D- принтере в соответствии с созданной управляющей программой (рис. 3.10).

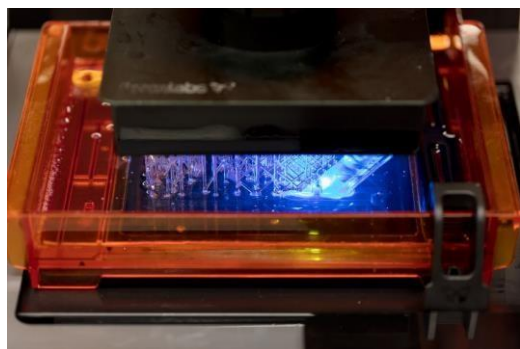


Рисунок 3.10 – Изготовление опытного образца прототипа

Постобработка изделия, изготовленного по технологии стереолитографии, включает очистку распечатанного прототипа изопропиловым спиртом (рис. 3.11), доотверждения в ультрафиолетовой камере, чтобы завершить процесс полимеризации и стабилизировать механические свойства (рис. 3.12).



Рисунок 3.11 – Очистка распечатанного прототипа



Рисунок 3.12 - Полимеризация пластика в УФ-камере

Далее, после просушки изделия, удаляют опорные структуры и зачищают поверхность. Напечатанные прототипы легко поддаются дальнейшей обработке, в том числе механической, их можно также загрунтовать, покрасить или задействовать в сборных конструкциях.

Тестирование модели полученной методом стереолитографии на соответствие различным требованиям к изделию должны учитывать внешний вид, геометрические размеры, химический состав, механические свойства, пористость.

Доработка изделия необходима при обнаружении недостатков в конструкции прототипа и включает в себя дополнительное проектирование базовой трехмерной модели изделия в CAD-системе.

3.6. Печать моделей для литья по выжигаемым моделям

Литье по выжигаемым моделям – одна из разновидностей точного литья. Технология применяется при изготовлении ответственных деталей в наукоемких отраслях промышленности (авиакосмической, судостроительной, оборонной, автомобильной и др.). Внедрение аддитивных технологий на литейном предприятии позволяет в значительной мере оптимизировать производственный процесс.

3D-печать дает возможность выращивать уникальные объекты сложной геометрии для получения высококачественных отливок. 3D-принтер воспроизводит практически любые формы и конфигурации, что невыполнимо при традиционном литье. Модели, которые созданы для литья по выжигаемым моделям аддитивными методами, могут быть гораздо тоньше, чем стандартно производимые в пресс-формах из пенополистирола.

Аддитивные технологии способны дать предприятию большой экономический эффект за счет снижения затрат на изготовление продукции и рабочую силу, а также существенной экономии времени производства. Благодаря 3D-печати получить первую отливку стало возможным не за полгода (срок изготовления традиционными методами), а всего за две недели.

Технологический процесс литья по выжигаемым моделям применяют для получения моделей больших размеров и повышенной прочности. Материалом для 3D-печати, используемом для изготовления форм является пластик (фотополимерная смола).

Выращивание выжигаемых моделей на 3D-принтере производится методом лазерной стереолитографии (Stereolithography Apparatus, SLA) – когда жидкий фотополимер затвердевает под действием лазера или УФ-лампы.

3.6.1. Печать по технологии QuickCast

Технология QuickCast позволяет выращивать модели на стереолитографических 3D-принтерах, минуя изготовление литейной оснастки. Как и сама технология лазерной стереолитографии, QuickCast – разработка компании 3D Systems (рис. 3.13).



Рисунок 3.13 - Литейные модели, изготовленные по технологии QuickCast

Пластиковые модели выдерживают достаточно большие нагрузки, но существует риск их деформации или разрушения. При выжигании, независимо от материала, в модели остается зола – сухой остаток от выгорания пластика. Производители легко решают эту проблему, используя материал с низким зольным остатком (не более 0,01% от первоначального объема модели). Еще одну опасность представляет сам материал модели. Когда он запечатан в керамическую оболочку, при нагреве пластик выгорает не так быстро, как воск, и процесс прокалики может достигать 10-12 часов. Пластиковая модель внутри керамической оболочки нагревается и создает избыточное давление на саму форму. Песчаная керамическая форма имеет нулевую пластичность, и как только порог превышен, модель сильно давит на литейную оболочку.

Чтобы избежать термических напряжений при прокалике, и была разработана технология QuickCast. Наружные стенки модели печатаются целиком (примерно 1 мм толщиной, в зависимости от габаритов), а пустота, образующаяся внутри, заполняется *сотовой структурой*, которая генерируется программным обеспечением в автоматическом режиме еще до печати. При нагреве модель и оболочка давят друг на друга, и за счет тонкостенной структуры модель начинает складываться внутрь, предотвращая разрушение формы (рис. 3.14).

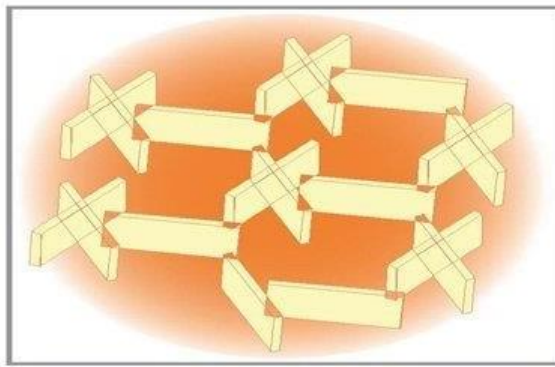


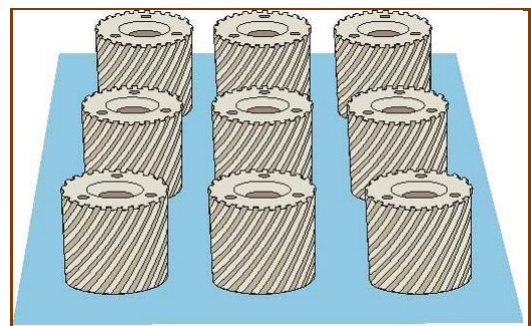
Рисунок 3.14 - Печать QuickCast-моделей

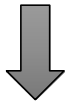
Преимущества QuickCast:

- высокая точность печати;
- значительная экономия времени и средств;
- отсутствие оснастки;
- экономичное использование материала и снижение массы модели;
- минимизация образования золы при выжигании модели из формы;
- предотвращение деформации в процессе термической обработки;
- минимальная постобработка;
- возможность малосерийного производства.

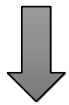
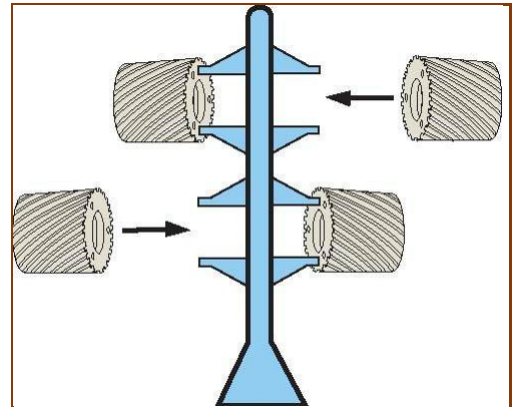
3.6.2. Этапы технологического процесса литья по выжигаемым моделям с применением литейных моделей, изготовленных по технологии QuickCast

1. Построение выжигаемых моделей в стереолитографическом 3D-принтере и их постобработка

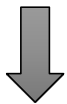
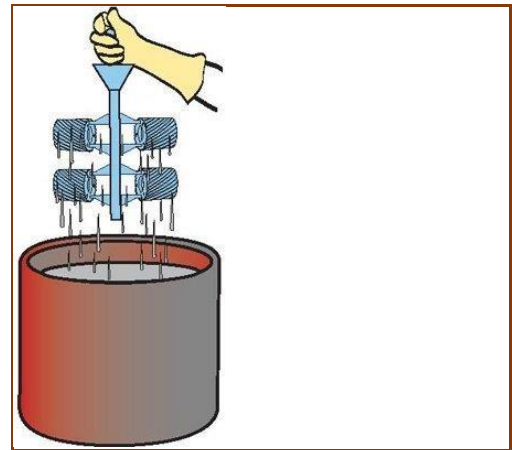




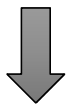
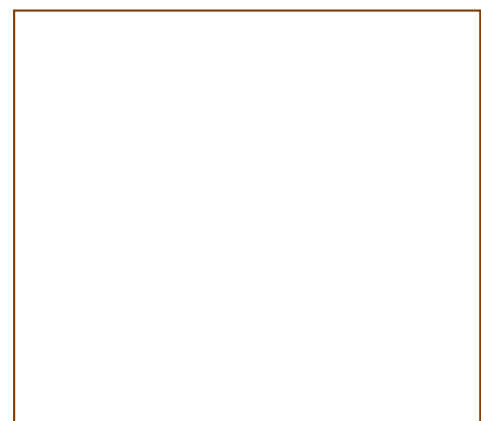
2. Крепление моделей к вертикальному
литниковому каналу



3. Создание оболочковой формы
методом погружения блока моделей в
огнеупорный керамический раствор

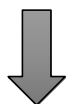
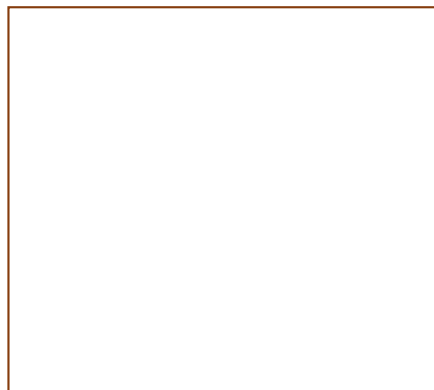


4. Покрытие оболочки мелким
керамическим огнеупорным песком.
Таких операций может быть несколько, в
зависимости от того, сколько слоев
твердой керамической оболочки нужно
получить

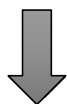
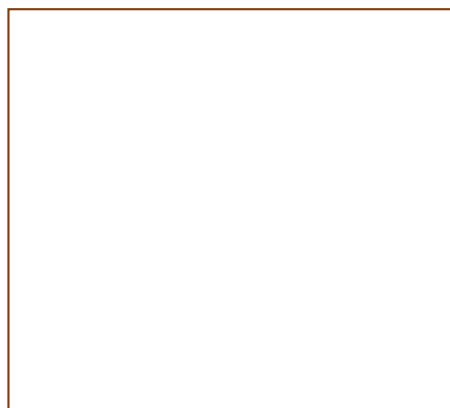




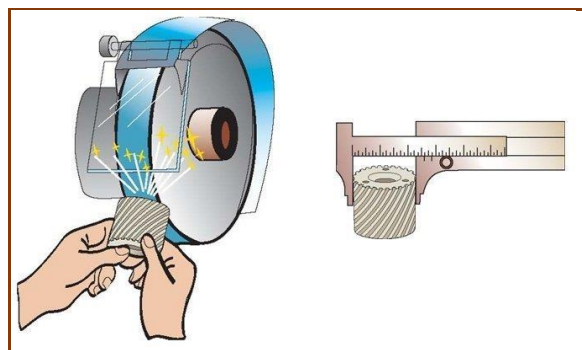
5. Выжигание моделей в прокалочной печи. Под воздействием температуры модель выгорает



6. Заливка жидкого металла в форму



7. Зачистка литников и проверка точности



Постобработка выжигаемых моделей включает: удаление поддержек, промывка, удаление материала из внутренней структуры, закрытие дренажа. Поскольку модель пустотелая, внутри остается материал. При печати создается отверстие, через которое материал будет вытекать. Когда модель опустошается, дренажные отверстия закрывают специальными средствами (например, паяльником и пластиковым присадком или литейным воском) (рис. 3.15).

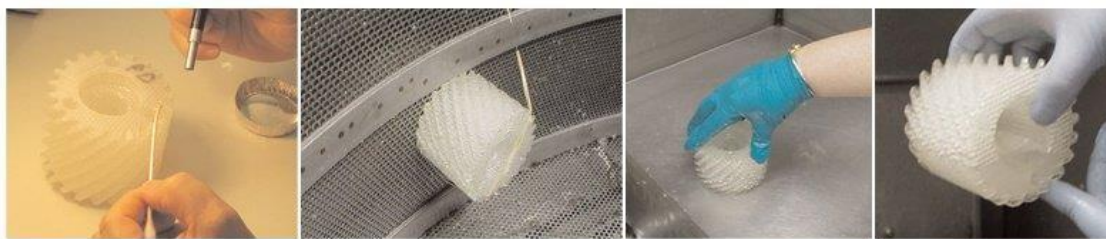


Рисунок 3.15 - Постобработка выжигаемых моделей

Технология QuickCast находит активное применение в различных отраслях. В России ее используют, среди прочих, крупные предприятия авиационной промышленности («Салют», «Сухой», УМПО), научные центры (НИАТ, НАМИ), энергетического машиностроения (Тушинский машиностроительный завод) (рис.3.16).



Рисунок 3.16 - Модель турбины, созданная на 3D-принтере

При производстве гидроагрегата на Тушинском машиностроительном заводе модель турбины собирают из сегментов, напечатанных на 3D-принтере.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение SLA -технологии.
2. Опишите принцип действия SLA –технологии.
3. Какой расходный материал используют при SLA-технологии?
4. Дайте определение DLP -технологии.
5. Опишите принцип действия DLP –технологии.
6. Какой расходный материал используют при DLP -технологии?
7. Дайте определение LCD -технологии.
8. Опишите принцип действия LCD –технологии.
9. Какой расходный материал используют при LCD -технологии?
10. Для чего необходимо дополнительное отверждение изделия в ультрафиолетовой печи в процессе 3D-печати по технологии стереолитографии?
11. Перечислите этапы изготовления прототипов методом стереолитографии.
12. Что включает в себя постобработка изделия, изготовленного по технологии стереолитографии?
13. Опишите технологию QuickCast.
14. Перечислите этапы технологического процесса литья по выжигаемым моделям с применением литейных моделей, изготовленных по технологии QuickCast

ТЕМА 4. ТЕХНОЛОГИЯ 3D ПЕЧАТИ МЕТОДОМ МНОГОСТРУЙНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

4.1. Нанесение на платформу печатающей головкой через большое количество форсунок жидкого фотополимера. Послойное отверждение ультрафиолетовым проектором

Многоструйное моделирование (или многоструйная печать) – одна из фундаментальных аддитивных технологий, которая основана на послойном построении объекта из воска или фотополимера. Этот метод разработан и запатентован компанией 3D Systems под названием MultiJet Printing (MJP). Другое название технологии – MultiJet Modeling (MJM).

Одна из особенностей MJP, которая сближает ее с лазерной стереолитографией (SLA), – наличие так называемых поддержек (поддерживающих структур) для выступающих или нависающих элементов детали, предназначенной для 3D-печати. По завершении построения в 3D-принтере поддержки с легкостью удаляются.

Основные области применения MJP-технологии: литейное производство; ювелирное дело; медицина (в том числе стоматология); автомобильная промышленность; потребительские товары.

С помощью многоструйного моделирования создают функциональные модели для проверки на собираемость; прототипы; модели для испытаний; концептуальные модели для утверждения дизайна; оснастку; выжигаемые и выплавляемые модели (рис. 4.1).



Рисунок 4.1 - Изделия, создаваемые с помощью многоструйного моделирования

Главное достоинство технологии – способность обеспечить высочайшее качество и идеальную гладкость поверхности готовых изделий (рис. 4.2).

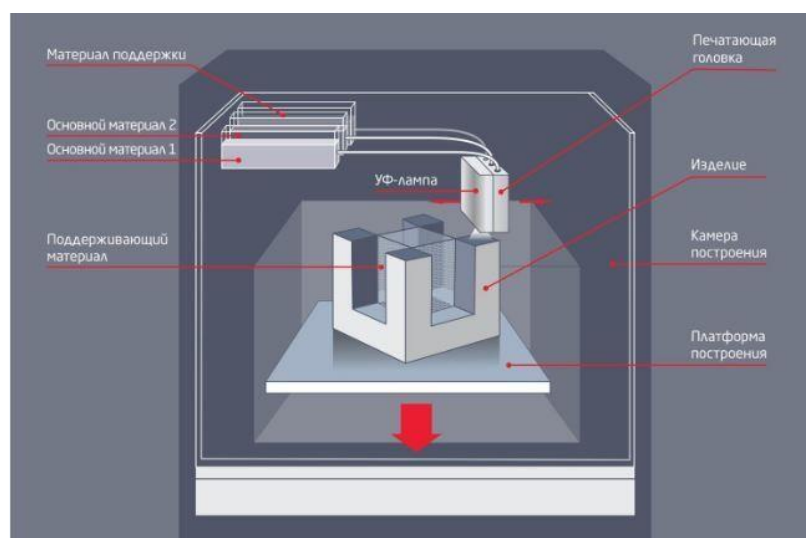


Рисунок 4.2 - Схема 3D-принтера, использующего технологию многоструйной печати

Принцип действия технологии многоструйной печати

1. Трехмерная модель рассекается в программном обеспечении CAD на горизонтальные слои, которые затем отправляются на печать.
2. Технология MJP функционирует по аналогии с обычной струйной печатью. Слой наносится печатающей головкой, оснащенной множеством мельчайших сопел, через которые на горизонтальную платформу подается модельный материал. Число сопел в разных моделях 3D-принтеров варьируется от 96 до 448. Печатающая головка напыляет материал по контурам слоя модели. Еще одна головка предназначена для разравнивания каждого нового слоя.
3. Воск или фотополимер расплавляется в подогреваемом при температуре 80 С картридже еще до попадания в печатающую головку.
4. После нанесения слоя фотополимер подвергается засвечиванию ультрафиолетовой лампой и затвердевает. Модель, напечатанная из воска, охлаждается естественным путем.

5. Заключительный этап – удаление поддерживающих структур. Если модель печатается из воска, поддержку удаляют специальным раствором. При использовании фотополимера изделие помещается в печь, где поддержка выплавляется при высокой температуре (примерно 60 С). Сложным изделиям требуется дополнительная обработка в ультразвуковой ванне.

В устройствах многоструйной печати применяют термопластики, восковые и фотополимерные материалы.

При печати воском для изделия подбирают более твердый, а для поддержек – более мягкий или легкоплавкий воск. Полученные объекты идеальны для изготовления литевых форм.

Что касается фотополимеров, многообразие свойств делает эти материалы по-настоящему универсальными. Фотополимерные модели могут иметь различные цвета, быть эластичными и жесткими, матовыми и прозрачными, композитными, термостойкими, биосовместимыми, схожими по свойствам с полипропиленом и ABS-пластиками и обладать многими другими характеристиками.

Достоинства многоструйной печати:

- точность построения и исключительно качественная детализация изделий (толщина слоя – от 13 до 32 микрон);
- высокая скорость получения моделей;
- широкий выбор и высокое качество модельных материалов.

Недостатки многоструйной печати:

- возможность использования преимущественно в функциональном прототипировании;
- уязвимость модели к действию прямых солнечных лучей;
- относительно высокая стоимость расходных материалов.

4.2. Печать высококачественных и детализированных прототипов

Технология многоструйного моделирования (MJM - Multi Jet Modeling) - это метод многоструйного выращивания прототипов. 3D печать MJM предназначена для высококачественного прототипирования полнофункциональных узлов, деталей и других различных объектов.

Изготовление прототипов методом многоструйного моделирования проходит в несколько этапов:

1. Моделирование изделия на компьютере.
2. Подготовка модели к печати.
3. Изготовление опытного образца.
4. Постобработка изделия.
5. Тестирование полученной модели на соответствие различным требованиям.
6. Доработка изделия при необходимости.

Моделирование изделия на компьютере включает в себя проектирование изделия в системах автоматизированного проектирования. Особенностью изготовления прототипов методом многоструйного моделирования является возможность использования нескольких материалов в одной детали. Важной особенностью будет являться соответствие количества используемых материалов количеству элементов в одной CAD-модели изделия. Они должны быть равны по количеству! *(Например, если моделируется ролик с твердой основой и упругой поверхностью, то CAD-файл ролика должен состоять из двух частей – твердой основы ролика и его упругой поверхности).* Таким образом, подготовка файлов для данного вида прототипирования должна производиться только в профессиональных системах твердотельного моделирования с последующей конвертацией в полигональный формат.

Подготовка модели к печати включает в себя создание управляющей программы, в которой задаются параметры качества печати, производится разбивка детали на слои.

Изготовление опытного образца включает в себя печать прототипа на 3D-принтере в соответствии с созданной управляющей программой.

Постобработка изделия, изготовленного по MJM-технологии, включает очистку и промывку прототипа от слоев поддержки; постотверждение детали в ультрафиолетовой камере.

Далее, после просушки, следует удаление поддерживающих структур. Если модель печатается из воска, поддержку удаляют специальным раствором. При использовании фотополимера изделие помещается в печь, где поддержка выплавляется при высокой температуре (примерно 60° C). Сложным изделиям требуется дополнительная обработка в ультразвуковой ванне.

Тестирование модели полученной методом многоструйного моделирования на соответствие различным требованиям к изделию должны учитывать внешний вид, геометрические размеры, химический состав, механические свойства, пористость.

Доработка изделия необходима при обнаружении недостатков в конструкции прототипа и при несоответствии количества используемых материалов количеству элементов в одной CAD-модели изделия.

4.3. Печать моделей для литья по выжигаемым и выплавляемым моделям

Технологический процесс литья по выжигаемым моделям схож с другой технологией точного литья, основанной на выплавлении воска. Основное отличие

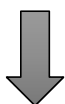
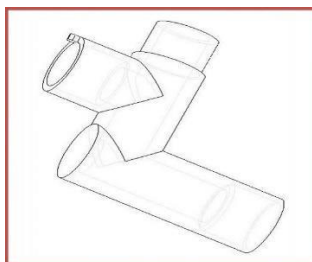
– в материале для 3D-печати, используемом для изготовления форм: при выжигании применяется пластик (фотополимерная смола). Литье по выплавляемым моделям – процесс более точный, идеальный для создания небольших объектов с мелкими деталями (например, ювелирных изделий, стоматологических имплантатов). Если требуется получить модели больших размеров и повышенной прочности, применяется выжигание. Также надо отметить, что фотополимеры экономичнее воска.

Выращивание выжигаемых моделей на 3D-принтере производится методом многоструйного моделирования (MultiJet Printing, MJP) с помощью фотополимерного материала сопоставимо с лазерной стереолитографии (Stereolithography Apparatus, SLA) – когда жидкий фотополимер затвердевает под действием лазера или УФ-лампы.

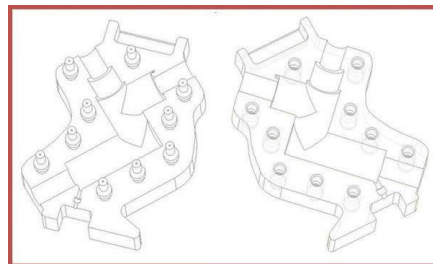
Печать методом многоструйного моделирования применяют при изготовлении литьевых форм, которая затем заливается силиконом. В силиконовую форму можно заливать любой другой материал, в данном случае это полиуретан. В результате предприятие получает своего рода форму для форм – не просто прототип, а опытный образец, готовый к использованию.

Процесс изготовления литьевой формы

1. 3D-модель разветвителя



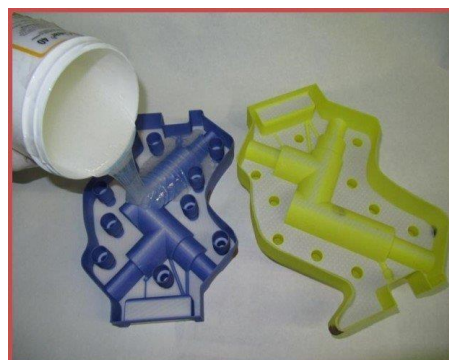
2. 3D-модель литейной формы из двух частей



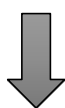
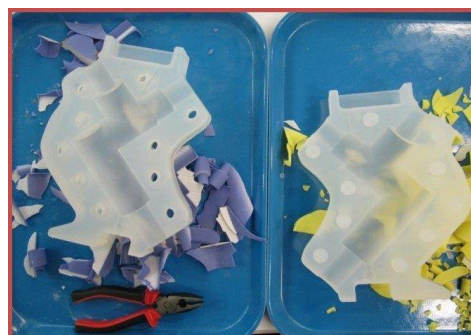
3. Мастер-форма, напечатанная на 3D-принтере



4. Процесс заливки силиконом



5. Извлечение формы. Силиконовая форма в точности повторяет геометрию изделия



6. Сборка заливочной формы. Поскольку изделие имеет внутренние полости, они оформляются стержневой оснасткой. В форму вкладывается стержень, состоящий из трех частей. Конструкция собирается и ставится вертикально. Через трубку и штуцер (внизу) в полость заливается полиуретан



7. Процесс заливки полиуретаном



8. Извлечение готовой детали. Остается форма, которую можно использовать еще несколько сотен раз



КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение технологии многоструйного моделирования.
2. Опишите принцип действия технологии многоструйной печати.
3. Какой расходный материал используют в устройствах многоструйной печати?
4. Перечислите этапы изготовления прототипов методом многоструйного моделирования.
5. Что является важной особенностью изготовления прототипов методом многоструйного моделирования?
6. Что включает в себя постобработка изделия, изготовленного по технологии многоструйного моделирования?
7. Опишите процесс изготовления литевой формы.

ТЕМА 5. ТЕХНОЛОГИЯ 3D ПЕЧАТИ МЕТОДОМ СКЛЕИВАНИЯ ПОРОШКОВОГО МАТЕРИАЛА

ЦВЕТНОГО

5.1. Технология полноцветной струйной 3D-печати

Реалистичные цветные модели с высоким разрешением помогают оценить внешний вид конечного продукта. Создание подобных изделий стало возможным благодаря технологии полноцветной струйной 3D-печати, запатентованной компанией 3D Systems под названием ColorJet Printing (CJP).

Технология основана на послойном склеивании гипсового порошка специальным клеящим составом и применяется для прототипирования моделей смешанной цветовой гаммы, сложной формы или фактуры, а также для выпуска небольших партий продукции (рис. 5.1).



Рисунок 5.1 - Изделия, полученные методом CJP

CJP используется в промышленном производстве, архитектуре, изготовлении сувенирной продукции, производстве потребительских товаров. На сегодня это самый распространенный метод полноцветной 3D-печати.

Если говорить о практических задачах, которые решает технология ColorJet Printing, то к ним относятся:

- создание архитектурных и строительных макетов для демонстрации идеи заказчику;
- изготовление демонстрационных образцов в прототипировании, дизайне, производстве;
- макетирование в образовательных или медицинских целях;
- проверка на собираемость несложных сборочных изделий;

- контроль эргономики и внешнего вида изделий на ранних стадиях производства;
- проверка восприятия товара фокус-группами.

Технология ColorJet Printing заключается в использовании двух компонентов — базового и связующего.

Основной компонент, мелкодисперсный композитный материал, запатентован и носит название VisiJet PXL Core, обладающий отличной цветопередачей. Из него возводятся слои модели. Им также наполняется рабочая камера.

Связующий элемент «срачивает» частички основного материала, придавая форму и цвет модели. CJP-принтеры компании 3D Systems используют связующие материалы ColorBond (для упрочнения цветных моделей), StrengthMax (высокопрочная пропитка для функциональных моделей) или Salt Water Cure (экологическая пропитка повышенной прочности поверхностных слоев).

Рассматриваемый метод полноцветной 3D-печати имеет следующие преимущества:

- скорость печати;
- широкая цветопередача (390000 оттенков);
- отсутствие поддерживающих структур;
- низкая себестоимость;
- безотходное использование;
- точность (минимальный размер топологического элемента – 0,1 мм);
- легкость в эксплуатации.

5.2. Раскатывание ракелем или роликом по рабочей поверхности.

Нанесением на слой специального связующего вещества. Склеивание в цельную деталь

3D-принтер, в котором реализована CJP-технология, состоит из двух основных блоков – камеры построения для основного материала и камеры очистки для удаления лишнего материала. В некоторых моделях 3D-принтеров камера очистки поставляется в качестве дополнительного оборудования (рис. 5.2).

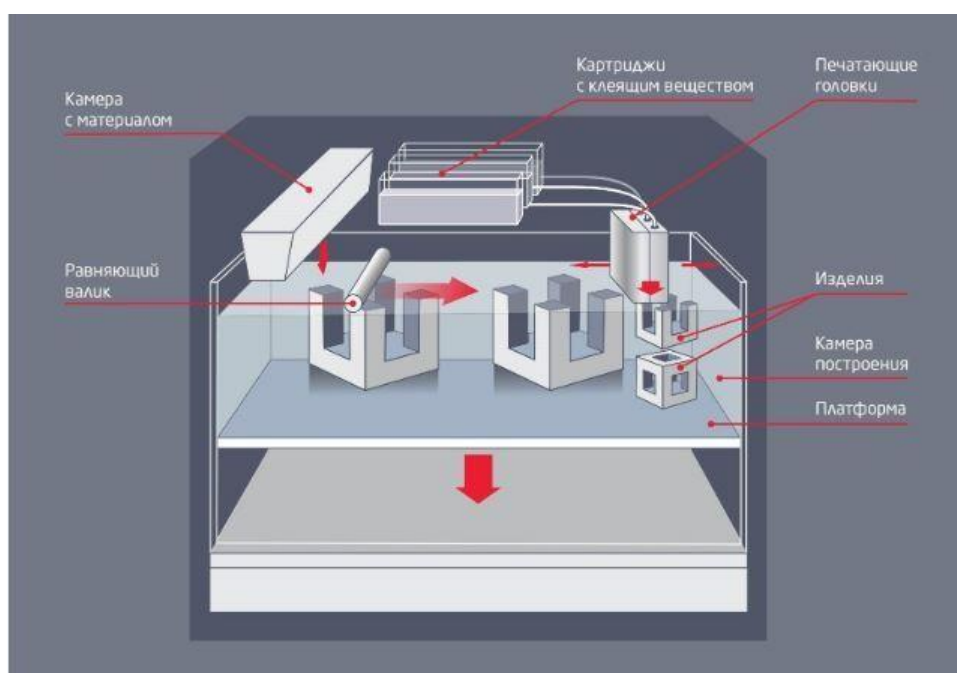


Рисунок 5.2 - ColorJet Printing: конструкция 3D-принтера

Одна из особенностей технологии заключается в том, что в процессе печати не задействуются поддержки. Поддерживающей структурой для модели служит несклеившийся порошок, который удаляется в камеру очистки и может быть использован в очередной сессии 3D-печати.

Этапы технологического процесса полноцветной струйной 3D-печати:

1. 3D-модель изделия экспортируется из САПР в виде полигональной сетки, разделяется на поперечные сечения и выводится на дальнейшую печать.
2. Тонкий слой порошка подается на стол построения 3D-принтера и разравнивается ракелем или роликом.

3. Сверху на порошок выборочно наносится связующее вещество.
4. Камера опускается ниже на уровень слоя (0,1016 мм), наносится следующий слой порошка.
5. Процесс повторяется до тех пор, пока не завершится построение детали.
6. Далее лишний порошок выкачивается из камеры 3D-принтера встроенной вакуумной системой, и готовая деталь извлекается.

Объекты, полученные методом SLP-печати, хрупкие, после создания требуется аккуратная постобработка. После постобработки их достаточно пропитать специальными составами – цианокрилатом или эпоксидной смолой, чтобы повысить прочность готового прототипа. Изделия, пропитанные цианокрилатом, высыхают очень быстро – в среднем за полчаса, но несколько уступают в прочности деталям, обработанным эпоксидной смолой. Она высыхает дольше – до суток, однако изделия становятся твердыми.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение технологии полноцветной струйной 3D-печати.
2. Опишите принцип действия технологии многоструйной печати.
3. Какой расходный материал используют в устройствах полноцветной струйной 3D-печати?
4. Перечислите этапы изготовления прототипов методом полноцветной струйной 3D-печати.
5. Что включает в себя постобработка изделия, изготовленного по технологии полноцветной струйной 3D-печати?

ТЕМА 6.

ТЕХНОЛОГИЯ 3D ПЕЧАТИ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЕКАНИЯ

6.1. Технология селективного лазерного спекания

SLS (Selective Laser Sintering) – селективное лазерное спекание, одна из наиболее широко применяемых аддитивных технологий. Принцип действия SLS заключается в точечном спекании пластиковых порошков с разными компонентами лазерным лучом. Также существуют машины, которые спекают порошковый металл. Мощность луча в производственных 3D-принтерах варьируется от 30 до 200 ватт.

Технология 3D-печати по технологии SLS широко применяется в авиакосмической промышленности; машиностроении; литейном производстве; строительстве; в архитектуре, искусстве, дизайне.

Селективное лазерное спекание используется при изготовлении: функциональных прототипов; продукции мелкосерийного производства; моделей для точного литья по выплавляемым моделям; шлангов труб, прокладок, изоляционных шайб и других элементов в инженерии и строительстве; деталей силовых установок (рис. 6.1).



Рисунок 6.1 - Изделия, полученные методом SLS

Модели и прототипы, созданные методом SLS, имеют превосходные механические характеристики: они отличаются прочностью, гибкостью, хорошей детализацией и термической стабильностью. В плане прочности полученных изделий селективное лазерное спекание конкурирует с традиционными способами производства, такими как литье под давлением.

Благодаря широкому ассортименту материалов технология SLS достаточно универсальна. Сюда входят однокомпонентные порошки или порошковые смеси из различных материалов, таких как: полиамидные порошки (PA11, PA12, TPU и др.); модифицированные порошки (стеклонаполненные, керамонаполненные и др.); BIO-совместимые полиамиды.

Преимущества SLS-технологии:

- при построении геометрически сложных деталей не используется материал поддержки. В роли поддерживающей структуры выступает порошок, не подвергшийся воздействию лазерного луча;
- широкий выбор материалов;
- возможность моделировать сложнейшую геометрию;
- значительная экономия времени на сборку;
- большой объем камер построения;
- высокая скорость печати.

Недостатки SLS-технологии:

- Напечатанные детали требуют охлаждения в течение довольно долгого времени, вплоть до 12 ч., что замедляет производственный процесс.
- Высокая пористость поверхности напечатанных моделей, требуется не очень простая постобработка.
- Частые проблемы в ходе печати – усадка и деформация моделей.
- Образуется много отходов порошка, которые не подлежат переработке.
- Особые требования к помещению и условиям эксплуатации (главное – это фильтрация воздуха при кондиционировании, так как порошок вреден).

6.2. Разравнивание порошка ракелем по рабочей поверхности.

Заштриховывание контура детали при помощи импульсного излучения.

Воздействие высокоэнергетического лазерного луча для спекания шаровидных пластиковых гранул между собой

3D-принтеры, работающие по технологии SLS, имеют гибкие настройки. В зависимости от поставленных задач регулируются такие параметры, как температура, глубина и время воздействия. Также пользователь может задать работу либо только с переходными границами, либо спекание по всей глубине модели (рис. 6.2).

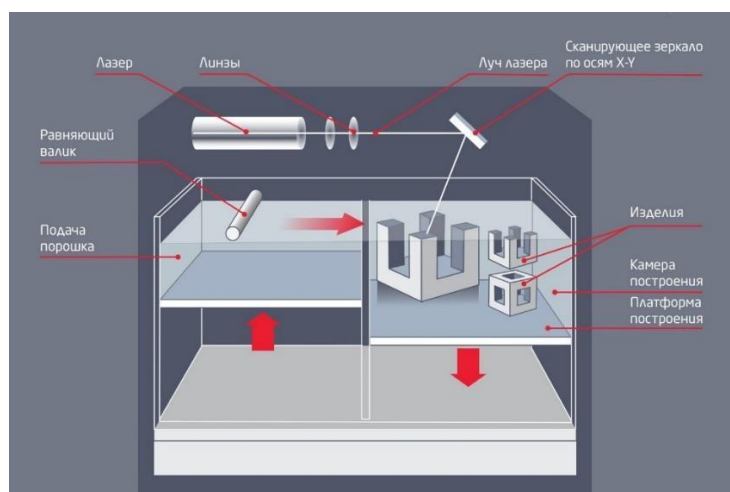


Рисунок 6.2 - Схема SLS-технологии

Технологический процесс селективного лазерного спекания:

1. Технологический процесс начинается с разогревания материала до температуры, близкой к температуре плавления, что обеспечивает более быструю работу порошкового 3D-принтера.
2. Порошок подается в камеру построения и разравнивается ракелем или валиком на толщину минимального слоя материала.
3. Лазерный луч спекает слои порошка в необходимых участках, совпадающих с сечением 3D-модели.
4. Подается следующий слой порошка, камера построения опускается на уровень ниже.
5. Процедура повторяется, пока не получится готовое изделие.

По завершении процесса построения может потребоваться финишная обработка. Для придания изделию идеально ровной формы выполняют полировку или шлифовку. Однако по мере усовершенствования технологий потребность в постобработке изделий, изготовленных на SLS-принтерах, становится все менее актуальной.

6.3. Создание конечных изделий сложной геометрии. Легковесные конструкции. Функционально интегрированные детали

Селективное лазерное спекание (SLS) — это технология аддитивного производства, в которой используется мощный лазер для спекания мелких частиц полимерного порошка в прочную структуру на основе 3D-модели.

3D-печать по технологии SLS была популярна среди инженеров и производителей на протяжении десятилетий. Благодаря низкой себестоимости модели, высокой производительности и распространенным материалам эта технология отлично подходит для решения широкого спектра задач: от быстрого прототипирования до производства в малых объемах, изготовления ограниченных пробных партий или создания изделий по индивидуальному заказу.

Создание изделий методом селективного лазерного спекания проходит в несколько этапов:

1. Моделирование изделия на компьютере.
2. Подготовка модели к печати.
3. Изготовление опытного образца.
4. Постобработка изделия.
5. Тестирование полученной модели на соответствие различным требованиям.
6. Доработка изделия при необходимости.

Моделирование изделия на компьютере включает в себя проектирование изделия в системах автоматизированного проектирования и сохранение модели в форматах .m3d и .stl.

Подготовка модели к печати включает в себя создание управляющей программы, в которой нарезаем модель на слои, оцениваем время печати, располагаем объекты в заданном порядке, настраиваем параметры печати (рис. 6.3).

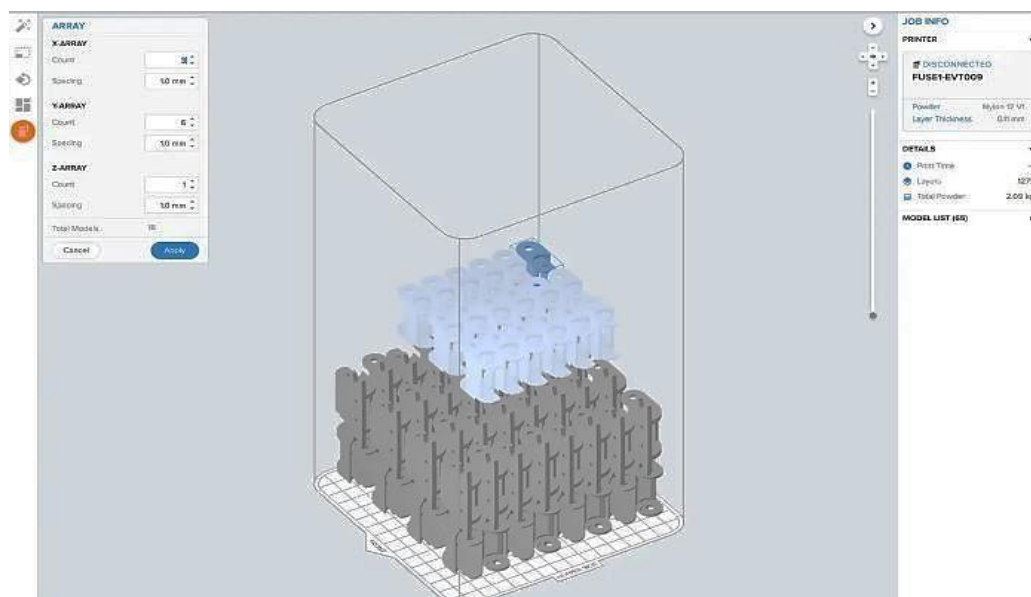


Рисунок 6.3 - Подготовка модели к печати

Изготовление опытного образца включает в себя печать прототипа на 3D- принтере в соответствии с созданной управляющей программой (рис. 6.4).

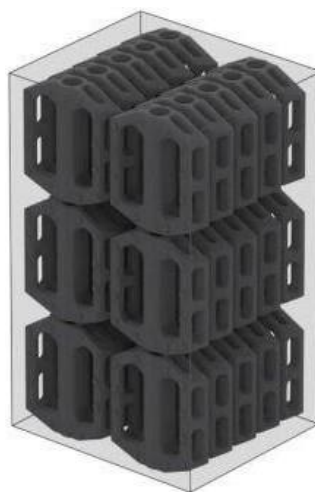


Рисунок 6.4 – Опытный образец изделия

Постобработка изделия, изготовленного по SLS-технологии не предполагает использования поддержек, и включает в себя, извлечение из камеры остывшей модели, очищение от остаточного порошка. Для удаления зернистости с

поверхности необходима галтовочная или струйная обработка. Модели можно окрашивать пульверизатором, лакировать, покрывать электролитическим или другим способом для получения нужного цвета, качества поверхности и свойств, например, водонепроницаемости (специальное покрытие) и электропроводности (электролитическое покрытие).

Лишний порошок, оставшийся после создания модели, фильтруют, чтобы удалить из него крупные частицы. После этого его можно переработать. Под воздействием высокой температуры свойства неспекшегося порошка слегка ухудшаются, поэтому для последующей печати его нужно смешивать с новым материалом. Обычно в технологии SLS применяются отдельные устройства для восстановления, хранения и смешивания порошка.

Тестирование модели полученной методом селективного лазерного спекания на соответствие различным требованиям к изделию должны учитывать внешний вид, геометрические размеры, химический и фазовый составы, механические свойства; предел текучести или временное сопротивление и относительное удлинение, пористость.

Доработка изделия, изготовленного по технологии SLS необходима при обнаружении недостатков в конструкции.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение технологии селективного лазерного спекания.
2. Какой расходный материал используют в устройствах селективного лазерного спекания?
3. Опишите технологический процесс селективного лазерного спекания.
4. Опишите этапы создания изделий методом селективного лазерного спекания.
5. Что включает в себя постобработка изделия, изготовленного по технологии селективного лазерного спекания?

ТЕМА 7. ТЕХНОЛОГИЯ 3D ПЕЧАТИ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ

СЕЛЕКТИВНОГО

7.1. Селективное (выборочное) лазерное плавление

SLM (Selective Laser Melting) – селективное (выборочное) лазерное плавление – новаторская технология изготовления сложных по форме и структуре изделий из металлических порошков по математическим CAD-моделям. Этот процесс заключается в последовательном послойном расплавлении порошкового материала посредством мощного лазерного излучения.

SLM открывает перед современными производствами широчайшие возможности, так как позволяет создавать металлические изделия высокой точности и плотности, оптимизировать конструкцию и снизить вес производимых деталей.

Селективное лазерное плавление – одна из технологий 3D-печати металлом, которые способны с успехом дополнять классические производственные процессы. Оно дает возможность изготавливать объекты, превосходящие по физико-механическим свойствам продукты стандартных технологий. С помощью SLM-технологии можно создать уникальные сложнопрофильные изделия без использования механической обработки и дорогой оснастки, в частности, благодаря возможности управлять свойствами изделий.

Селективное лазерное плавление призвано решать сложные задачи на авиакосмических, энергетических, нефтегазовых, машиностроительных производствах, в металлообработке, медицине и ювелирном деле.

Селективное лазерное плавление находит применение в промышленности для изготовления компонентов разнообразных агрегатов и узлов; конструкций сложной формы и структуры, включая многоэлементные и неразборные; штампов; деталей пресс-форм; прототипов; ювелирных изделий; имплантатов и протезов в медицине и стоматологии (рис. 7.1).



Рисунок 7.1 - Примеры применения технологии селективного лазерного плавления

Наиболее популярными материалами при селективном лазерном плавлении являются порошковые металлы и сплавы, включая нержавеющую сталь, инструментальную сталь, кобальт-хромовые сплавы, титановые сплавы, титан, алюминий, золото, платина и др.

Преимущества технологии селективного лазерного плавления:

- высокая точность и повторяемость;
- механические характеристики изделий, напечатанных на этом типе 3D-принтера, сравнимы с литьем;
- решение сложных технологических задач, связанных с изготовлением геометрически сложных изделий;
- построение сложнопрофильных деталей без использования оснастки;
- уменьшение массы изделия за счет построения объектов с внутренними полостями;
- экономия материала при производстве.

Недостатки технологии селективного лазерного плавления:

- высокие затраты на изготовление;
- детали требуют последующей обработки, такой как удаление порошка, удаление опор и шлифовка поверхности;
- размер в настоящее время ограничен одним метром;
- большое потребление электроэнергии, в следствие использования лазера.

7.2. Разравнивание порошка ракелем по рабочей поверхности.

Заштриховывание контура детали при помощи импульсного излучения

При селективном лазерном плавлении все параметры процесса устанавливаются производителем. Высота слоя, используемого в 3D-печати металлами, варьируется от 20 до 50 микрон и зависит от свойств металлического порошка (текучести, гранулометрического состава, формы и т. д.).

Базовый размер области печати при SLM-технологии составляет 200 x 150 x 150 мм, но бывают и более большие размеры рабочего поля. Точность печати составляет от 50 - 100 микрон (рис. 7.2).

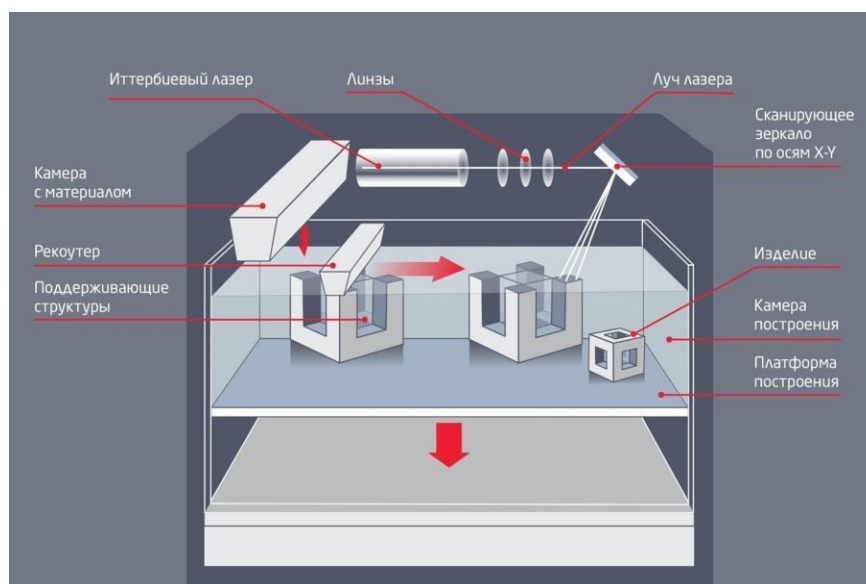


Рисунок 7.2 - Схема SLM-технологии

Технологический процесс селективного лазерного плавления:

1. Технологический процесс начинается с заполнения камеры инертным газом (аргоном или азотом) для минимизации окисления металлического порошка. Основной объем газа расходуется на начальном этапе, когда путем продувки из камеры построения удаляется весь воздух
2. Камеру нагревают до оптимальной температуры производства.
3. Металлический порошок наносится на плиту построения, которая закреплена на платформе построения и распределяется ракелем (рекоутером).

4. Лазерный луч направляется в направлениях X и Y с помощью двух высокочастотных сканирующих зеркал. Энергия лазера достаточно интенсивна, чтобы обеспечить полное плавление (сварку) частиц с образованием твердого металла.

5. После завершения формирования слоя, платформа построения опускается на толщину слоя и рекоутер наносит следующий слой порошка.

6. Процедура повторяется, пока не получится готовое изделие.

Когда камера построения остывает до комнатной температуры, неизрасходованный порошок удаляется, а детали подвергают дополнительной термической обработке для снятия остаточных напряжений, затем удаляют поддержки. Детали отделяют (спиливаются) от платформы построения и готовы к использованию или последующей обработке.

Обработка на станках ЧПУ может быть использована для критически важных элементов (таких как отверстия или резьбы). Пескоструйная обработка, металлизация и полировка могут улучшить качество поверхности.

7.3. Воздействие высокоэнергетического лазерного луча для спекания сферических с металлическим наполнением гранул между собой

Процесс, получивший название не прямое лазерное спекание металлов (IMLS), был разработан компанией DTMcorp of Austin в 1995 году. С 2001 года DTMcorp принадлежит компании 3D-Systems. В процессе непрямого лазерного спекания используют смесь порошка и полимера или порошок, покрытый полимером, где полимер выступает в роли связки и обеспечивает необходимую прочность для проведения дальнейшей термической обработки. На стадии термической обработки проводятся отгонка полимера, спекание каркаса и пропитка пористого каркаса металлом-связкой, в результате которой получается готовое изделие.

Для непрямого лазерного спекания можно использовать порошки как металлов, так и керамики или их смесей. Приготовление смеси порошка с полимером проводят механическим смешиванием, при этом содержание полимера составляет около 2-3 % (по массе), а в случае использования порошка, покрытого полимером, толщина слоя на поверхности частицы составляет около 5 мкм. В качестве связки используют эпоксидные смолы, жидкое стекло, полиамиды и другие полимеры. Температура отгонки полимера определяется температурой его плавления и разложения и в среднем составляет 400-650° С. После отгонки полимера пористость изделия перед пропиткой составляет около 40 %.

При пропитке печь нагревают на 100-200° С выше точки плавления пропитываемого материала, поскольку с повышением температуры уменьшается краевой угол смачивания и понижается вязкость расплава, что благоприятно влияет на процесс пропитки.

Обычно пропитку будущих изделий проводят в засыпке из оксида алюминия, которая играет роль поддерживающего каркаса, поскольку в период от отгонки полимера до образования прочных межчастичных контактов существует опасность разрушения или деформации изделия. Защиту от окисления организуют с помощью создания в печи инертной или восстановительной среды.

Для пропитки можно использовать довольно разнообразные металлы и сплавы, которые удовлетворяют следующим условиям. Материал для пропитки должен характеризоваться незначительным межфазным взаимодействием, или его полным отсутствием, малым краевым углом смачивания и иметь температуру плавления ниже, чем у основы. Обычно для пропитки металлического каркаса используют бронзу, при этом усадка изделия составляет 2-5 %.

7.4. Создание конечных изделий сложной геометрии

Селективное лазерное плавление (SLM) — это технология аддитивного производства, в которой используется мощный лазер для плавления частиц металлического порошка в прочную структуру на основе 3D-модели.

3D-печать по технологии SLM используют в промышленности для создания конечных инженерных продуктов. Селективное лазерное плавление металлических порошков незаменимо в процессах, требующих повышенной скорости воспроизведения в комплексе с хорошим качеством. Она оптимально подходит для печати высокопрочных изделий плотной структуры и сложной пространственной конфигурации, с перфорацией, внутренними каналами.

Создание изделий методом селективного лазерного плавления проходит в несколько этапов:

1. Моделирование изделия на компьютере.
2. Подготовка модели к печати.
3. Изготовление опытного образца.
4. Постобработка изделия.
5. Тестирование полученной модели на соответствие различным требованиям.
6. Доработка изделия при необходимости.

Моделирование изделия на компьютере включает в себя проектирование изделия в системах автоматизированного проектирования и сохранение модели в форматах .m3d и .stl (рис. 7.3).

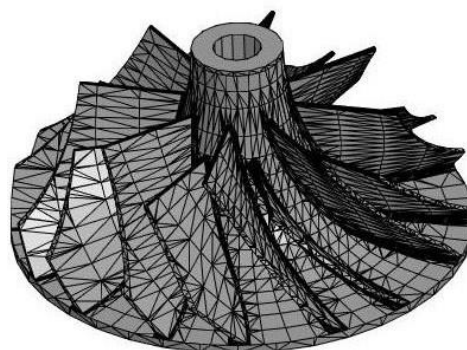
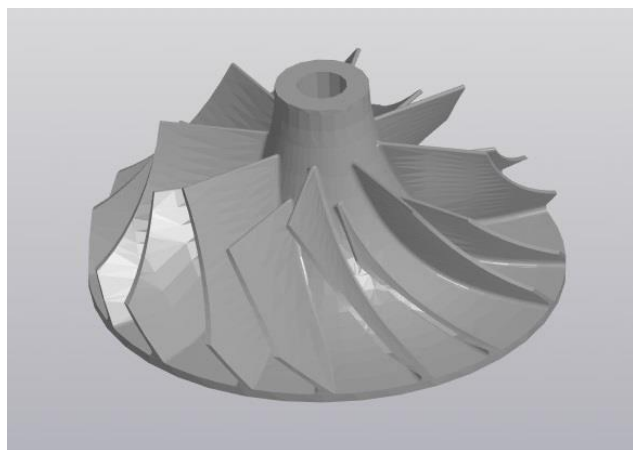


Рисунок 7.3 - Модели изделия в форматах .m3d - слева и .stl - справа

Подготовка модели к печати методом селективного лазерного плавления включает в себя создание управляющей программы. На данном этапе задается положение компонентов друг относительно друга на подложке построения, скорость построения, качество поверхности, пористость, некоторые физико-химические свойства металлов. Такой комплексный подход позволяет минимизировать расход материала, снизить затраты денег и времени на производственный процесс. Основываясь на полученной информации, программа станка самостоятельно подбирает векторы экспонирования и скорость процесса, мощность луча лазера, расстояние между штриховыми линиями, определяющими шаг обработки – толщину слоя (программа условно разбивает объект на отдельные слои).

При подготовке модели к печати необходимо уделить внимание структуре поддержки 3D-модели и ориентации изделия на рабочей платформе.

Опорные конструкции всегда требуются при печати металлом, из-за очень высокой температуры обработки. Они обычно строятся с использованием решетчатого узора. Поддержки в металлической 3D печати выполняют 3 функции: являются основанием для создания первого слоя детали, закрепляют деталь на платформе и предотвращают её деформацию, действуют как теплоотвод, отводя тепло от модели.

Детали часто ориентированы под углом. Однако это увеличит и объем необходимых поддержек, время печати, и в конечном итоге общие затраты.

Деформация также может быть сведена к минимуму с помощью шаблонов лазерного спекания. Эта стратегия предотвращает накопление остаточных напряжений в любом конкретном направлении и добавляет характерную текстуру поверхности детали.

Изготовление опытного образца включает в себя печать прототипа на 3D-принтере в соответствии с созданной управляющей программой (рис. 7.4).



Рисунок 7.4 – Опытные образцы изделия

Постобработка изделия, изготовленного по SLM-технологии включает в себя, удаление излишек порошка после охлаждения камеры построения до комнатной температуры и термообработку, чтобы снять любые остаточные напряжения. Затем изделия отделяют от плиты построения с помощью резки, механической обработки или электроэрозионной обработки и удаляют поддерживающие элементы.

При необходимости постобработка изделия может включать: токарную операцию, фрезерную операцию, шлифование, пескоструйную обработку. Шероховатость поверхности соответствует половине диаметра частиц металлического порошка стандартная около 15-16 мкм, пескоструйная обработка дает повышение класса шероховатости до 8-10 мкм.

Лишний порошок, оставшийся после создания модели, просеивают и применяют повторно.

Тестирование модели полученной методом селективного лазерного плавления на соответствие различным требованиям к изделию должны учитывать внешний вид, геометрические размеры, химический и фазовый составы, механические свойства; предел текучести или временное сопротивление, относительное удлинение, ударную вязкость и пористость.

Доработка изделия, изготовленного по технологии SLM необходима при обнаружении недостатков в конструкции.

7.5. Изготовление форм для литья пластика

Пластмассовые платы производятся в больших количествах методом литья под давлением с использованием сложных пресс-форм с несколькими закаленными литьевыми полостями. Для достижения качества деталей на одном уровне с прототипами могут быть использованы мастер-модели. Эти мастер-модели представляют собой пресс-формы, созданные с использованием профилирующей вставки. Профилирующую вставку можно получить путем быстрого прототипирования (например, фрезерованием вставки из алюминия) или спомощью лазерного спекания или плавления лазерным лучом.

Профилирующие вставки изготавливают с использованием различных процессов, таких как селективное лазерное спекание, прямое лазерное спекание металла (DMLS), селективное лазерное плавление (SLM) или лазерная наплавка. Минимальная толщина слоя, достижимая на сегодня, составляет 20 мкм. Профилирующие вставки, полученные таким образом, могут быть интегрированы в мастер-форму. Преимущество этих профилирующих вставок заключается в том, что они идеально подходят для получения небольших литьевых полостей сложных форм. Поскольку используется аддитивный производственный процесс, стоимость возрастает пропорционально объему полости, но не степени сложности ее формы. Следовательно, процессы лазерного спекания и плавления лазерным лучом в первую очередь подходят для изготовления небольших сложных геометрических объектов. С профилирующими вставками, изготовленными этими методами, могут быть использованы все коммерчески доступные термопласты. Тем не менее, срок службы полости, полученной посредством лазерного спекания или плавления лазерным лучом, ограничен, поэтому возможное количество отливоов значительно ниже, чем при использовании пресс-форм из закаленной стали.

Например, по расчетам компании FIT Truth Innovative Technologien, вставки, изготовленные DMLS-методом, рассчитаны на 500 отливоов. Срок службы пресс-формы можно значительно увеличить с помощью профилирующих вставок из специальных материалов.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение технологии селективного (выборочного) лазерного плавления.
2. Какой расходный материал используют в устройствах селективного лазерного плавления?
3. Опишите технологический процесс селективного лазерного плавления.
4. Опишите этапы создания изделий методом селективного лазерного плавления.
5. Какие функции выполняют поддержки при создании изделий методом селективного лазерного плавления?
6. Что включает в себя постобработка изделия, изготовленного по технологии селективного лазерного плавления?

ТЕМА 8. ПРОТОТИПИРОВАНИЕ В ИНДУСТРИИ

8.1. Выбор материала для приложения и метода проектирования

Выбор материала для конкретного приложения и метода проектирования базируется на следующем перечне технологий производства, в которых в качестве шаблонов можно использовать прототипы, созданные методом аддитивного производства:

- вулканизационное литье из силикона при комнатной температуре;
- вакуумное литье;
- формовое блочное литье;
- аэрозольное металлическое литье;
- литьевое прессование пластмасс;
- литье в песчаные формы из алюминия и черных металлов;
- литье по выплавляемым моделям.

Выбор технологии зависит от размеров и геометрии прототипа, типа материала функций, требуемой точности и количества компонентов, которые необходимо изготовить.

8.2. Конструирование и дизайн

Область применения аддитивных технологий и изготовления изделий методом быстрого прототипирования определяется достижимой точностью изготовления детали и механическими свойствами используемого материала — растяжимостью, твердостью и прочностью на разрыв. Варианты конструкторского применения прототипов можно разбить на три основные группы:

- прототипы для оценки проекта;
- прототипы для функциональной оценки;
- модели для дальнейшего производственного процесса.

Прототипы для оценки проекта. Современные системы твердотельного моделирования упрощают оценку проекта благодаря наличию таких функций, как просмотр, затенение, вращение и увеличение. Однако не подлежит сомнению, что проект можно оценить более адекватно, когда конструктор может потрогать и поддержать в руках физический прототип конструкции. Даже несмотря на огромный опыт в чтении чертежей или CAD-изображений сложных объектов, отчетливо представить себе, как будет выглядеть реальная деталь, — очень сложная задача. Такие особенности, как слепые отверстия, сложные внутренние каналы и поверхности сложной кривизны, зачастую трудно интерпретировать. Сокращение количества ошибок за счет улучшенной визуализации детали может быть значительным. Нет лучшего способа удостовериться в том, что сложная деталь имеет именно те свойства, которые планировались, чем поддержать ее в руках, повертеть и посмотреть на нее со всех сторон. Физический объект необходим, в частности, для эстетической оценки дизайна.

Прототипы для функциональной оценки. Когда проект готов, конструктор должен удостовериться, что он обеспечивает выполнение всех функций, которые предполагались изначально. Простая функциональная оценка может включать проверку практичности сборки, кинематических и аэродинамических характеристик. Часто бывает необходимо проверить, можно ли легко собрать продукт из составляющих или разобрать его для обслуживания. Нередко оказывается, что

собрать продукт можно лишь с большими трудностями, а порой и вовсе невозможно. Возможность сборки простых конструкций или ее простоту можно оценить, глядя на чертеж. Однако на практике принято выполнять такую проверку путем реальной сборки. В этом случае прототипы, создаваемые методом быстрого прототипирования, оказываются весьма полезными, поскольку компоненты, сделанные из другого материала, являются тем не менее достаточно адекватными для выполнения сборки. Использование прототипов вместо реальных компонентов дает значительную экономию времени и средств.

При тестировании кинематических характеристик проверяется, функционируют ли движущиеся части сборной конструкции так, как это задумывалось. Движению деталей часто препятствуют неожиданные помехи или другие компоненты сборки. Поскольку кинематические характеристики могут быть проверены на компонентах, не имеющих такой степени прочности, какая требуется для конечного продукта, прототипы, изготовленные методом аддитивных технологий, снова оказываются полезными.

Прототип, созданный посредством быстрого прототипирования, можно использовать также для проверки аэродинамических характеристик конструкции путем ее продувки в аэродинамической трубе. Ключевую роль в определении аэродинамических характеристик детали играет ее геометрическая форма, поэтому здесь подойдет прототип, изготовленный из другого материала. Однако для проверки других характеристик — прочности, пределов рабочей температуры, усталости и коррозионной устойчивости — требуется, чтобы прототип был сделан из того же материала, что и оригинальная конструкция.

Модели для дальнейшего производственного процесса. Сейчас опробован ряд подходов, позволяющих относительно быстро и рентабельно пройти путь от прототипа до реальной функциональной детали.

Значительные преимущества обеспечивает, например, сочетание изготовления моделей для литья. В этом случае литейная модель и стержни изготавливают по аддитивной технологии и используют так же, как деревянные модели и обычные стержни. Модели могут использовать также для копирования.

8.3. Построение моделей в архитектуре

Компьютерное моделирование нетиповых 3D-объектов доступно только специалистам, знакомым с профессиональными системами автоматизированного проектирования.

На архитектурном макете можно проводить тесты еще до того, как будет готов окончательный вариант плана застройки. Более того, реально изготовление прототипов зданий, над которыми проводятся такие тесты, которые на готовом изделии не проведешь. Например, можно использовать прозрачную пластиковую модель системы водоснабжения при проектировании нетиповых сооружений, таких как вращающийся небоскреб или студии с изменяемым внутренним объемом.

Внутренняя структура зданий, несущие конструкции, наполнение этажей техническими решениями также могут быть спроектированы на стадии моделирования (рис. 8.1-8.3).



Рисунок 8.1 - Проектирование здания физкультурно-оздоровительного комплекса

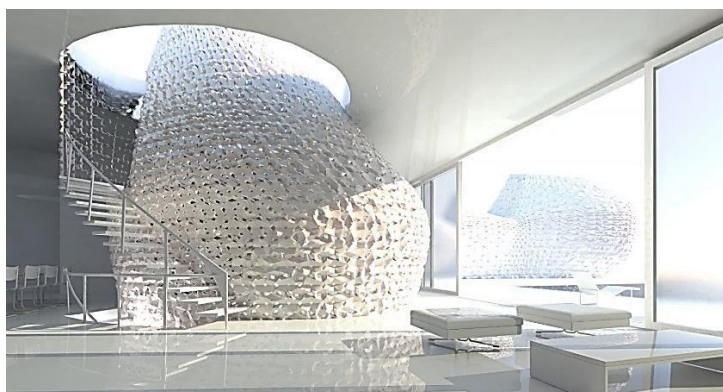


Рисунок 8.2 - Моделирование внутренней отделки дома

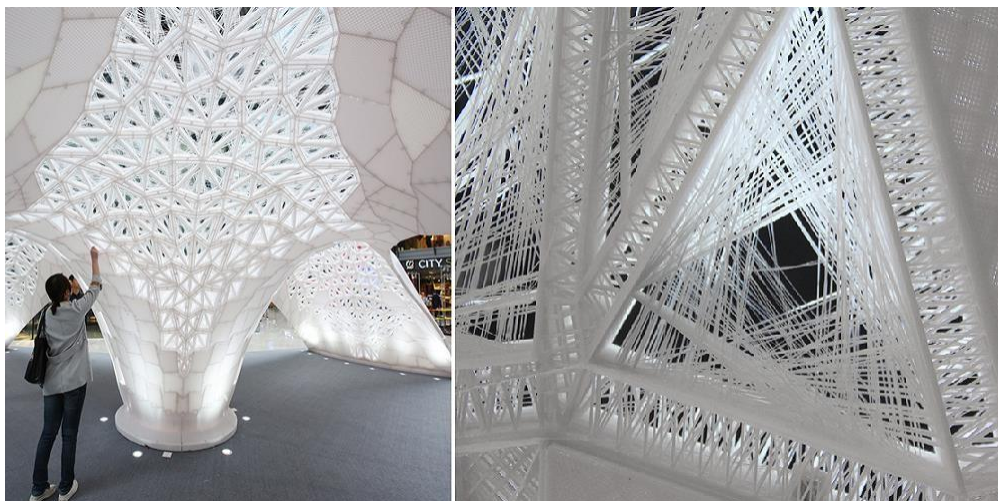


Рисунок 8.3 - Новые модернистские решения в архитектуре.

Павильон напечатанный на 3D принтере (Пекин)

Первый в России напечатанный жилой коттедж был возведен еще в 2017 году г. Ступино. Дом площадью 38 м² создан при помощи строительного 3D-принтера иркутской компании Aris Cor (рис. 8.4).



Рисунок 8.4 - Первый 3D-напечатанный дом в России (г. Ступино)

На строительство стен потребовалось всего лишь 24 часа. Остальные работы (монтаж кровли и окон, внутренняя и внешняя отделка) заняли еще около трех недель. Строительство «под ключ» (включая фундамент, стены, перекрытия, кровлю, электропроводку, двери и окна, наружную и внутреннюю отделку) обошлось в сумму 593,6 тыс. руб. В расчете не учитывалась цена работ некоторых специалистов.

8.4. Примеры применений в машиностроении, анализ и планирование

Практически в любой отрасли машиностроения технологии аддитивного производства смогут оказаться полезными.

Конструкция нового блока гидравлических клапанов, разработанного компаниями VTT и Nurmi Cylinders, была оптимизирована с использованием технологии селективного лазерного плавления (SLM), позволившей значительно сэкономить вес, объем и материал. В результате было создано изделие, вес которого на 66% меньше исходной модели. Благодаря инновационному дизайну удалось оптимизировать поток жидкости по внутренним каналам и решить проблему утечки (рис. 8.5).

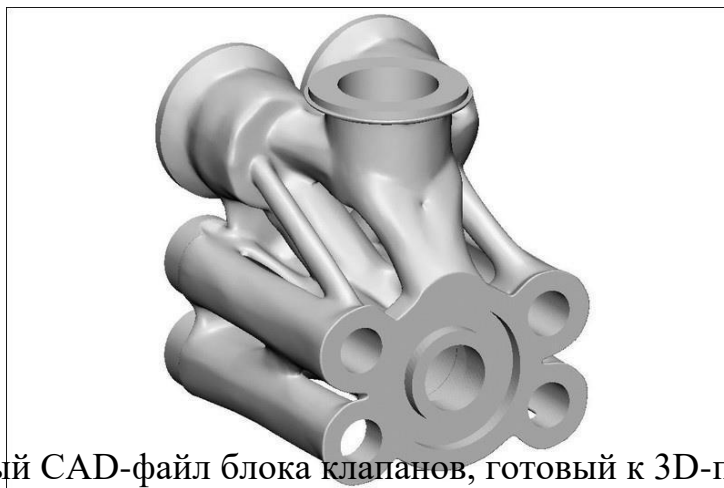


Рисунок 8.5 - Финальный CAD-файл блока клапанов, готовый к 3D-печати Центр

быстрого прототипирования Jures, использующий оборудование SLM Solutions, выполнил проект по усовершенствованию смесителя жидкости с газом. Изначально устройство собиралось из 12 частей, включая 3 крупных элемента – первое и второе фланцевые корпусные соединения и вставка смесителя. Селективное лазерное плавление дало возможность создать единый корпус, сократив количество деталей с 12 до одной. Отпадает необходимость использовать несколько металлов и фланцевых соединений: внутри цельнометаллического корпуса просто нарезается резьба, благодаря чему вес смесителя уменьшился с 1,3 кг до 50 г. В два раза сократилось время производства. И наконец, финансовые затраты на производство уменьшились на 73% (рис.8.6).

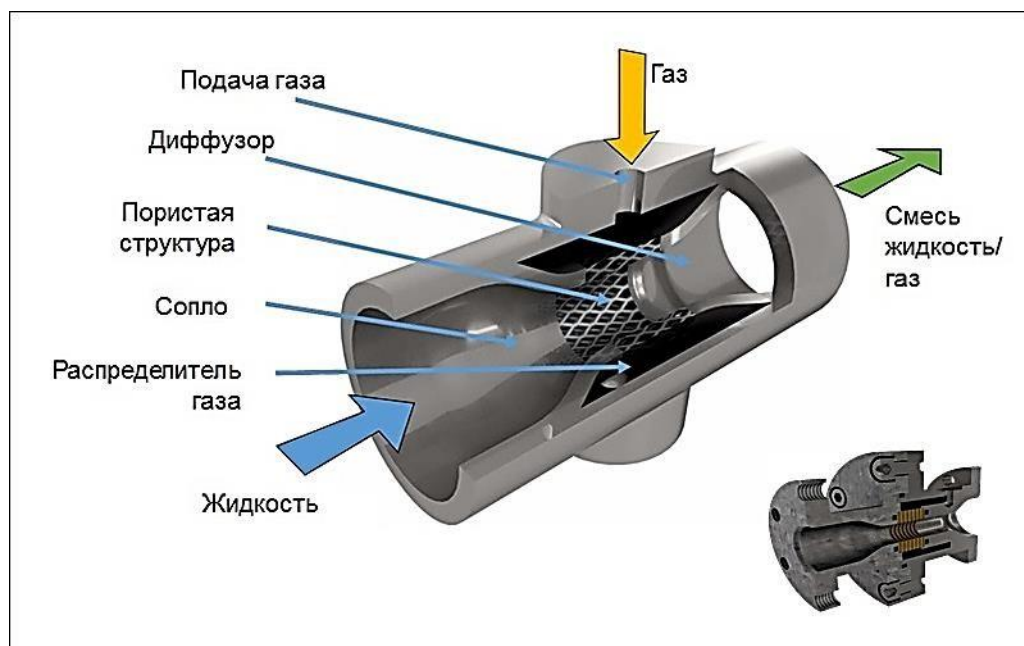


Рисунок 8.6 - Схема цельнометаллического смесителя, созданного по SLM-технологии. Справа внизу: изначальная модель, состоящая из 12 элементов

ОАО «Концерн «Океанприбор» (Санкт-Петербург) производит системы связи для Военно-Морского Флота РФ, в том числе оборудование с большим количеством мелких элементов, например, разветвитель – один из основных компонентов новой гидроакустической антенны. Для быстрого прототипирования при изготовлении литьевых деталей концерн использует профессиональный 3D- принтер, работающий по технологии CJP. На 3D-принтере выращивается литейная форма, которая затем заливается силиконом. В силиконовую форму можно заливать любой другой материал, в данном случае это полиуретан. В результате предприятие получает своего рода форму для форм – не просто прототип, а опытный образец, готовый к использованию. Реализация проекта с применением стандартных методов потребовала бы нескольких месяцев, но благодаря 3D- принтеру срок создания антенны удалось сократить до трех недель (рис. 8.7).



Рисунок 8.6 - Слева: мастер-форма из двух частей, напечатанная на 3D-принтере. Справа: извлечение готовой детали из силиконовой формы

Американская компания Turbine Technologies, Ltd. разработала модификацию двигателей внутреннего сгорания, на которые устанавливаются турбины высокого давления. Компания приобрела принтер для 3D-печати восковых моделей и получает готовую отливку в течение 3-4 дней. Восковые модели теперь изготавливаются непосредственно из 3D-моделей CAD, а литейный цех Turbine Technologies производит компоненты прототипов газотурбинных двигателей с большей точностью и меньшими расходами (рис. 8.7).

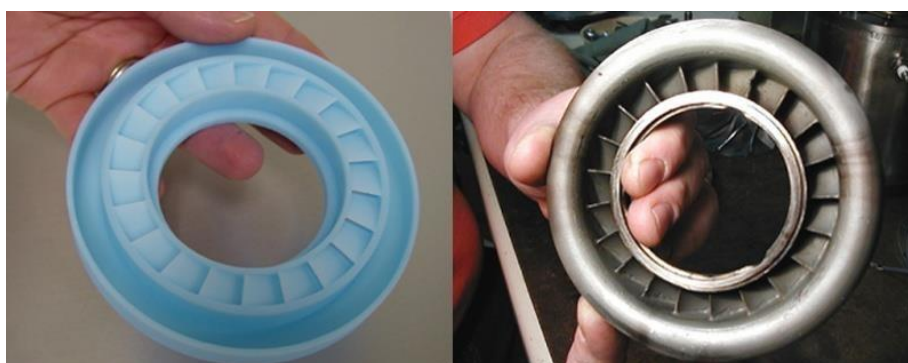


Рисунок 8.7 - Восковая модель, выращенная методом 3D-печати, и готовое изделие

Компания Vaupell разрабатывает производственные решения для литейных предприятий, которые выполняют заказы аэрокосмической и оборонной отрасли. Благодаря стереолитографическому 3D-принтеру компания смогла радикально

повысить эффективность производства. В принтере предусмотрен специальный режим печати фотополимером – QuickCast, при котором воспроизводится тонкостенная внешняя оболочка детали, а пустоты внутри детали заполняются ячеистой структурой. QuickCast-модели заменяют традиционные литейные модели и не требуют дорогостоящей оснастки. Таким образом, компания снизила затраты на литейные модели на 95% (рис. 8.8).



Рисунок 8.8 - 3D-печать фотополимерами по технологии QuickCast позволяет сэкономить время и деньги, поскольку позволяет обойтись без дорогостоящей оснастки

У 3D-технологий есть и сдерживающие факторы. Это и высокая стоимость оборудования и материалов, и недостаточная изученность, и нехватка специалистов, и сложности с интеграцией в традиционные технологические цепочки. Аддитивные методы на сегодня не могут вытеснить или заменить классические технологии, но они доказывают экономическую выгоду при прототипировании и мелкосерийном производстве и становятся единственно возможным решением при изготовлении сложных деталей небольшого размера. В конечном итоге, применение технологий трехмерной печати и моделирования позволяет быстрее выводить новые продукты на рынок, а значит, повышает конкурентоспособность машиностроительных предприятий.

8.5. Производство оснастки в промышленности

Технология RIM (от англ. Reaction Injection Moulding - реакционно-литьевое формование) – технология литья под давлением деталей из ненаполненных полиуретановых композиций, при которой жидкие компоненты на основе высокомолекулярного спирта и изоцианата смешиваются друг с другом в смесительной камере и подаются в заливочную (литьевую) форму, где происходит реакция поликонденсации.

Основным отличием RIM-технологии от известного метода изготовления изделий из термопластов литьем под давлением является то, что в качестве исходного полуфабриката, загружаемого в специализированное оборудование (рис. 8.9), используется не полимерный гранулят, а реакционная смесь, полученная после смешения в заданном соотношении нескольких жидких низкомолекулярных компонентов. Эта смесь подается в литьевую форму, где и происходит химическая реакция взаимодействия компонентов с одновременным образованием готового полимерного изделия. В этом смысле можно сказать, что данная технология подобна известному методу литья под давлением реактопластов. В настоящее время данная технология реализована применительно к изделиям из полиамида.

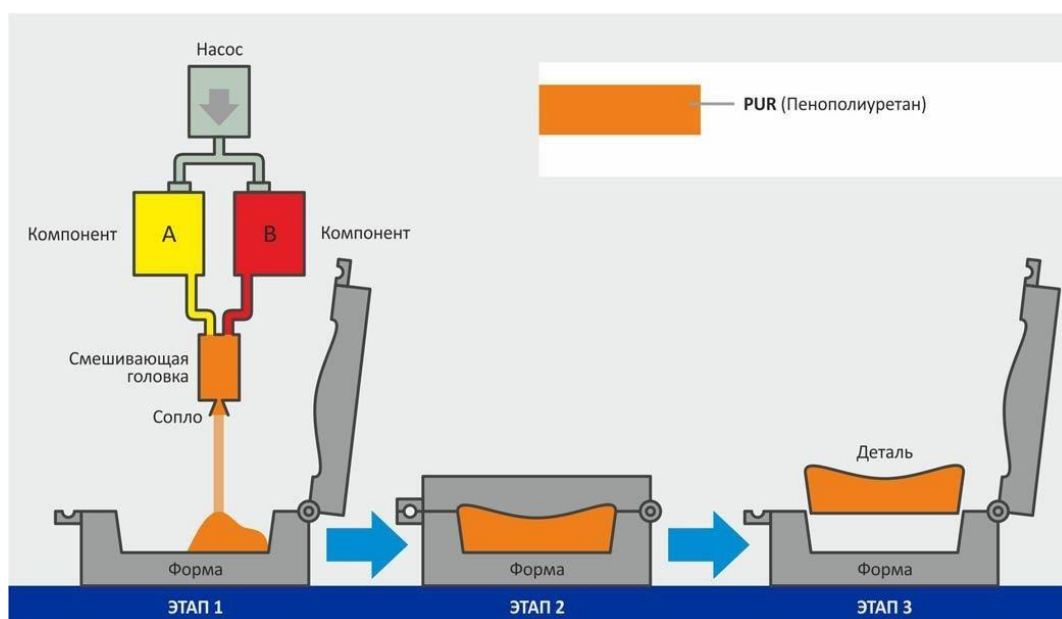


Рисунок 8.9 - Схема технологии RIM

Основным исходным компонентом сырья для RIM-технологии полиамидов служит мономер - капролактam (до 70%), к которому добавляют активатор, катализатор и другие добавки. Таким образом, для изготовления полиамидных изделий по RIM-технологии не требуются дополнительное время и энергозатраты на промежуточные стадии процесса - синтез полимера, гранулирование полимерного материала и неоднократное термическое воздействие на него (сушка, плавление).

Процесс RIM-технологии полиамидов проходит при относительно низких температурах и давлениях. При этом даже толстостенные изделия получают практически с минимальным уровнем остаточных напряжений. Таким способом можно без труда изготавливать полиамидные изделия сложных форм с толщиной стенки до 40...50 мм и габаритами до 1500x2000 мм и более, что является важным преимуществом данной технологии (рис. 8.10).

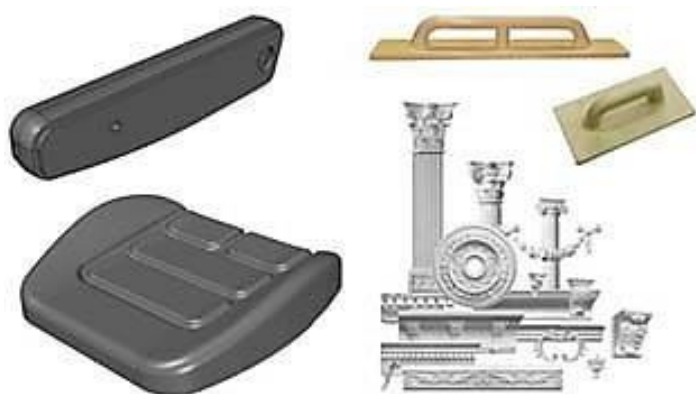


Рисунок 8.10 - Варианты изготавливаемой продукции

Стоимость литевых форм для продукции, изготавливаемой по RIM-технологии, на порядок ниже, чем для подобных изделий, полученных литьем под давлением. Литевые формы более тонкостенные, но требуют обогрева.

Проектирование и изготовление форм для RIM-технологии из модельных материалов может быть осуществлено методами 3D-печати или стереолитографии.

8.6. Аэрокосмические приложения

В производстве авиакосмической техники аддитивные технологии обеспечивают следующие основные преимущества:

1. Стоимость вывода 1 кг массы на орбиту Земли составляет от 12 до 25 тыс. долл. Поэтому возможность снижения массы изделия за счет повышения его конструктивной сложности является весьма актуальной для ракетно-космического машиностроения.

Анализ, проведенный в рамках проекта ATIKINS, показал, что снижение массы магистрального самолета на 100 кг на протяжении всего жизненного цикла влечет за собой экономию \$2,5 млн на топливных расходах и сокращает выбросы углекислого газа на 1,3 млн тонн.

Однако степень усложнения конструкции изделия ограничивается возможностями существующих методов, технологий на их основе и средств технологического оснащения. Так, аддитивные технологии обеспечивают получение системы полостей произвольной формы в теле детали, а субтрактивные

- нет. Поэтому в последнем случае приходится использовать дорогостоящие заготовительные технологии с относительно низким уровнем технологической надежности и удорожанием производства из-за брака. В качестве примера рассмотрим одну из основных, лимитирующих деталей газотурбинного двигателя — лопатку турбины (рис. 8.11).



Рисунок 8.11 – Сечения лопатки турбины газотурбинного двигателя

Лопатку с сечениями, формирующими магистраль подачи охлаждающего воздуха, получают литьем по выплавляемым моделям. Отверстия для входа воздуха на передней кромке лопатки изготавливают малопроизводительным электроэрозионным прошиванием с последующей доводкой абразивной суспензией. К настоящему времени созданы опытно-экспериментальные образцы лопаток с применением SLS и SLM — технологий.

2. Коэффициент использования материала (КИМ) при традиционном производстве основных деталей двигателей авиакосмической техники составляет 0,05–0,2. Применение аддитивных технологий позволяет повысить этот коэффициент до 0,7–0,9, что обеспечит значительное сокращение затрат на дорогостоящие материалы. Значение КИМ при изготовлении металлических деталей с применением АТ определяется, главным образом, массой поддержек, подлежащих удалению (рис. 8.12).

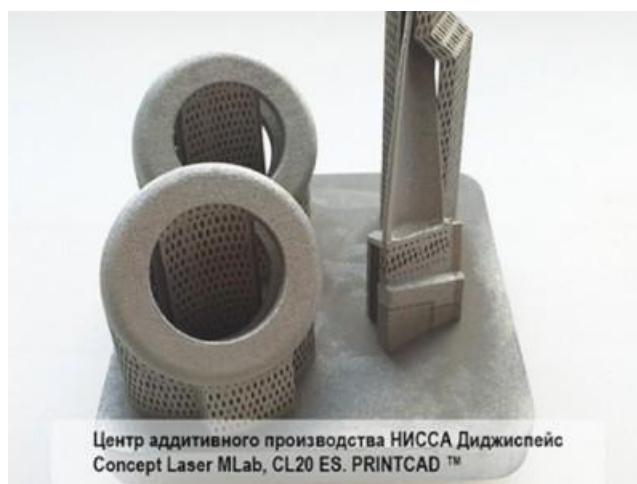


Рисунок 8.12 - Вариант конструкции поддержек соединительного блока

3. Сокращение длительности цикла и стоимости технологической подготовки производства новых изделий имеет первостепенное значение, особенно в опытно-экспериментальном производстве. С развитием АТ опытно-конструкторские организации могут не только осуществлять быстрое натурное моделирование составных частей опытного изделия, но и значительно ускорить как изготовление сложных деталей, так и введение изменений в их конструкции в

процессе доводки и испытаний изделия. Так, по данным ОАО КБХА применение аддитивных технологий при изготовлении 5 основных деталей двигателя позволяет в среднем сократить цикл изготовления в 5 раз.

4. Замена сборочной единицы деталью одного наименования повысит надежность составной части изделия и также сократит цикл ее изготовления. Так, на рисунке 8.12 показан соединительный блок, который при традиционном исполнении представляет собой сборочную единицу, состоящую из 8 наименований деталей.

Аддитивное производство смесительной головки позволяет сократить число наименований деталей с 138 при классической технологии до 1–3 при аддитивном производстве.

5. Основные детали горячей части двигателей современных летательных аппаратов, работающие, как правило, в экстремальных условиях, изготавливают из материалов с низкой обрабатываемостью резанием, поэтому понятен интерес создателей газотурбинных двигателей и жидкостных ракетных двигателей к аддитивным технологиям, позволяющим в ряде случаев снизить трудоемкость и себестоимость технологии. Так, компания GE Aviation часть деталей нового двигателя LEAP производит с применением аддитивных технологий (рис. 8.13).



Рисунок 8.13 - Двигатель LEAP компании GE Aviation

В авиационной промышленности России, имеется опыт практического использования аддитивных технологий, но реальное их применение крайне ограничено.

АО "ОДК-Климов" разрабатывает перспективный вертолетный двигатель (ПДВ), при его изготовлении максимально использована 3D-печать металлами и полимерными конструкционными материалами (рис. 8.14). Представление демонстрационного образца обещано к 2021 году, окончание разработки — к 2025. Ожидается уменьшение массы двигателя на 15% и экономия средств в эксплуатации на 30% по сравнению с существующими аналогами.



Рисунок 8.14 - Сборочный цех АО «ОДК-Климов», сентябрь 2016

АО «ММП имени В.В. Чернышева» входит в состав Объединенной двигателестроительной корпорации и специализируется на производстве и ремонте комплектующих для авиадвигателей. В сотрудничестве с другими предприятиями Корпорации («ОДК-Сатурн», «ОДК-Пермские моторы») завод применяет 3D- печать, осуществляя НИОКР и опытное производство, внедряя образовательные программы и разрабатывая нормативную документацию. В Центре аддитивных технологий компании действует полный лабораторно-исследовательский комплекс

печати из различных сплавов. Предприятие представило несколько практических результатов аддитивного производства:

- завихритель двигателя получил сертификат и будет серийно изготавливаться в «ОДК-Пермские моторы»;
- часть деталей для макета двигателя РД-33МА напечатаны на 3D-принтере;
- корпус топливного насоса с конструкцией, оптимизированной под 3D-печать, будет серийно производиться с 2020 г.

При этом, если в отечественном авиационном двигателестроении есть примеры послойного синтеза опытных образцов готовых изделий, то в производстве самолётов и вертолётов аддитивные технологии если и применяются, то в основном при изготовлении технологической оснастки для изготовления элементов конструкции со сложной геометрией поверхности — штампов, пресс-форм и т. п. Примеры же непосредственного послойного синтеза элементов конструкции крайне редки и ограничиваются изготовлением аналогов сварных элементов топливной и гидравлической систем, элементов интерьера и других неответственных деталей.

8.7. Моделирование и создание беспилотных летательных аппаратов

Хорошим примером безальтернативного использования компьютерных методов моделирования (CAD/CAE) и аддитивных технологий является моделирование и создание беспилотных аппаратов как воздушного, так и безвоздушного (то есть космического) и даже подводного базирования.

Примеры успешного применения аддитивных технологий для проектирования и создания беспилотных летательных аппаратов.

Госкорпорация Ростех представила на международной промышленной выставке "Иннопром-2016" в Екатеринбурге первый российский беспилотник-разведчик, который был сделан на 3D-принтере (рис. 8.15).



Рисунок 8.15 - Российский беспилотник-разведчик Беспилотник способен нести на борту видеоаппаратуру и вести работу в радиусе до 50 километров. Он весит менее четырех килограммов, а размах крыла составляет 2,4 метра.

На изготовление такого летательного аппарата тратится около одного дня. Составные части беспилотника перед запуском собираются, как конструктор, в течение 15-20 минут.

Структурное подразделение корпорации «Росатом» компания «РусАТ» разработала и напечатала на 3D-принтере прототип малогабаритного газотурбинного двигателя для беспилотников (рис. 8.16).

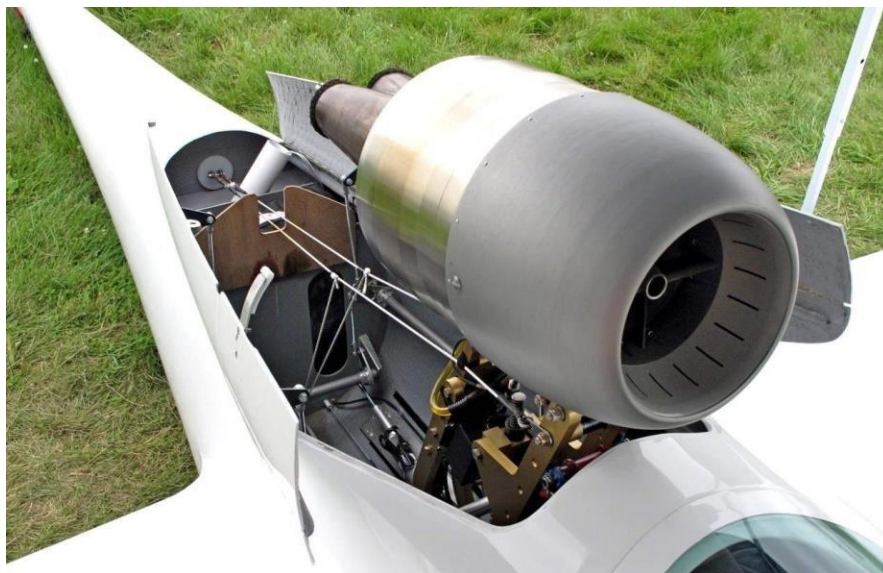


Рисунок 8.16 - Газотурбинного двигателя для беспилотных летательных аппаратов

С помощью 3D-печати были созданы 80% конструкции перспективного двигателя. Малогабаритный газотурбинный двигатель можно использовать не только для небольших беспилотных летательных средств, но и для выработки электричества

8.8. Автомобильная индустрия

Аддитивные технологии эффективно решают следующие задачи автомобильного производства:

- создание функциональных прототипов;
- создание выжигаемых и выплавляемых моделей для литья;
- производство оснастки и пресс-форм;
- мелкосерийное производство.

Прототипирование позволит оптимизировать производство тем предприятиям, которые занимаются выпуском автомобилей (но не сборкой готовых моделей), а также производителям автокомпонентов, поставляемых на конвейер.

Средствами топологической оптимизации проектировщик может задать практически любую необходимую геометрию детали и вносить изменения в дизайн на более поздних этапах разработки. 3D-модель передается из САПР на 3D-принтер, который в короткие сроки печатает прототипы, оснастку или пресс-формы для литья изделий. Тем самым сокращаются расходы на производство, сроки разработки продукта и его вывода на рынок. В частности, предприятие может наладить оперативное изготовление компонентов, приурочив его к выпуску автомобиля.

Оснастку и изделия, которые отвечают необходимым прочностным характеристикам, можно выпускать непосредственно на заводе, имея всего лишь один 3D-принтер. Он будет печатать различные по номенклатуре детали, что невозможно при использовании станков и других традиционных инструментов.

Технологии, в основном применяемые для прототипирования:

- FDM (моделирование методом послойного наплавления);
- SLA (лазерная стереолитография);
- SLS (селективное лазерное спекание).

Оснастка и пресс-формы, которые печатаются из пластиков и фотополимерной смолы, будут в разы дешевле металлических.

Изготавливать функциональные изделия можно и на металлических 3D-принтерах (например, по SLM-технологии). 3D-печать металлом также подходит при выпуске небольших партий, в том числе при создании кастомизированных продуктов. Новейшие разработки в области металлических порошков открыли путь к изготовлению более легких, более плотных, а в отдельных случаях – более прочных деталей. Благодаря топологической оптимизации на 3D-принтере можно выращивать компоненты сложной формы и фактуры (с ячеистой структурой, внутренними каналами и т.п.), в том числе цельнометаллические, которые раньше собирались из нескольких элементов.

3D-печать позволяет получить производителям автомобилей и автокомпонентов целый ряд преимуществ:

- сокращение времени на этапе разработки продукта и литья;
- экономия времени и расходов на изготовление оснастки и пресс-форм;
- отказ от услуг подрядчиков-изготовителей оснастки;
- проведение технологических экспериментов и функциональное тестирование;
- создание геометрически сложных изделий с мелкими деталями, которые невозможно изготовить традиционными методами;
- снижение массы детали и экономия используемых материалов за счет топологической оптимизации;
- ускорение выпуска нового продукта или эксклюзивной серии на рынок.

Примеры успешного применения аддитивных технологий в автомобильной индустрии.

Одной из первых компаний, «обкатывающих» 3D-принтеры в серийном производстве стала японская Toyota, разработавшая концепт uBox. В его создании принимал участие Международный центр исследований в области автомобильных технологий Университета Клемсона (Южная Каролина). Главная особенность uBox заключается в том, что модульный интерьер и вся электронная начинка распечатаны на 3D-принтере (внешние детали и рама по-прежнему изготавливаются при помощи традиционных технологий (рис. 8.17)).



Рисунок 8.17 – Автомобиль Toyota uBox

По словам Toyota, главная идея этого автомобиля – наличие возможности максимальной кастомизации интерьера. Возможно, именно поэтому японцы позиционируют его, как «персонализируемую машину будущего для поколения Z». Toyota уже заявила о планах по созданию специального онлайн ресурса для владельцев uBox, где они смогут делиться вариантами дизайна дверных накладок, приборной панели, вентиляционных отверстий и пр.

Автомобиль The Blade принято считать «первым в мире напечатанным суперкаром». Корпус автомобиля выполнен из углеволокна, а внутри него находится множество алюминиевых трубок – все это прикреплено к шасси автомобиля для снижения веса и увеличения безопасности. За разработку The Blade ответственна компания Divergent3D, одной из главных целей которой является продвижение инновационных технологий автопрома, делающих автомобили более легкими, а их производство – экономичнее (рис. 8.18).



Рисунок 8.18 - Автомобиль The Blade

EDAG Group – это один из крупнейших независимых разработчиков в автомобильной индустрии. Данная организация занимается упрощением и оптимизацией технологий производства автомобилей, и главная предназначение концепта Light Cooon аналогична вышеупомянутому The Blade – а именно, доказать возможность создания более легких ТС, без увеличения расходов на производство и сборку компонентов (рис.8.19).



Рисунок 8.19 – Автомобиль EDAG Light Cooon

Строение корпуса EDAG Light Cooon похоже на лист: панели имеют пористую структуру для обеспечения низкого веса, а чтобы оставить безопасность автомобиля на прежнем уровне, корпусные панели пронизаны тонкими нитями прочной сверхлегкой ткани Jack Wolfskin. Помимо того, что пористая структура более удобна именно для 3D-печати, она позволяет осуществлять различные световые эффекты для демонстрации «скелетообразного» строения автомобиля.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кулик, В.И., Аддитивные технологии в производстве изделий авиационной и ракетно-космической техники: учебное пособие / В.И. Кулик, А.С. Нилов; Балт. гос. техн. ун-т. - СПб., 2018. - 160 с.
2. Хейфец, М.Л., д.т.н., проф. Полоцкий государственный университет, Новополоцк, Беларусь, Алгоритмы процессов послойного синтеза изделий сложной формы из композиционных материалов // Процессы механической обработки в машиностроении. — 2009. — №7. — С. 257-273.
3. Шкуро, А.Е., Технологии и материалы 3D-печати: учеб. пособие / А.Е. Шкуро, П.С. Кривоногое. - Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2017. — 101 с.
4. Шишковский, И. В., Основы аддитивных технологий высокого разрешения. — СПб.: Питер, 2016. — 400 с.
5. Панков, Д. Э. Лазерная стереолитография (SLA): технология 3D-печати / Д. Э. Панков, И. А. Соломонов, А. М. Терин, А. К. Тутушкин. — Текст : непосредственный // Молодой ученый. — 2020. — № 48 (338). — С. 48-49. — URL: <https://moluch.ru/archive/338/75621/>
6. Франке, Й. 3D-MID. Материалы, технологии, свойства. Пер. с англ. под ред. И. Волкова. – СПб.: Профессия, 2014. – 336 с. Ссылка на текст: https://studref.com/554661/tehnika/3d-mid_materialy_tehnologii_svoystva
7. ГОСТ Р 57558-2017/ISO/ASTM 52900:2015 Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 1. Термины и определения
8. ГОСТ Р 57586-2017 Изделия, полученные методом аддитивных технологических процессов. Общие требования
9. Сайт компании iQB Technologies - Российского дистрибутора ведущих мировых производителей 3D-принтеров, 3D-сканеров, ПО и расходных материалов. Ссылка на сайт: <https://iqb.ru/about-us/>