



Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого»

Кафедра «Металлургия и технологии обработки материалов»

МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ 3D ПРОТОТИПИРОВАНИЯ

ПОСОБИЕ

**по одноименной дисциплине
для студентов специальности
1-36 02 01 «Машины и технология литейного
производства»
дневной формы обучения**

Гомель 2021

УДК 621.7(075.8)
ББК 34.441я73
М54

*Рекомендовано научно-методическим советом
механико-технологического факультета ГГТУ им. П. О. Сухого
(протокол № 9 от 24.10.2020 г.)*

Рецензент: декан машиностроительного факультета ГГТУ им. П. О. Сухого
канд. техн. наук, доц. *Г. В. Петришин*

Составитель *В. А. Жаранов*

Методы и технологии 3D прототипирования : пособие по одной дисциплине для студентов специальности 1-36 02 01 «Машины и технология литейного производства» днев. формы обучения / сост. В. А. Жаранов. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2021. – 288 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <http://elib.gstu.by>. – Загл. с титул. экрана.

В пособии подробно описаны основы конструирования деталей для быстрого прототипирования, методы расчёта систем, физико-химические процессы производства изделий методами, основанными на способах трёхмерной печати и числовом программном управлении. Изложены методы проектирования технологических процессов, 3D прототипирования и технологической оснастки с применением современных инновационных разработок в области компьютерного моделирования и проектирования для получения отливок с необходимыми технологическими и эксплуатационными свойствами.

Для студентов специальности 1-36 02 01 «Машины и технология литейного производства». Может быть использовано при изучении элементов специальных дисциплин других специальностей вуза, связанных с аддитивными технологиями и их проектированием.

УДК 621.7(075.8)
ББК 34.441я73

© Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», 2021

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 ТЕХНОЛОГИИ БЫСТРОГО ПРОТОТИПИРОВАНИЯ	7
1.1 Технологии быстрого прототипирования. Обзор.....	86
1.2 Краткая историческая справка	9
1.3 Анализ аддитивных технологий	15
1.3.1 Классификация аддитивных технологий	16
1.4 Технология послойного лазерного сплавления	30
1.5 Технология послойного электронно-лучевого синтеза и напыления.....	32
1.6 Технология послойного синтеза изделий ионным пучком.....	34
ГЛАВА 2. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ.....	36
2.1. Металлические материалы	37
2.2. Керамические материалы	63
2.3. Композиционные материалы.....	109
ГЛАВА 3. ЦИФРОВЫЕ МОДЕЛИ ПРОИЗВОДСТВА	132
3.1. Коммуникационная роль трёхмерной модели изделия.....	132
3.2. Использование трехмерных моделей на различных этапах жизненного цикла изделия	138
ГЛАВА 4. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОТОТИПЫ	140
4.1 Трёхмерное сканирование	140
4.2 Построение моделей изделий на основе трёхмерного сканирования (реверс-инжиниринг).....	146
ГЛАВА 5. КООРДИНАТНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ МАШИНЫ	152
5.1 Выбор методики обмера элементов детали	154
5.2 Основные этапы создания программы измерения	159
ГЛАВА 6. АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И БИОДИЗАЙН	163
6.1 Подходы к оптимальному проектированию конструкций	164
6.2 Методы топологической оптимизации.....	170
6.2.1 Постановка задачи топологической оптимизации	170
6.2.2 Определение переменных проектирования	172
6.2.3 Метод выполнения критерия оптимальности	173
6.2.4 Эволюционные алгоритмы: ESO, AESO, BESO,.....	175
6.2.5 Оптимизация формы	177
6.3 Методы параметрической оптимизации при заданном в явном виде функционале	181
6.4 Градиентные методы.....	182
6.5 Неградиентные методы.....	184
6.6. Генетические алгоритмы параметрической оптимизации.....	186
6.7. Обзор современных программных систем проектирования, компьютерного инжиниринга и оптимизации в контексте их применения к оптимальному проектированию	187
6.7.1 Обзор САД систем	187

6.7.2 Обзор САЕ систем.....	187
6.7.3 Обзор САО систем	188
6.7.4 Обзор PDM систем	189
6.8. Построение математической модели и определение переменных проектирования	189
7 ПРИМЕНЕНИЕ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ЛИТЬЕ МЕТАЛЛОВ	199
7.1 Аддитивные технологии и быстрое прототипирование	200
7.2 Аддитивные технологии и литейное производство	202
7.2.1. Изготовление литейных синтез-моделей	202
7.3 От синтез-мастер-модели к отливке	216
7.4 Технологии синтеза песчаных литейных форм	223
7.5 Технологии синтеза металлических изделий и форм для литья металлов и пластмасс.....	227
7.6 Аддитивные технологии, литейное производство и порошковая металлургия	229
ГЛАВА 8. КОМПЬЮТЕРИЗИРОВАННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ В ОБЛАСТИ АНАЛИЗА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ МИКРОСТРУКТУРЫ СПЛАВОВ	240
ГЛАВА 9. БИОНИЧЕСКИЙ (ГЕНЕРАТИВНЫЙ) ДИЗАЙН В ПРОМЫШЛЕННОСТИ	261
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	279
ЛИТЕРАТУРА.....	280
ГЛОССАРИЙ.....	286

ВВЕДЕНИЕ

Экономика приобретает инновационный характер вследствие инновационного развития в первую очередь сферы материального производства, в основе которого лежат технологии – «знание и умение» сделать что-либо: микросхему, программный продукт, автомобильную шину, лопатку турбины или медицинский препарат. Именно технологии в широком смысле – наличие или отсутствие их, определяют положение экономики страны в мире, её стратегические позиции. Наличие технологий даёт в руки учёному или конструктору мощные инструменты для реализации новых идей. Технологии позволяют применять новые высокоэффективные материалы, новые методы управления, и таким образом обуславливают новое функциональное и интеллектуальное содержание продукта. Отсутствие же технологий сковывает, ограничивает творческий потенциал учёного или конструктора, вынуждает его применять те технические решения, которые есть в его распоряжении, а не те, которые требуются для достижения амбициозных целей. Поэтому сами технологии являются главным объектом инновационной деятельности.

Ни для кого не секрет, что с развитием технологического прогресса стали доступны технологии, о которых раньше можно было только мечтать. Мы получили уникальные возможности по сравнению с прошлым веком, среди которых особое место занимает 3D-прототипирование различных элементов. Данный процесс представляет собой создание трёхмерных прототипов различных изделий, деталей и механизмов с помощью специальных 3D-принтеров, которые используют в качестве расходных материалов полимеры, воск или металл.

Технология уникальна тем, что при малой стоимости и высокой оперативности, заказчик получает готовый прототип абсолютно любого элемента и может внести корректировки до того, как он поступит в серийное производство. Кроме того, полученная таким образом модель, будет отличаться высокой точностью и соответствовать оригиналу.

В течение нескольких последних десятилетий мировая промышленность находится в состоянии постоянных изменений, обусловленных появлением новых и развитием существующих производственных и вычислительных технологий, появлением возможности анализировать и передавать большие объёмы данных с помощью сети Internet. Все эти процессы являются составными частями глобального явления, которое принято называть IV промышленной революцией. IV промышленная революция, согласно анализу ведущих

мировых экспертов, коснётся практически всех сфер жизни человечества и приведёт к существенным изменениям в мировой экономике и в социальной сфере. Не является исключением и инженерно-конструкторская область, где, благодаря развитию вычислительных технологий, и вычислительных мощностей, а также появлению новых производственных технологий (в частности, технологий аддитивного производства) происходит постепенная смена парадигмы проектирования конструкций. Теперь, наряду с опытом генерального конструктора (а иногда, и вместо него), все большее значение при проектировании конструкций приобретает владение наукоёмкими инженерными технологиями.

Переход на цифровое описание изделий и цифровое компьютерное проектирование CAD, и появившиеся вслед за CAD (вследствие масштабного развития и применения) аддитивные технологии произвели настоящую революцию в литейном деле, что особенно проявляется именно в высокотехнологичных отраслях – авиационной и аэрокосмической области, атомной индустрии, медицине и приборостроении, в отраслях, где характерным является мало серийное, зачастую штучное (в месяц, год) производство. Именно здесь уход от традиционных технологий, применение новых методов получения литейных синтез-форм и синтез-моделей за счёт технологий послойного синтеза дало возможность радикально сократить время на создание новой продукции.

Потребность в снижении массы изделий, экономии материала, а также повышении эксплуатационных характеристик изделий приводит к увеличению сложности деталей. Одним из способов снижения массы узлов является уменьшение количества отдельных деталей и элементов их соединения, однако такие конструкции зачастую обладают большей сложной конфигурацией, что приводит к особым требованиям, предъявляемым к технологиям производства подобных изделий.

Широко применяемые сегодня технологии формообработки зачастую не способны обеспечить необходимые обоснованные элементы, содержащие сложные геометрические формы, тонкие стенки, внутренние каналы охлаждения и прочие конструктивные особенности, для реализации которых при помощи традиционных технологий, в частности, приходится прибегать к сварке отдельных частей сложной детали.

Аддитивный подход позволяет создавать уникальные изделия с внутренней полой структурой, например, теплообменники со сложной системой каналов охлаждения любой формы, литейная оснастка для создания корпусов новых двигателей и насосов, фильтрующие элементы с сетчатой структурой, размер ячеек которой определяется

размером гранул порошкового материала и пр.

При разработке и создании новой промышленной продукции особое значение имеет скорость прохождения этапов разработки, которая в свою очередь существенно зависит от технологических возможностей производства. В частности, это касается изготовления литейных деталей, которые часто являются самой трудоёмкой и дорогостоящей частью общего проекта. При создании новой продукции, особенно на этапе опытно-конструкторских работ (ОКР), для которого характерны вариантные исследования, необходимость частых изменений конструкции и, как следствие, постоянной коррекции технологической оснастки для изготовления опытных образцов, проблема быстрого изготовления литейных деталей становится ключевой. В опытном производстве преимущественными остаются традиционные методы изготовления литейной оснастки (в основном деревянные модели) вручную или с использованием механообрабатывающего оборудования, реже на станках с числовым программным управлением (ЧПУ). Это связано с тем, что на этапе ОКР в условиях неопределённости результата, когда конструкция изделия ещё не отработана, не утверждена, для изготовления образцов не целесообразно создавать «нормальную» технологическую оснастку под серийное производство. В этих условиях весьма дорогостоящая продукция – литейная оснастка, оказывается, по сути, разовой, которая в дальнейшей работе над изделием не используется в связи с естественными и существенными изменениями конструкции изделия в ходе ОКР. Поэтому каждая итерация, каждое приближение конструкции детали к окончательной версии требует зачастую и новой технологической оснастки, поскольку переделка старой оказывается чрезмерно трудоёмкой или вообще не возможной. И в этой связи традиционные методы оказываются не только дороги в плане материальных потерь, но и чрезвычайно затратны по времени.

1 ТЕХНОЛОГИИ БЫСТРОГО ПРОТОТИПИРОВАНИЯ

При разработке нового изделия обязательным этапом является разработка или виртуального, или физического прототипа. Во многих отраслях экономики недостаточно наличие только виртуальной, т. е. компьютерной модели, т. к. зачастую следует решать проблемы, решение которых только с помощью компьютерных моделей невозможно. Среди важнейших задач, которые решаются с помощью прототипов – это оптимизация геометрической формы изделия, осуществляемая по результатам натуральных экспериментов; собираемость многокомпонентного узла; оценка внешнего вида изделия. Исторически, различные технологии, позволяющие быстро с наименьшими затратами создавать макет или прототип стали называть технологиями быстрого прототипирования (RP – rapid prototyping). Однако, в последнее время наибольшее распространение получили аддитивные технологии, т. е. технологии послойного синтеза прототипа по компьютерной модели. Поэтому в настоящее время технологии быстрого прототипирования и аддитивные технологии считают терминами аналогами. Прототип позволяет не только оценить внешний вид изделия и проверить элементы конструкции, а также провести необходимые испытания или изготовить модель для литья и т. д. Использование RP-технологий позволяет до 80 % сократить сроки подготовки производства, исключить малоэффективный путь изготовления опытных образцов.

Построение прототипа осуществляется на основе компьютерной твердотельной модели или модели с замкнутыми поверхностными контурами. Модель разбивается на тонкие слои в поперечном сечении с толщиной слоя, равной разрешающей способности оборудования. При разбиении модели на слои может быть учтён припуск на механическую обработку. После послойного представления компьютерной модели также послойно осуществляется построение детали.

Принципиальная схема всех установок прототипирования одинакова: первый слой детали печатается при некотором начальном положении рабочего стола – элеватора установки, наносится слой материала, воспроизводящий первое сечение изделия; затем элеватор смещается вниз на один шаг и наносится следующий слой. Таким образом, слой за слоем воспроизводится сечение модели требуемого изделия. При нанесении отдельных слоёв может оказаться, что элементы сечения должны «повиснуть» в воздухе. Для исключения этой ситуации при предварительной подготовке компьютерной послойной модели, в ней строится система поддержек для каждого слоя (если это необходимо), алгоритм построения таких поддержек индивидуален для

каждой технологии прототипирования.

Основным различием между технологиями прототипирования является основной прототипирующий материал, а также способ его нанесения. В мире существует несколько десятков компаний, изготавливающих RP-установки, они постоянно совершенствуют технологию и разрабатывают новые материалы.

Методы аддитивного производства считаются альтернативным существующим традиционным субтрактивным методам обработки, таким как механические, электрофизические и электрохимические методы обработки и пр. В отличие от классического формообразования, где от заготовки «отрезается» все лишнее при изготовлении детали, с использованием технологий аддитивного производства деталь «выращивается» из предварительно подготовленного порошкового материала, частицы которого послойно скрепляются между собой в каждом слое, а слои скрепляются между собой. Применение аддитивных технологий во многих случаях обеспечивают большую свободу в выборе конфигурации изделия, что позволяет оптимизировать массовые и функциональные параметры детали за счёт использования сотовых и иных сложных конструкций, уменьшения толщины стенок, а также объединения нескольких деталей и изготовления их как единое целое.

Интерес к аддитивным технологиям, «непосредственному выращиванию» металлических изделий, в качестве альтернативы традиционным технологическим методам для производства товарной продукции возник в авиации, космической индустрии и энергетическом машиностроении. Мотивацией являлась экономическая целесообразность. Аддитивные технологии в ряде случаев оказываются менее дорогостоящими, чем традиционные технологии, а также предлагают новые возможности при производстве изделий. Например, возможно изготовление деталей или пресс-форм сложной формы, с каналами охлаждения произвольной конфигурации, что невозможно сделать при обычных методах механообработки.

1.1 Технологии быстрого прототипирования. Обзор

Под технологиями быстрого прототипирования понимаются технологии послойного построения физической модели (прототипа) в соответствии с геометрией САД-модели. Существует большое разнообразие технологий быстрого прототипирования. Основным отличием этих технологий от традиционных является создание модели не отделением материала от заготовки, а послойным наращиванием материала, с учётом внутренних поверхностей и даже подвижных частей. По сравнению с традиционными технологиями RP – технологии

полностью автоматизированы и позволяют получать модели с существенно малой себестоимостью. Длительность их изготовления в большинстве случаев на несколько порядков меньше, чем при использовании традиционных технологий.

Прототипы, выполненные при использовании RP – технологий, изготавливают из различных материалов: из специальных порошков, жидких смол, воска, пластиков, различных листовых материалов, металлических сплавов.

Основные преимущества RP – технологии:

- 1) отсутствует необходимость в разработке традиционного технологического процесса, т. к. наличие компьютерной модели детали достаточно для генерации её поперечных сечений;
- 2) отсутствует необходимость в выборе или конструировании средств технологического оснащения процесса изготовления прототипа;
- 3) отсутствует необходимость в проектировании и создании специального инструмента.

1.2 Краткая историческая справка

История аддитивного производства насчитывает 150 лет, уходя корнями в такие области, как *фотоскульптура* и *топография*.

Фотоскульптура (Photosculpture) была предложена *François Willème* в 1890 г. Суть её состояла в следующем: вокруг объекта или субъекта располагали фотокамеры, на которые и производили одномоментное фотографирование. Затем каждое изображение проецировали на полупрозрачный экран, и оператор с помощью пантографа обрисовывал контур. Пантограф был связан с режущим инструментом, который удалял модельный материал – глину – в соответствии с профилем текущего контура.

Для уменьшения трудоёмкости процесса *Carlo Baese* в 1904 г. предложил использовать фоточувствительный желатин, который при обработке водой расширялся в зависимости от степени засветки – экспозиции.

Способ изготовления топографических макетов – 3-мерных карт поверхности местности был предложен *Josef E. Blather* в 1890 г. Суть метода заключалась в следующем: из тонких восковых пластин по контурным линиям топографической карты вырезались фрагменты, соответствующие воображаемому горизонтальному сечению объекта, затем эти пластины укладывались друг на друга в определённом порядке и склеивались. Получался «послойный синтез» холма или оврага. После этого поверх полученных фигур накладывали бумагу и формировали макет отдельного элемента ландшафта, который затем уже в «бумажном» виде располагали в соответствии с исходной картой.

В 1935 г. *Isao Morioka* предложил способ, сочетающий в себе топографию и фотоскульптуру. Этот способ предполагал использование структурированного света (сочетание чёрных и белых полос) для создания топографической «карты» объекта – набора контуров. Контурные вырезались из листового материала, укладывались в определённом порядке, так формировался трёхмерный образ объекта. Или же, как и у *François Willème*, контурные могли быть спроецированы на экран для дальнейшего создания трёхмерного образа с помощью режущего инструмента.

У истоков современного аддитивного производства, одним из наиболее известных методов которого служит стереолитография (SL, от англ. *stereolithography*), стоит подход, предложенный в 1951 г. *Otto Munz*. Система *Munz* использовала поршневой механизм для последовательной избирательной засветки и отвердевания фотополимера по сечениям сканируемого объекта.

В 1977 г. *Wyn Kelly Swainson* предложил способ получения трёхмерных объектов посредством отверждения фоточувствительного полимера в точке пересечения двух лазерных лучей. Примерно в это же время начинают появляться технологии послойного синтеза из порошковых материалов.

Способ формирования тонкого слоя порошкового материала путём нанесения его на плоскую платформу был предложен в 1981 г. *R.F. Housholder*. После нанесения слоя порошкового материала производилось разравнивание его до определённой величины с последующим спеканием.

В том же году появились результаты работы *Hideo Kodama* с первых функциональных систем фотополимеризации с помощью ультрафиолетовой (УФ) лампы и лазера. В 1982 г. *A.J. Herbert* опубликовал работу по созданию трёхмерных моделей с помощью X–V-плоттера, УФ-лампы и системы зеркал.

Процесс патентования новых технических решений по AF-технологиям приобрёл лавинообразный характер.

В середине 1980-х гг. *Charles W. Hull* (Чарлз Халл) экспериментировал с УФ-отверждаемыми материалами, подвергая их лазерному сканированию, которое аналогично системе, применяемой в лазерных принтерах. Он обнаружил, что можно производить твёрдые полимерные структуры. Путём отверждения последующего слоя над предыдущим слоем ему удалось изготовить трёхмерный твёрдый объект.

В 1986 г. *Charles W. Hull* предложил способ послойного синтеза с использованием ультрафиолетового излучения, сфокусированного на тонкий слой фотополимерной смолы. Он же и ввёл в оборот термин

«стереолитография».

Именно патент Чарлза Халла признан наиболее влиятельной работой, поскольку она привлекла к созданию компании 3D Systems – компании, первой приступившей к коммерческой деятельности в области послойного синтеза (1986 г.).

В 1984 г. почти одновременно были поданы патенты в Европе (Франции), США и Азии (Япония). В первые годы большинство новаторских и коммерчески успешных систем разрабатывались в США. Такие компании, как Stratasys, 3D system и ZCorp, возглавили этот прорыв. Но и за пределами США также появилось множество новых компаний.

Примерно в то же время были разработаны методы аддитивного производства с использованием нагрева лазерным и электронным лучом. Эти методы были внедрены в производство в 1990-х гг., позволив использовать аддитивные технологии для изготовления металлических объектов.

Карл Декарт получил патент в 1989 г., он изобрёл технологию избирательного (селективного) лазерного спекания (SLS). В этом же году на имя Скотта Крампа, соучредителя компании Stratasys Inc., была зарегистрирована заявка на выдачу патента на технологию послойного наплавления (FDM). Крамп получил патент в 1992 г., сегодня эта технология широко применяется в простых бытовых моделях 3D принтеров.

Но далеко не все разработки 3D технологий проводились в США. Ханс Лангер основал в 1989 г. в Германии компанию EOS GmbH, выпустившую первый 3D принтер «Stereos» в 1990 г. Компания занялась развитием технологии лазерного спекания, включая прямое лазерное спекание металлов (DMLS).

Практическое применение эта идея нашла в *LOM-технологии* – *Lamination Object Manufacturing* – послойном ламинировании или склеивании тонких листовых материалов, толщина листов при этом составляет 0,051–0,25 мм.

В 1979 г. профессор Nakagawa из Токийского университета предложил использовать эту технологию для быстрого изготовления пресс-форм, в частности, со сложной геометрией охлаждающих каналов.

Согласно отчёту Королевской инженерной академии наук Великобритании за 2013 г., скачок в развитие технологий АП произошёл в 2009 г., когда истёк срок действия одного из ключевых патентов. Этот патент касался метода изготовления объектов путём послойной направки (FDM, *fused deposition modelling*) и описывал выдавливание (экструзию) пластиковой нити, формирующей готовую

деталь, с поддерживающей структурой из дополнительных материалов.

Истечение срока действия патента сделало возможным радикальное (вплоть до 90 %) снижение цен на системы 3D – печати. Это не только открыло рынок 3D-печати для широкого круга потребителей, но и заставило многих производителей и инвесторов пересмотреть своё отношения к АП и связанным с ним возможностям, проблемам и рискам.

Представители авиационно-космической промышленности, автомобилестроения, и даже архитекторы и строители увидели в АП перспективный инструмент для решения своих задач.

С этого момента началась новая эпоха в индустрии – эпоха АФ-технологий.

В настоящее время известно около ста разновидностей технологий быстрого прототипирования. Однако их можно кластеризовать или классифицировать по некоторым признакам выделив несколько основных направлений. На сегодняшний день нет устоявшейся классификации – принимаются различные признаки, в соответствии с которыми невозможно построить инвариантную классификацию для всех RP – технологий. Поэтому в данном пособии будет использована классификация RP – технологий, которая позволит рассмотреть основные RP – технологии, используемые в машиностроении. Таким образом, по физическому принципу действия RP – технологии можно объединить в четыре группы: технологии на основе экструзии, технологии на основе гранулирования, технологии на основе ламинирования и технологии на основе фотополимеризации.

Общетехническим понятием под экструзией понимается технологическая операция, при помощи которой изготавливают полые детали различной формы из различных материалов путём выдавливания при оптимальной температуре.

Несмотря на то, что в технике под гранулированием понимают процесс образования из расплавов или порошков отдельных твёрдых частиц в виде гранул, в технологиях быстрого прототипирования при использовании в классификации технологий этого термина понимают наоборот процесс спекания или сплавления из гранул.

Ламинирование – технология склеивание двух или более гибких материалов для получения слоистых материалов.

Фотополимеризация – изменение физико-химических свойств жидких и твёрдых фотополимеризующихся материалов под воздействием света или лазерного излучения.

Для иллюстрации неоднозначности существующих принципов классификации RP – технологий можно привести ещё один признак классификации «использование тепловых процессов». Согласно этому

признаку, отдельные технологии из ранее описанной классификации, принадлежащие различным группам, объединяются в этой группе – в этом и заключается отсутствие инвариантности классификации RP – технологий на сегодняшний день.

Все технологии быстрого прототипирования были созданы за рубежом, поэтому имеют англоязычную аббревиатуру. Ниже для каждой из четырёх групп технологий приведено наименование наиболее распространённых RP – технологий.

Технологии на основе экструзии: FDM, DODJet, EBM, MJM.

FDM (Fused Deposition Modeling) – послойное наложение расплавленной полимерной нити.

EBM (Electron Beam Melting) – электронно-лучевая плавка.

DODJet (Drop-On-Demand-Jet) – построение модели путём напыления капель нагретого материала и последующего фрезерования расплывлённого слоя. В отдельных источниках эту технологию и FDM-технологию относят к разновидностям струйной технологии.

MJM (Multi – Jet Modelling) – многоструйная экструзия, эту технологию также относят к технологии трёхмерной струйной печати.

Технологии на основе гранулирования: SHS, SLS, 3DP. (SLM) DMLS, SHS (Selective Heat Sintering) – выборочное тепловое спекание.

SLS (Selective Laser Sintering) – выборочное лазерное спекание порошковых материалов.

DMLS (Direct Metal Laser Sintering) – прямое металлическое лазерное спекание.

3DP (3D printing) – трёхмерная печать.

Технологии на основе ламинирования: LOM.

LOM (Laminated Object Manufacturing) – послойное склеивание плёночных материалов.

Технологии на основе фотополимеризации: SLA, SGC, DLP, MJM, PolyJet, PolyJetMatrix.

SLA (Stereo Lithography Apparatus) – стереолитография, облучение ультрафиолетовым лазером.

SGC (Solid Ground Curing) – облучение ультрафиолетовой лампой через фотомаску.

MJM (Multi Jet Modelling) – многоструйное распыление.

DLP (Digital Light Processing) – метод цифровой обработки света. PolyJet – технология послойного нанесения фотополимерных материалов на платформу с ультратонким слоем толщиной 16 мкм (распыление головкой капель смолы и засветка УФ-лампами).

PolyJetMatrix – технология, использующая несколько различных типов модельных материалов одновременно.

Первая аддитивная технология была предложена в 1984 Чарльзом

Халлом (США) – стереолитография или SLA-технология для печати физических трёхмерных объектов по цифровым моделям из фотополимеризующейся композиции (ФПК).

Основателем LOM – технологий считается Михаил Фейген, который в 1985 году предложил послойно формировать объёмные модели из листового материала (плёнок, полиэстера, композитов, пластика и бумаги).

В 1986 году была запатентована SLA-технология, разработанная в 1984 году. В этом же году Чарльз Халл основал компанию 3D Systems и разработал первый коммерческую установку для стереолитографии. В этом же году доктора Карл Декарт и Джо Биман в Университете штата Техас в Остине разработали и запатентовали SLS – технологию.

В 1987 году израильской компанией Cubital была разработана SGC – технология.

В 1988 году компанией 3D Systems разработана модель SLA-250, которая была запущена в серийное производство для широкого круга пользователей. В этом же году Скотт Крамп изобрёл FDM – технологию. В следующем 1989 году Скотт Крамп основал компанию Stratasys. А в 1991 году этой компанией был выпущен первый 3D-принтер серии Dimension с экструдированной печатающей головкой. В этом же году компания Helisys продала первую LOM – машину.

В 1992 году компания Stratasys продала первую машину на основе FDM – технологии. А фирма DTM продала свою первую установку, реализующую SLS – технологию.

В 1993 году Массачусетский технологический институт (MIT) запатентовал «трёхмерные способы печати».

В 1995 году в Массачусетском технологическом институте впервые введён термин «3D-печать». В этом же году Компания Z Corporation получила эксклюзивную лицензию от MIT использовать технологию ZDP.

В следующем 1996 году компания Stratasys (США) представила установку Genisys, компания Z Corporation представила установку Z402, а 3D Systems представила установку Actua 2100. К данному устройству быстрого прототипирования было впервые применено название 3D-принтер.

В 1997 году фирма EOS (Германия) продала SLA-технологии компании 3D Systems.

В 2005 году компания Z Corporation выпустила установку Spectrum Z510 – первый 3D-принтер с высоким качеством цветной печати.

В 2008 году компания Objet Geometries Ltd разработала принтер Connex500, печатающий различными материалами одновременно.

В 2010 году был напечатан первый автомобиль при помощи гигантских 3D-принтеров Dimension и Fortus компании Stratasys. В этом же году медицинская компания Organovo, Inc объявила о создании технологии, направленной на разработку искусственных кровеносных сосудов на 3D-принтере.

В 2011 году инженерами университета Саутгемптона (Великобритания) создан первый самолёт, напечатанный на 3D-принтере. В этом же году была создана установка для выращивания человеческих органов, использующая стволовые клетки.

В 2012 году в Венском технологический университете (Австрия) создали 3D-принтер, печатающий со скоростью 5 м/с объекты с разрешением до 100 нм. В таблицу 1 внесены данные, иллюстрирующие типовые характеристики прототипирующих машин. В данном случае под точностью здесь понимается минимальная толщина формируемого слоя. Например, заявленная погрешность для машины Dimension от фирмы Stratasys $\pm 0,178$ мм справедлива только по оси Z – в направлении печати. В плоскости печати для этой технологии характерно образование технологического бурта, величина которого существенно больше.

1.3 Анализ аддитивных технологий

Аддитивные технологии (AF – Additive Manufacturing), или технологии послойного синтеза, сегодня одно из наиболее динамично развивающихся направлений "цифрового" производства. Они позволяют на порядок ускорить НИОКР и решение задач подготовки производства, а в ряде случаев уже активно применяются и для производства готовой продукции.

Схематично различия в традиционном и аддитивном производстве можно изобразить следующей схемой:

Преимущества аддитивных технологий:

1. Улучшенные свойства готовой продукции. Благодаря послойному построению, изделия обладают уникальным набором свойств. Например, детали, созданные на металлическом 3D-принтере по своему механическому поведению, плотности, остаточному напряжению и другим свойствам превосходят аналоги, полученные с помощью литья или механической обработки.
2. Большая экономия сырья. Аддитивные технологии используют практически то количество материала, которое нужно для производства вашего изделия. Тогда как при традиционных способах изготовления потери сырья могут составлять до 80–85 %.
3. Возможность изготовления изделий со сложной геометрией. Оборудование для аддитивных технологий позволяет

производить предметы, которые невозможно получить другим способом. Например, деталь внутри детали. Или очень сложные системы охлаждения на основе сетчатых конструкций (этого не получить ни литьём, ни штамповкой).

4. Мобильность производства и ускорение обмена данными. Больше никаких чертежей, замеров и громоздких образцов. В основе аддитивных технологий лежит компьютерная модель будущего изделия, которую можно передать в считанные минуты на другой конец мира – и сразу начать производство.

Аддитивные технологии дали возможность применить не только новые материалы, но и новый подход к проектированию изделий для оптимизации конструкций с учётом возможностей аддитивных технологий. Ограничения классических технологий больше не сдерживают конструктора и позволяют создавать облегчённые детали и заменять узлы, состоящие из нескольких деталей, лишь одной. Так, при конструировании сейчас активно используют бионический дизайн по мотивам "систем", созданных природой в ходе эволюционного развития.

Такой подход даёт возможность оптимизировать конструкцию деталей и узлов, сэкономить материал при сохранении прочности конструкции.

Яркий пример оптимизации и эффективного применения АМ-оборудования показала компания General Electric. Была оптимизирована конструкция топливной форсунки авиадвигателя LEAP. Количество деталей этого узла сократили с 25 всего до 5 шт. Таким образом, удалось повысить надёжность элемента и добиться снижения массы. Учитывая, что в двигателе 19 топливных форсунок, можно смело говорить о серийном производстве.

1.3.1 Классификация аддитивных технологий

Аддитивное производство (от англ. *additive manufacturing*) представляет собой класс перспективных технологий кастомизированного производства деталей сложной формы по трёхмерной компьютерной модели путём последовательного нанесения материала (как правило, послойного) – в противоположность так называемому *вычитающему производству*.

Компании, производящие оборудование для изготовления изделий аддитивными методами, по-разному называют свои технологии. В литературе присутствует неопределённость по поводу наименования различных технологий.

Американская организация ASTM International (American Society for Testing and Materials), занимающаяся разработкой технических

стандартов для широкого спектра материалов, изделий, систем и услуг, рекомендует два основных термина – Additive Fabrication (AF), Additive Manufacturing (AM), а также «легитимные» синонимы – additive processes, additive techniques, additive layer manufacturing, layer manufacturing и freeform fabrication, которые русскоязычным вариантом могут быть корректно переведены как «аддитивные технологии» (АТ), «аддитивное производство» (АП), а также технологии послойного синтеза.

На сегодняшний день устоявшейся классификации аддитивных технологий не существует. Различные авторы подразделяют АТ в зависимости от:

- *применяемых строительных или модельных материалов* (жидкие, сыпучие, полимерные, металлопорошковые и т. д.);
- *наличия или отсутствия лазера;*
- *методов подвода энергии для фиксации слоя построения* (с помощью теплового воздействия, облучения ультрафиолетовым или видимым светом, посредством связующего состава и т. д.);
- *методов формирования слоя.*

ASTM F2792 (США) классифицирует аддитивные технологии, разделяя их на 7 категорий (табл. 1):

1. *Material extrusion* – выдавливание материала;
2. *Material Jetting* – разбрызгивание материала, струйные технологии;
3. *Binder jetting* – разбрызгивание связующего;
4. *Sheet lamination* – соединение листовых материалов;
5. *Vat photopolymerization* – фотополимеризация в ванне;
6. *Powder bed fusion* – расплавление материала в заранее сформированном слое;
7. *Directed energy deposition* – прямой подвод энергии непосредственно в место построения.

Иногда используется классификация процессов аддитивного производства в зависимости от состояния материала: жидкого, порошкообразного и твёрдого (табл. 2).

Жидкостные процессы включают в себя:

- *стереолитографию* (Stereolithography),
- *изготовление объектов путём послойной наплавки* (Fused Deposition Modeling) и
- *струйную печать* (Inkjet Printing).

Порошковые материалы используют в таких технологиях как:

- *3D-печать,*
- *селективное лазерное спекание* (Selective Laser Sintering),

- *прямое лазерное спекание металлов (Direct Metal Laser Sintering),*
- *селективную лазерную плавку (Selective Laser Melting),*
- *электронно-лучевую плавку (Electron Beam Melting),*
- *прямое нанесение металлов (Direct Metal Deposition) и*
- *точное лазерное формование (Laser Engineered Net Shaping).*

Таблица 1

Классификация аддитивных технологий согласно стандарту ASTM F2792

Группа	Технология	Исходный материал	Источник энергии	Особенности
Material Extrusion	Fused Deposition Modeling (FDM)	Термопластики, керамические суспензии, металлические пасты	Термическая энергия	Невысокая стоимость установок; использование нескольких материалов; ограниченная точность; невысокое качество поверхности
	Contour Crafting			
Material Jetting	Polyjet/Inkjet Printing	Фотополимеры, воск	Термическая энергия / фотоотверждение	Печать из различных материалов; высокое качество поверхности
Binder Jetting	Indirect Inkjet Printing (Binder 3DP)	Полимерные порошки, керамические порошки, металлические порошки	Термическая энергия	Необходимость пропитки изделий после их построения; широкий выбор материалов; высокая пористость изделий
Sheet Lamination	Laminated Object Manufacturing (LOM)	Металлические листы, полимерные плёнки, керамические ленты	Лазерный луч	Высокое качество поверхности; необходимость удаления остатков материала
Vat Photopolymerization	Stereolithography (SLA)	Фотополимеры, керамики (оксиды Al, Zr, пьезокерамики)	Ультрафиолетовый лазер	Высокая скорость построения; высокая точность изготовления; высокая стоимость исходных материалов

Продолжение таблицы 1

Powder Bed Fusion	Selective Laser Sintering (SLS)	Полиамиды, полимеры	Лазерный луч	Высокая точность изготовления; высокая плотность изделий; необходимость использования поддержек
	Direct Metal Laser Sintering (DMLS)	Металлические и керамические порошки		
	Selective Laser Melting (SLM)			
	Electron Beam Melting (EBM)		Электронный луч	
Directed Energy Deposition	Laser Engineered Net Shaping (LENS) Electron Beam Welding (EBW)	Металлические порошки и проволоки	Лазерный луч, электронный луч	Возможность ремонта изделий; создание функционально-градиентных изделий; низкое качество поверхности

Таблица 2

**Классификация процессов аддитивного производства (АП)
по состоянию используемого материала**

Состояние материала	Процесс	Материалы
Жидкое	Стереолитография (SL)	Полимеры
	Изготовление объектов путём послойной наплавки (FDM)	
	Струйная печать (IJP)	
Порошкообразное	3D-печать (3DP)	Полимеры, металлы, керамика
	Селективное лазерное спекание (SLS)	
	Прямое лазерное спекание металлов (DMLS)	
	Селективная лазерная плавка (SLM)	
	Электронно-лучевая плавка (EBM)	Металлы
	Прямое нанесение металлов (DMD)	
	Точное лазерное формование (LENS)	
Твёрдое	Послойное изготовление объектов из листового материала (LOM) – листы	Полимеры, металлы, керамика и композиционные материалы
	Произвольное экструзионное формование (EFF) – проволока	

Твердотельные процессы включают в себя послойное изготовление объектов из листового материала (Laminated Object Modeling) и произвольное экструзионное формование (Extrusion Free Formation).

Можно отметить многообразие методов аддитивного производства в зависимости от технологий, материалов, оборудования, программного обеспечения и, конечно, конструкции, массы и габаритов детали. Допустима следующая классификация методов АП:

- *экструзионный* (на основе технологии послойного наплавления, по международной классификации FDM или FFF);
- *проволочный* (производство произвольных форм методом электронно-лучевой плавки (EBF₃ – Electron Beam Freeform Fabrication));
- *порошковый* (с применением технологий лазерного спекания (DMLS, SLS); электронно-лучевой плавки (лазерная наплавка (SLM); струйной трёхмерной печати (3DP); применяемые материалы – гипс, пластик, металлические порошки, песчаные смеси);
- *ламинирование* (LOM);
- *полимеризация* (используемые методы – стереолитография (SLA), цифровая светодиодная проекция (DLP)).

По способу нанесения материала аддитивные технологии классифицируют на струйные и лазерные способы.

К струйному способу относятся такие технологии, как моделирование методом наплавления (Fused deposition modeling) и Polyjet.

Американское общество по испытанию материалов (ASTM International) делит технологии струйной трёхмерной печати на две категории: *Material jetting* – разбрызгивание материала и *Binder jetting* – разбрызгивание связующего.

В первом случае через сопла подаётся непосредственно сам строительный материал, который после нанесения отвердевает. Во втором – на тонкий слой гипсового, полимерного или металлического порошка разбрызгивается клеящее вещество. Технология 3DP в своём изначальном виде представляла именно второй способ.

К лазерному способу относят послойное ламинирование (Laminated object manufacturing), селективное лазерное плавление (Selective laser melting), селективное лазерное спекание (Selective laser sintering), директивное лазерное спекание (DMLS), лазерная наплавка металла (Laser metal deposition) и лазерная стереолитография (Laser stereolithography), изготовление расслоённых продуктов (LOM) и другие.

Комплексный метод классификации предложил Pham, использовавший двумерную классификацию (табл. 3).

Одномерный проход относится к способу, с помощью которого слои построены. В первых технологиях использовался один точечный источник для сканирования по поверхности основного материала. В последующих системах количество источников увеличилось, чтобы повысить производительность, что стало возможным благодаря технологии осаждения капель, например, устройства, которое можно встроить в виде одномерного массива разбрызгивающих сопел.

В комплексном методе классификации Pham использовал четыре отдельных классификации материалов:

- жидкий полимер;
- частицы порошка;
- расплавленный материал;
- ламинированные листовые материалы.

Аддитивные технологии прямого изготовления изделий из металлов и сплавов (табл. 4) разделяют на две большие группы: Powder Bed Fusion (PBF) и Directed Energy Deposition (DED).

Процессы плавления порошков на подложке – платформе в сформированном слое (PBF) были одними из первых коммерциализированных технологий АП, из которых первой на рынок было выпущена технология селективного лазерного спекания (SLS – selective laser sintering), разработанная в Университете штата Техас в Остине. Все остальные процессы PBF модифицируют этот базовый подход тем или иным способом, чтобы повысить производительность машин, включить в обработку различные материалы и/или избежать патентных совпадений с уже известными методиками АП. Наиболее распространёнными источниками тепла для технологий PBF являются лазеры. Оборудование PBF, в котором используются лазеры, называется машинами для лазерного спекания (*LS – laser sintering*). Машины для лазерного спекания полимерных порошков и лазерного спекания металлических порошков значительно отличаются друг от друга.

В настоящее время наиболее распространённым материалом, используемым в процессах PBF, является полиамид, термопластичный полимер, широко известный нейлон. В дополнение к чистым (беспримесным) полимерам в технологии PBF применяются полимеры с наполнителями, которые повышают их физико-механические свойства. Например, добавка стекла значительно повышает жёсткость материала, но также снижает его пластичность по сравнению с полиамидными материалами без наполнителей. EOS GmbH предлагает в качестве наполнителей полиамидных материалов алюминиевые частицы, угле-

родное волокно и стеклянные наполнители своей собственной разработки.

Таблица 3

Классификация технологий послойного синтеза, предложенная Pham

Материалы	Одномерный проход	Двухмерный проход	Массив одномерных проходов	Двумерный проход
Жидкий полимер	SLA (3D Sys)	Двойной луч SLA (3D Sys)	Object	Envision-tech MicroTEC
Дискретные частицы	SLA (3D Sys), LST (EOS), LENS, Phenix, SDM	LST (EOS)	3D печать	DPS
Расплавленный материал	FDM, Solidscape		TermoJet	
Твёрдые листовые материалы	Solido PLT (KIRA)			

Таблица 4

Классификация АП для производства металлических деталей

Классификация	Терминология	Материал
Powder bed fusion	Direct metal laser sintering (DMLS)	Металлический порошок
	Electron beam melting (EBM)	
	Selective laser sintering (SLS)	
	Selective laser melting (SLM)	
Directed energy deposition	Electron beam freeform fabrication (EBF3)	Металлический порошок, металлический провод
	Laser engineered net shaping (LENS)	
	Laser consolidation (LC)	
	Directed light fabrication (DLF)	
	Wire and arc additive manufacturing (WAAM)	
Binder jetting	Powder bed and inkjet 3D printing (3DP)	Металлический порошок
Sheet lamination	Laminated object manufacturing (LOM)	Металлический слоистый материал
	Ultrasonic consolidation (UC)	Металлическая фольга

С помощью технологий PBF можно производить и металлические изделия, используя любой металл, который можно расплавить.

В *PBF-технологиях* сначала формируется слой строительного материала, а затем происходит обработка этого слоя (лазером, электронным лучом, и иными способами) (рис. 1).

Пошагово технология построения выглядит следующим образом:

1) специальное программное обеспечение разбивает трёхмерную компьютерную модель на слои определённой толщины;

2) на основную плиту наносится слой порошка при помощи специального подвижного блока;

3) лазерный луч сканирует поверхность по траектории в соответствии с созданным ранее слоем модели.

Этот процесс повторяется от слоя к слою до тех пор до полного построения модели.

В технологии спекания порошка расходными материалами могут быть как пластик, так и металл. Здесь используется лазер, спекающий заданную форму в заранее нанесённом слое порошка. Технология применяется для изготовления функциональных узлов и деталей со сложной геометрией.

К группе PBF-технологий относятся DMLS (Direct metal laser sintering), EBM (Electron beam melting), SLS (Selective laser sintering) и SLM (Selective laser melting).

В *DED-технологиях* формирование слоя производится путём подачи строительного материала непосредственно в зону расплавления (рис. 2).

Принцип данной технологии заключается в изготовлении изделий путём подачи металлического порошка в оплавляемую область заготовки. Основной рабочий орган машин – это сопловой аппарат для коаксиальной наплавки, представляющая собой агрегат, в котором расположены система фокусировки лазера, система охлаждения, система подачи материала, а также возможны элементы системы управления (датчики, видеокамеры и т. д.). В зависимости от сочетания параметров построения детали коэффициент использования материала может варьироваться от 0,2 до 0,9 (т. е. от 20 до 90 % материала, поступившего через сопловые отверстия системы подачи, фактически формируют деталь).

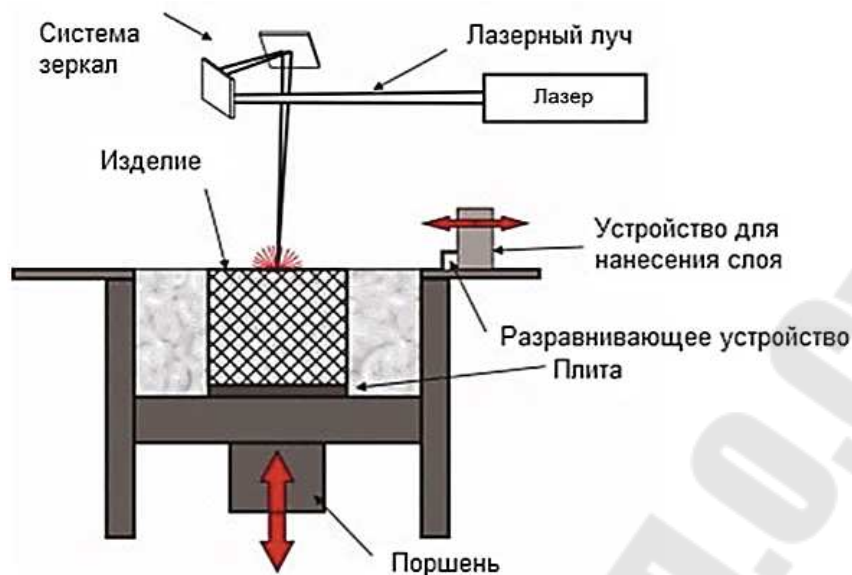


Рисунок 1 – Схематическое изображение установки, работающей по принципу PBF-технологии

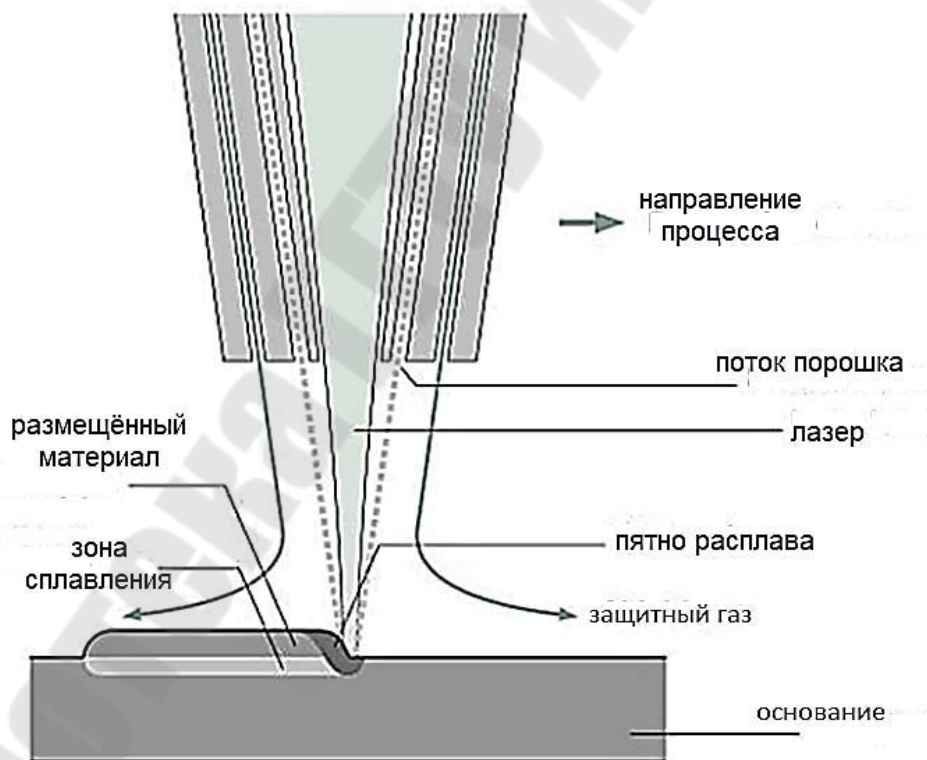


Рисунок 2 – Принципиальная схема формирования слоя по DED-технологии

Последовательность изготовления изделия данным методом выглядит следующим образом:

- с помощью программного обеспечения создаются оптимальные траектории движения напыляющей головы для получения

качественной детали. Параметры лазерного излучения и подачи порошкового материала подбираются в соответствии с типом используемого материала, конфигурации изделия и т. д.;

- напыляющая головка перемещается в точку начала напыления;
- подача порошка начинается через форсунки, которые создают поток порошка, сходящийся в некоторой точке, отдалённой от самой головки;
- из центра головки исходит лазерное излучение, проходящее через точку схождения потоков металлического порошка;
- лазерный луч расплавляет поверхность подложки, на которую происходит напыление, образуя небольшую ванну расплава. Порошок, доставляемый в эту область, попадает в жидкий металл;
- после затвердевания ванны расплава образуется дорожка нанесённого металла.

Управление параметрами наносимой дорожки может производиться как вручную, так и через данные САПР-системы. Напыление, как правило, происходит в инертной атмосфере аргона, в которой контролируется содержание кислорода. Требования по содержанию кислорода варьируются в зависимости от типа используемого материала. Этот метод, также, как и метод PBF, позволяет изготавливать изделия с особой микроструктурой, образующейся благодаря высоким скоростям затвердевания металла.

Материалы, полученные с помощью газопорошковой наплавки, обладают высокими механическими свойствами. Подбор оптимальных параметров процесса позволяет получать сплошную структуру материала, а использование систем контроля процесса наплавки снижает вероятность образования дефектов и повышает точность процесса. Процесс использует множество материалов, таких как, сплавы на основе железа, титана, никеля, алюминия и др. В технологии DED обычно используется лазер, мощностью до нескольких киловатт и больший, по сравнению с селективным лазерным плавлением, диаметр пятна, что обеспечивает высокую скорость изготовления деталей.

Технологии, использующие непосредственную подачу исходного материала в область расплава заготовки, используются как для создания новых изделий, так и для ремонта уже существующих. В отличие от технологий, предусматривающих выращивание изделия в толще порошка, такие технологии обладают большей производительностью, позволяют получать функционально-градиентные изделия (изделия из нескольких материалов, либо с плавным переходом), но имеют ограничения при изготовлении тонких стенок и сложности геометрии

изделий. Также, качество поверхности у технологий с непосредственной подачей материала оказывается ниже (табл. 5).

Процесс позволяет изготавливать изделия из нескольких материалов, элементы которого изготовлены из различных материалов. Также существует возможность изготавливать функционально-градиентные изделия с плавным переходом состава материала от одного элемента к другому или осуществлять «*in-situ*» синтез сплавов. Технология позволяет производить ремонт, модификацию, восстановление и добавление элементов к существующим деталям различных геометрий.

К этой группе технологий относятся Direct Metal Deposition (DMD), Laser Engineered Net-Shaping (LENS), Laser Metal Deposition (LMD) и др.

Компании, использующие лазер, по-разному называют свои технологии, хотя, по технической сути, они родственны. Технологии и некоторые производители установок, в которых в качестве строительного материала используется металлический порошок, приведены в табл. 6.

Таблица 5

Сравнительные характеристики технологий

Характеристика/процесс	PBF	DED
1	2	3
Зона построения	Ограничена	Большая и изменяемая
Размер луча	0,05–0,1 мм	2–4 мм
Толщина слоя	100–100 мкм	500–1000 мкм
Скорость построения	Невысокая, 1–5 см ³ /ч	Высокая, 16–320 см ³ /ч
Поверхность построения	хорошая, шероховатость Ra=5–12 мкм, Rz=20–40 мкм	Грубая, шероховатость Ra=20–50 мкм, Rz=150–300 мкм, в зависимости от размера луча
Остаточные напряжения	Высокие	Высокие
Термическая обработка	Термическая обработка для снятия напряжений, горячее изостатическое прессование	Термическая обработка для снятия напряжений, горячее изостатическое прессование
Химический состав	Незначительное выгорание элементов	Незначительное выгорание элементов

Продолжение таблицы 5

1	2	3
Возможности построения	Возможность построения со сложной геометрией с очень высоким разрешением. Возможность построения полых каналов.	Относительно простая геометрия с небольшим разрешением. Ограничения при построении полых каналов.
Ремонт/восстановление	Возможно только в ограниченных случаях (необходима горизонтальная поверхность)	Возможно; способен добавлять металл на любые поверхности.
Добавление металла на имеющиеся детали (наплавка)	Ограничено	Возможно; в зависимости от размеров возможна внутренняя наплавка
Построение функционально-градиентных материалов	Ограничено	Возможно
Мелкодисперсная структура, высокие механические свойства	Да	Да
<i>In-situ</i> синтез сплавов	Да	Да

Таблица 6

Производители оборудования для аддитивного производства

Категории АТ	Название технологии	Производитель
Powder Bed Fusion (PBF)	Laser Melting (LM)	Renishaw Inc.
	Selective Laser Melting (SLM)	SLM Solutions GmbH
	Laser CUSING	Concept Laser GmbH
	Electron Beam Melting (EBM)	Arcam AB
	Direct Metal Printing (DMP)	3D Systems Corp. (бывшая Phenix Systems)
	Direct Metal Laser Sintering (DMLS)	EOS GmbH
Directed Energy Deposition (DED)	Direct Metal Deposition (DMD)	DM3D Technology LLC (ранее POM Group)
	Laser Engineered Net Shaping (LENS)	Optomec Inc.
	Direct Manufacturing (DM)	Sciaky Inc.

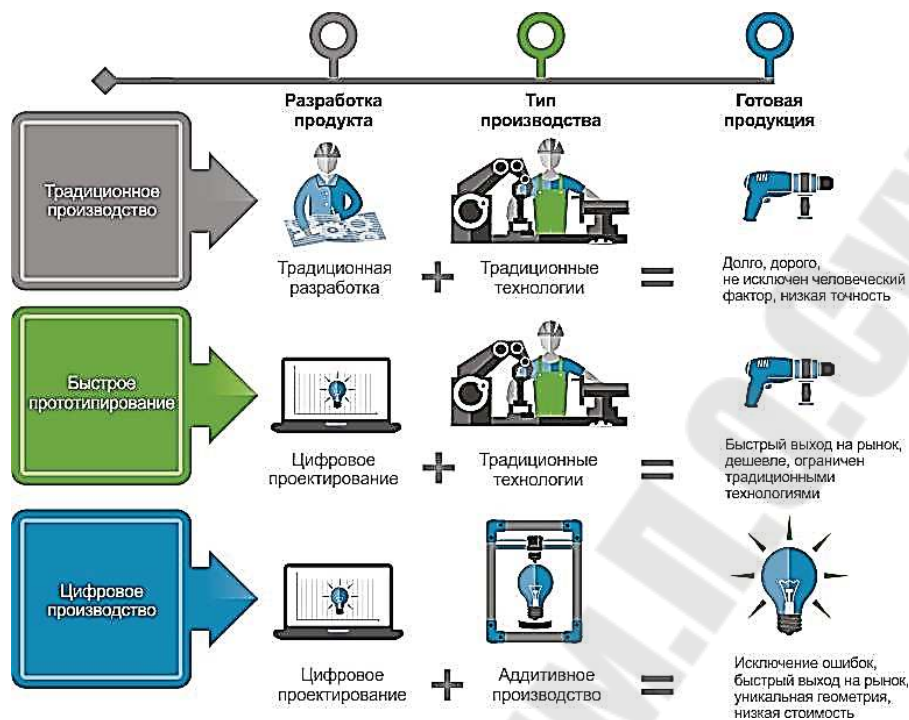


Рисунок 3 – Схема традиционного и аддитивного производства



Рисунок 4 – Кронштейн до оптимизации, 2 033 г. Кронштейн после оптимизации, 327 г.

Существует множество технологий, которые можно назвать аддитивными, объединяет их одно: построение модели происходит путём добавления материала (от англ. add – "добавлять") в отличие от традиционных технологий, где создание детали происходит путём удаления "лишнего" материала. Они позволяют использовать практически ровно то количество материала, которое необходимо для готовой детали. Кроме того, сокращается время на создание прототипа детали и самой модели агрегата. Производственный цикл запуска таких деталей ранее занимал 3–6 месяцев, а при применении аддитивных технологий – всего пару суток (рис. 3.4). Например, на изготовление камеры сгорания и турбины двигателя самолёта ушло по 10 часов.

Развитие этого направления АФ-технологий стимулировало и развитие технологий получения порошков металлов. На сегодняшний день номенклатура металлических композиций имеет широкий спектр материалов на основе Ni и Co (CoCrMo, Inconel, NiCrMo), на основе Fe (инструментальные стали: 18Ni300, H13; нержавеющая сталь: 316L), на основе Ti (Ti6-4, CpTigr1), на основе Al (AlSi10Mg, AlSi12).

Примеры изделий полученных из металлических порошков, представлен на рис. 5, 6.



Рисунок 5 – Топливная форсунка двигателя LEAP от General Electric



Рисунок 6 – Камера сгорания и турбина

1.4 Технология послойного лазерного сплавления

Процесс послойного лазерного сплавления металлического порошка (Selective Laser Melting – SLM) впервые был реализован в 2004 году компанией SLM Solutions GmbH (Герваула). Суть этого процесса заключается в следующем: САD-модель изделия разбивается на слои от 30 до 100 мкм, на подложку наносится слой порошка, затем лазерный луч, сфокусированный на слое порошка, расплавляет его частицы, которые при последующей кристаллизации формируют твёрдую массу, в соответствии с геометрией текущего сечения изделия. Процесс происходит до тех пор, пока не будут изготовлены все слои изделия.

Особенность процесса – комплексное использование систем автоматизированного проектирования (САПР) для создания исходной 3D-модели и лазерной технологии синтеза объёмных изделий при послойном спекании частиц порошка и формирования готового изделия. При внесении конструктивных изменений в деталь или разработке ряда типоразмеров изменениям подвергается только 3D-модель детали при установленном технологическом процессе её получения, что сокращает производственное время изготовления продукции.

В соответствии с исходной 3D-моделью, подготовленной с помощью различных САD-систем, происходит послойное спекание или плавление порошка в зависимости от мощности лазерного излучения. На начальном этапе формируются поддержки для образца. Исходный порошок наносят на специальное основание из различных материалов, разравнивают и подвергают лазерному воздействию. Затем основание опускают вниз и действия повторяют, слой за слоем формируя готовое изделие.

Другая технология SLM – direct deposition, то есть «прямое осаждение» материала. Газопорошковая смесь подаётся коаксиально вдоль оси лазерного луча, непосредственно в точку, куда подводится энергия и где происходит в данный момент построение фрагмента детали. При этом размер деталей практически не ограничен.

В процессе изготовления деталей также немаловажную роль играет защитная атмосфера, особенно при работе с титаном ввиду его химической активности. В процессе осуществляется постоянная продувка рабочей камеры инертным газом. Таким образом, технология селективного лазерного спекания позволяет воспроизвести модулируемое изделие с высокой степенью точности.

Уже сейчас при штучном и мелкосерийном производстве зачастую становится экономически выгодным «вырастить» небольшую партию деталей на SLS-машине, чем изготавливать литейную или штамповую оснастку. В сочетании с НІР (Hot Isostatic Pressing – горячее

изостатическое прессование) и соответствующей термообработкой такие детали не только не уступают литым или кованным изделиям, но и превосходят их по прочности на 20–30 % (рис. 7–8).



Рисунок 7 – Кронштейн



Рисунок 8 – Литейная SLA-модель и Al-отливка

С помощью 3D-печати уже изготавливают детали для авиационного двигателя ПД-14. Теперь, чтобы изготовить комплект завихрителей (рис. 9), благодаря аддитивным технологиям требуется всего 5 дней. Ранее, по старой технологии, производители тратили на ту же работу около 2-х месяцев.



Рисунок 9 – Комплект завихрителей

1.5 Технология послойного электронно-лучевого синтеза и напыления

Технология синтеза изделий электронным лучом (СИЭЛ) относительно новая, но уже успешно показавшая большие перспективы в аэрокосмической промышленности для изготовления широкой номенклатуры деталей и конструкций самолётов, вертолёт, космических ракет и подсистем. В основу технологии положена операция послойного спекания (плавления) металлического порошка в вакууме с помощью электронно-лучевой пушки. Данный процесс отличают быстрый переход к изготовлению трёхмерных изделий непосредственно от системы автоматизированного проектирования, возможность использования широкого спектра металлов и сплавов, в том числе тугоплавких (рис. 10).

Можно выделить несколько особенностей электронно-лучевого спекания (плавления) по сравнению с более традиционными прикладными технологиями:

- Безокислительная среда для синтеза химически активных материалов;
- Возможность синтеза тугоплавких металлов и сплавов;
- Дополнительная очистка порошка в процессе обработки;

- Объёмный источник теплоты вследствие пробега электронов в глубь порошка;
- Малый диаметр пучка в месте его встречи с подложкой;
- Высокая удельная поверхностная плотность луча;
- Периодический характер приложения тепловой нагрузки к каждой точке поверхности подложки;
- Наличие жидкого проводящего слоя в электромагнитном поле вследствие воздействия электронного луча;
- Зависимость тока фокусировки луча от угла его отклонения (для электронных пушек без преломления луча).



Рисунок 10 – Изделия, изготовленные технологией электронно-лучевого синтеза

Метод электронно-лучевого напыления, основанный на явлении испарения и конденсации паров различных материалов в вакуумной среде, позволяет получать слои из следующих комбинаций металлических и керамических систем: $MeCrAlY$ (где Me – Ni, Co, Fe), $MeCrAlYHfSiZr$, керамики $ZrO_2 - Y_2O_3$.

К числу достоинств метода следует отнести:

1. Относительно высокую производительность.
2. Возможность получения слоя толщиной 1–3 мкм, что снижает вероятность возникновения остаточных напряжений в слое.
3. Возможность формирования слоя из любого материала.
4. Высокую частоту и химическую однородность образующегося слоя.
5. Высокую степень автоматизации и контроля технологического процесса.

Возможные толщины слоя находятся в диапазоне от единиц нанометров до десятков микрометров.

Создание произвольных комплексов нанесения покрытий методами послойного электронно-лучевого синтеза и электронно-лучевого напыления позволит значительно увеличить ресурс эксплуатации деталей и узлов ракетных комплексов, авиационных двигателей, наземных газотурбинных установок и получить характеристики, которые не достигаются традиционными способами, изменением состава материала и любой химической обработки.

Свойства КМ улучшают, корректируя комбинацию режимов синтеза изделий и термообработки. Термическую обработку можно производить в импульсном или непрерывном режиме не только поверхностного слоя, но и в процессе «роста» изделия, формируя тем самым программную структуру, например, с упрочняющими фибрами. Влиять на структуру материала можно, регулируя:

- 1) скорость нагрева;
- 2) температуру;
- 3) время выдержки при заданной температуре;
- 4) скорость охлаждения.

Управляющими параметрами для получения в каждом слое материала заданной структуры является ток пучка, скорость сканирования, диаметр пучка в месте встречи с мишенью, время импульса пучка, время паузы.

1.6 Технология послойного синтеза изделий ионным пучком

Для дальнейшего развития аддитивных технологий актуально стоит задача быстрого получения композиционных изделий сложной геометрической формы. Изделия с необходимым комплексом прочностных и пластичных свойств могут быть получены сочетанием основного и упрочняющего порошков. В качестве упрочняющего используют порошок химически активных тугоплавких материалов, которые способны реализовать различные многокомпонентные системы: карбиды, бориды, нитриды титана, молибдена, вольфрама, гафния, тантала, ниобия.

Разработка технологии послойного синтеза ионным пучком (СИП) и проектирование принципиально нового технологического оборудования открывают новые возможности в создании композиционных изделий из порошка различных химических составов, получении деталей с программированной структурой и заранее прогнозируемыми свойствами.

В отличие от широко распространённой технологии быстрого прототипирования лазерным или электронным лучом новый подход:

1. Открывает новые возможности в формировании химического состава композиционного изделия; в качестве элементов могут

быть использованы ионы различных газов, которые при бомбардировке металлического порошка образуют новые химические соединения.

2. Позволяет значительно повысить точность изготовления изделий (размеры кроссовера ионного пучка при ускоряющем напряжении 120–150 кВ достигают 1 мкм, что на два порядка меньше электронного пучка).
3. Получать многокомпонентные сплавы из порошка различных химических составов.
4. Использовать при синтезе порошки химически активных тугоплавких металлов, т. к. процесс реализуется в вакууме.
5. Формировать структуру изделия непосредственно во время «роста» изделия.

2 ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Первое время технологии аддитивного производства развивались исходя из доступных материалов (восков, полимерных и бумажных слоистых материалов). В дальнейшем для соответствия новым процессам аддитивного производства разрабатывались новые материалы, которые подбирались и проектировались в точном соответствии с рабочими параметрами различных процессов, поэтому росло качество изготовленных изделий. Изделия получались более точной формы, имели большую прочность и долговечность, появилась возможность использовать для технологий АП металлы, композиты и керамику.

Уникальный метод обработки в аддитивном производстве предъявляет особые требования к применяемым строительным и модельным материалам.

К настоящему времени известно большое количество опробованных материалов. Так, например, в процессах *селективного лазерного спекания* используют:

- *однокомпонентные материалы* – поликарбонат, нейлон, Fe, Ti и Cu;
- *многокомпонентные и интерметаллидные системы* (Ni, Al, Ti, W их карбиды и интерметаллиды, сплав INCOTEL 625, Ti – 6Al – V, Mo – Cu, Cu – Ni, Cu – Sn, Cu – Sn – Ni, Fe – Cu, бронза – Cu₃P, WC – Co, TiC – Ni/Co/Mo, TiCN – Ni, TiB₂ – Ni, ZrB₂ – Cu, Fe₃C – Fe);
- *низко- и высоколегированные стали;*
- *конструкционную* (ZrO₂, Al₂O₃, Al₂O₃ – Al₄B₂O₉, Al₂O₃ – SiO₂ – B₂O₃, Si₃N₄ – Al₂O₃, Ti – Zn – Al/ Al₂O₃, Ti+ZrO₂, ZrO₂ – Al₂O₃ – Al, ZrO₂ – Al – Y₂O₃) и *сегнетоэлектрическую* (Pb(ZrxTil-x) O₃, Bi₄Ti₃O₁₂, Li_{0,5}Fe_{2,5-x}Cr_xO₄, BaFe_{12x}Cr_xO₁₉) *керамики;*
- *керамопласты* (Al₂O₃+полиметилметакрилат) и *пьезопласты* (ЦТС+PVDF).

По мере того, как область применения аддитивных технологий расширяется, становится ясно, что необходимо и дальше разрабатывать новые материалы для использования преимуществ аддитивного производства в своих интересах.

Расширение спектра материалов, пригодных для аддитивного производства, требует масштабных исследований для установления соотношений «процесс – структура – свойства». При накоплении достаточного объёма информации появится возможность формирования базы данных физико-химических процессов, происходящих в

материалах, и расширения круга металлических и неметаллических материалов, применяемых в аддитивных технологиях.

2.1 Металлические материалы

На сегодняшний день номенклатура металлических композиций имеет широкий спектр материалов на основе *Ni* и *Co* (*CoCrMo*, *Inconel*, *NiCrMo*), на основе *Fe* (инструментальные стали: *18Ni300*, *H13*; нержавеющая сталь: *316L*), на основе *Ti* (*Ti6-4*, *SpTigr1*) и на основе *Al* (*AlSi10Mg*, *AlSi12*). Производятся порошки бронз, специальных сплавов, а также драгметаллов – главным образом для нужд дентальной медицины. Из металлических порошков «выращивают» заготовки пресс-форм, специальные инструменты, оригинальные детали сложной конфигурации, которые затруднительно или невозможно получить литьём или механообработкой.

До настоящего времени в АП использовалось довольно ограниченное количество коммерческих сплавов (табл. 7). Из представленных материалов наиболее широко исследован сплав *Ti-6Al-4V*, что объясняется использованием титановых сплавов для сложных деталей мелкосерийного выпуска. Этот сплав, имеющий уникальные химические и механические свойства, а также обладающий биосовместимостью, находит все более широкое применение в авиационно-космической промышленности и медицине. Для изготовления и ремонта изделий путём подачи металла в зону расплавления в аддитивных технологиях применяют жаропрочные никелевые сплавы: *Inconel 718*, *Inconel 625* и *Waspaloy*.

В 2011 г. Hederick E. опубликовал обзор металлических материалов для аддитивного производства, отметив, что особый интерес к металлическим материалам в аэрокосмической и биомедицинской промышленности связан с возможностью повышения производительности при уменьшении общей стоимости для производства.

Новый материал – инконель 625 был представлен компанией ExOne в 2014 г. Несмотря на то, что для изготовления из него изделий используется связующее, инконель можно спекать практически до полной плотности (плотность составляет более 99 %), сохраняя при этом приемлемую размерную точность. При распространении этого процесса на другие металлы и сплавы, можно ожидать серьёзного изменения экономики аддитивного производства металлических изделий.

Для металлургической отрасли в настоящее время компания ExOne предлагает нержавеющую сталь 316 с бронзой, нержавеющую

сталь 420, отожжённую нержавеющую сталь 420, бронзу и инконель 625 – Inconel 625. Для материалов из нержавеющей стали бронза используется в качестве пропитки для изготовления практически беспористых изделия (близких к литым). Для металлов используют и полимерные связующие. В машинах, продаваемых компанией ExOne, используются металлические частицы либо песок для изготовления металлических изделий, песчаных форм или стержней для литья.

Таблица 7

Сплавы, используемые в промышленном масштабе при АП

Ti	Al	Инструментальная сталь	Жаропрочный сплав	Нержавеющая сталь	Тугоплавкие сплавы
Ti-6Al-4V	Al-Si-Mg	H13	IN625	316, 316L	MoRe
ELI Ti	6061	Cermets	IN718	420	Ta-W
CP Ti			Stellite	347	CoCr
γ -TiAl				PH 17-4	Alumina

Внедрение на ведущих предприятиях современного оборудования, позволяющего производить детали с использованием аддитивных технологий, вызвало потребность в производстве **высококачественных порошков**. Общих требований к металлопорошковым композициям, применяемым в АМ-технологиях, в настоящее время не существует. Разные компании-производители АМ-машин рекомендуют работу с определённым перечнем материалов, обычно поставляемых компанией-производителем.

Порошки – сыпучие материалы с характерным размером частиц до 1,0 мм – условно классифицируют по размерам частиц (по условному диаметру d), подразделяя их на:

- нанодисперсные с $d < 0,001$ мкм,
- ультрадисперсные – $d = 0,01-0,1$ мкм,
- высокодисперсные – $d = 0,1-10$ мкм,
- мелкие – $d = 10-40$ мкм,
- средние – $d = 40-250$ мкм и
- крупные – $d = 250-1000$ мкм.

В разных машинах используют порошки различного фракционного состава. Одним из параметров, характеризующих порошок, является *средний диаметр частиц* – d_{50} . Например, $d_{50} = 40$ мкм означает, что 50 % частиц порошка имеют размер частиц меньше или равный 40 мкм.

Чем меньше величина d_{50} , тем меньше может быть задан шаг

построения, более рельефно могут быть проработаны мелкие элементы детали и более гладкую поверхность можно получить у построенной детали. Но если порошок имеет слишком малый размер частиц, то в процессе построения лёгкие частицы будут «вылетать» из зоны расплава, что приведёт к повышенной шероховатости детали и микропористости. В силу этого при работе с мелкодисперсными порошками с $d_{50} < 10$ применяют маломощные лазеры, следовательно, малопроизводительные. Такие порошки (с соответствующими настройками машины) применяют в основном для изготовления микродеталей, которые иным способом изготовить невозможно. В связи с повышенной склонностью мелкодисперсных порошков к комкованию требуются особые условия хранения материалов и эксплуатации АМ-машин.

Необходимой характеристикой порошков является высокая плотность упаковки, чтобы объем напечатанных изделий содержал высокую объёмную долю порошка и, следовательно, обладал достаточной прочностью, чтобы выдержать операции удаления порошка и очистки. Высокая плотность упаковки может быть достигнута либо путём подбора формы частиц порошка, либо сепарацией диапазона размером частиц, так чтобы мелкие частицы заполняли пустоты между более крупными частицами. На практике используют оба подхода, когда это возможно.

Общим требованием к порошкам для аддитивных технологий является сферическая форма частиц и высокая однородность гранулометрического состава. Размеры частиц обычно находятся в пределах от 100 до 20 мкм, что, по-видимому, обусловлено размером лазерного луча. Сферическая форма теоретически обеспечивает более компактную укладку частиц в определённый объем и соответственно высокую плотность изделия, а также текучесть порошка с минимальным сопротивлением в системах подачи материала.

В основных свойствах поставляемых порошка указывают процентное содержание кислорода, что требование низкого содержания кислорода (менее 0,05 % масс.) связано с уменьшением содержания оксидов, имеющих высокую температуру плавления (табл. 8).

Основные характеристики наиболее востребованных порошков

Наименование основы	Наименование сплава	Размеры частиц мкм	Содержание кислорода, %	Производитель
На основе никеля и кобальта	CoCrMo	20–50	–	ВИАМ
	Inconel	10–50	0,03	НЦПМ (Пермь)
	NiCrMo	10–50	0,02	ВИАМ
На основе железа	Нержавейка	10–50	0,05	НЦПМ (Пермь)
	03X16H15M3	10–50	0,01	НЦПМ (Пермь)
На основе алюминия	AlSiMg	50–100	0,05	ООО «РСТ»
	AlSi	20–50	0,05	ООО «РСТ»
	Д16	20–50	–	ООО «РСТ»
	AlSi ₉ Cu ₃	–	–	НПО «Русредмет»
На основе титана	ПТН-9	10–100	0,05	«Нормин»
	ПТН-8	0–45	0,05	«Нормин»
Полиамид	ПА12	10–50	0,05	ООО «АТГ»

Свойства порошков зависят от способа их получения. Порошки одного и того же материала, полученные разными способами могут резко отличаться по свойствам. Все свойства порошков, которые подлежат контролю для правильной организации технологического процесса, делятся на физико-химические и технологические свойства.

Показатели физико-химических свойств порошков:

- химический состав;
- гранулометрический состав;
- форма и структура частиц;
- удельная поверхность;
- микротвёрдость частиц порошка и т. п.

Технологические свойства порошков:

- насыпная плотность – масса единицы объёма порошка при свободной засыпке;
- текучесть – скорость истечения навески порошка в 50 г. через выходное отверстие специальной воронки (угол конуса 60°, диаметр отверстия 2,5 мм, носик срезан под прямым углом на расстоянии 3 мм от конуса);
- прессуемость – способность порошка под давлением образовывать прессовку (заготовку) заданной формы, плотности и размеров.

С учётом указанных особенностей производители оборудования

для послойного синтеза, как правило, поставляют сертифицированные порошки, специально разработанные для конкретного станка и соответствующего программного обеспечения. При этом использование других порошков не рекомендуется или даже запрещается.

Проблема получения порошковых материалов актуальна не только для развития АФ-технологий, но и для целей классической порошковой металлургии. Порошковые композиции находят применение в таких высокотехнологичных отраслях, как авиастроение, энергетика, военная и космическая техника, судостроение, приборостроение (табл. 9).

Таблица 9

Области применения порошковых материалов

Компоненты порошка	Применение
Al-Ni-Co, Fe-Nd-B	Производство магнитов, магниты
Алюминиевая бронза	Судовые винты
Al-Si-Mg	Сплавы с термостабильной структурой
Al-Sn-Cu	Подшипники скольжения
Al-переходные лантаноиды	Сплавы с повышенной термопрочностью
Bi-Te, теллурид висмута	Устройства, использующие эффект Пельтье
Cr-Al	Защитные покрытия
Co-Cr	Сплавы для зубопротезирования
Cu-Ba, Cu-Y	Суперпроводники
Cu-Cr-Zr	Электропроводники без бериллия
Cu-In-Ga – Selenide	Фотогальванические материалы
Cu-Mn-Ni, Cu-Ti-Sn	Режущий инструмент
Au-Pt-Pd-Ag-In, Ag-Cd-Zn-Cu	Сплавы для пайки
Au-Ag-Cu	Тонкопленочные покрытия
Fe-14 % Cr – 0,4 % C	Специальный инструмент и оснастка
Fe-Mn	Износостойкие опоры прокатных станов
Fe-6 % Si	Сердечники трансформаторов
Fe-Si-Al	Магнитные компоненты
Сплавы Mg	Металлические матрицы

Компоненты порошка	Применение
Ni-алюмиды	Структурные компоненты и покрытия
Ni-Ce	Катализаторы
Ni-Cr-Fe-Si-B	Порошки для плазменного напыления
Ni-Cr-Mo-B	Антикоррозионные покрытия
Ni-лантаноиды	Топливные элементы
Компоненты порошка	Применение
Ag-Cu (72/28)	Платы для пайки
Нержавеющая сталь 304/316	ММ-технология
Tb-Fe	Оптико-электронные устройства

В последние годы отмечается значительный интерес к объёмным наноматериалам, это обусловлено тем, что их конструкционные и функциональные свойства значительно отличаются от свойств крупнозернистых аналогов, в связи с чем нанопорошковые материалы могут быть эффективно использованы для целей аддитивных технологий.

Методы получения металлических порошков условно делят на физико-химические и механические.

К *физико-химическим* относят методы, связанные с физико-химическими превращениями исходного сырья, при этом химический состав и структура конечного продукта – порошка – существенно отличается от исходного материала. Основными физико-химическими методами получения порошков являются: восстановление оксидов и солей; электролиз; диссоциация карбониллов и гидрометаллургический способ.

Восстановление оксидов и солей. Восстановление оксидов и солей является одним из наиболее распространённых и экономичных способов, особенно когда в качестве исходного материала используют руды, отходы металлургического производства (окалина) и другие дешёвые виды сырья. Восстановлением в техническом смысле этого слова, называют процесс получения металла из его химического соединения путём отнятия неметаллической составляющей (кислород, солевой остаток) при помощи вещества, называемого восстановителем. Процесс восстановления является одновременно и процессом окисления. Если исходное химическое соединение (оксид, соль) теряет неметаллическую составляющую или восстанавливается, то восстановитель вступает с ней во взаимодействие или окисляется. В

общем случае реакцию восстановления можно записать в виде $MeB + X \leftrightarrow Me + XB$, где Me – любой металл, порошок которого нужно получить; B – неметаллическая составляющая (кислород, солевой остаток и др.) восстанавливаемого исходного химического соединения; X – восстановитель; XB – химическое соединение восстановителя. В порошковой металлургии в качестве восстановителя наиболее распространены: водород, оксид углерода (CO), конвертируемый природный газ, диссоциированный аммиак, эндотермический газ (эндогаз), твёрдый углерод (кокс, уголь, сажа) и металлы.

Среди физико-химических методов получения металлических порошков *электролитический способ* по промышленному распространению занимает второе место после восстановления. Получение порошков электролизом заключается в разложении водных растворов соединений выделяемого металла или его расплавленных солей при пропускании через них постоянного электрического тока и последующей разрядке соответствующих ионов металла на катоде. В зависимости от условий электролиза на катоде можно получать твёрдые хрупкие осадки в виде плотных слоёв, губчатые мягкие осадки и осадки рыхлые. Твёрдые и губчатые осадки для получения порошка измельчают, а рыхлые используют как готовый порошок. Основными факторами, влияющими на структуру катодного осадка, является концентрация ионов выделяемого металла, температура электролита и плотность тока.

Диссоциация карбониллов. Карбонилы представляют собой химические соединения металлов с оксидом углерода. В основе карбонильного метода лежит способность некоторых металлов под воздействием оксида углерода (CO) образовывать комплексные соединения, называемые карбонилами, которые при определённых условиях могут диссоциировать с образованием порошков. Общим требованием к таким соединениям при получении порошков является их легколетучесть и невысокие температуры образования и термического разложения. В промышленных масштабах карбонильным методом производят порошки Ni , Fe , Co , Cr , Mo , W и некоторых других металлов. Метод позволяет получать и полиметаллические порошки. В этом случае термическому разложению подвергают смесь карбониллов соответствующих металлов, карбонилы при этом готовят отдельно. Сплавы можно получать и в том случае, если в аппарат разложения вместе с парами карбонила вводить порошок другого металла. Карбонил разлагается на поверхности порошковых частиц и образуется сплав.

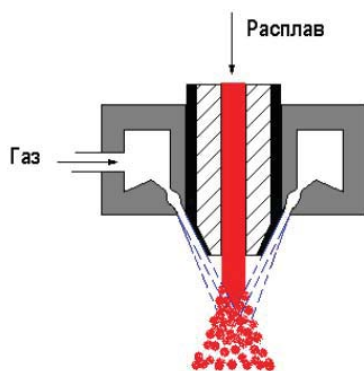
Гидрометаллургический способ является одним из способов хлорной металлургии, в которой используются активные свойства хлора

и хлоридов для получения редких металлов и веществ в высокочистом состоянии, когда другие известные методы не могут быть применены. Метод может быть использован и для получения легированного порошка из комплексных руд, содержащих никель, хром, ванадий и другие легирующие элементы, и перерабатываемые в настоящее время с большими потерями указанных элементов. Сущность способа заключается в том, что металлосодержащий материал подвергается процессу восстановления. Полученный продукт обрабатывается соляной кислотой, в результате чего металл переходит в раствор, образуя хлориды по схеме $Me + HCl \rightarrow MeCl + H_2$. Нерастворимые компоненты (пустая порода, зола и др.) остаются в осадке. Раствор отделяют от осадка фильтрацией, упаривают до концентрации насыщения и подвергают кристаллизации. Полученные кристаллы хлоридов восстанавливают водородом. К числу основных достоинств гидрометаллургического способа следует отнести высокую чистоту порошка и почти полную регенерацию водорода и соляной кислоты, образующихся на стадиях растворения металлосодержащего сырья и восстановления хлоридов. Кроме того, нерастворимый осадок имеет свою самостоятельную ценность, т. к. после перевода в раствор получаемого металла он обогащается другими ценными компонентами. В случае использования легированного металлосодержащего сырья можно регулировать состав получаемого порошка путём селективного восстановления сложных хлоридов.

Механические методы обеспечивают производство порошка без существенного изменения химического состава сырья. К механическим методам относятся различные виды *размола в мельницах*, а также *диспергирование расплавов посредством струи газа или жидкости (атомизация)*. Порошки, получаемые путём размола на данный момент, не применяют для аддитивных технологий, т. к. частицы порошка имеют осколочную, неправильную форму.

Более 90 % всех порошков, применяемых в аддитивных технологиях, получают методами диспергирования расплава. К основным технологиям получения порошков для установок послойного синтеза относятся: *газовая, центробежная и плазменная атомизации*.

Газовая атомизация. При газовой атомизации металл расплавляют в плавильной камере (в вакууме или инертной среде) и затем сливают через специальное устройство – распылитель, где производится разрушение потока жидкого металла струёй инертного газа под давлением (рис. 11).



a)



б)

Рисунок 11 – Распыление расплава газом: *a* – схема установки компании PSI; *б* – установка компании «РСТ» УР-5

Принцип изготовления металлических порошков методом атомизации заключается в следующем:

- в вакуумной плавильной камере с донным сливом производится расплавление и перегрев металла до температуры распыления;
- после создания избыточного давления в плавильной камере и подъёма стопора, металл сливается через подогреваемую трубку в камеру распыления (атомизации);
- попадая в рабочую часть форсунки, металл распыляется потоком аргона (от 40 до 70 атм.) с образованием дисперсных гранул сферической формы;
- пролетая в потоке газа через объем распылительной колонны, частицы порошка охлаждаются и попадают в приёмный конус, далее через шаровой вентиль сыплются в первичный бункер. Часть наиболее дисперсного порошка, находящегося во взвешенном состоянии, не успевает осесть на стенках конуса и камеры и вместе с потоком аргона вылетает по выпускной трубе. Затем попадает в циклон, отделяющий порошок, который сыпается во вторичный бункер;
- полученный порошок подвергают газодинамической сепарации и ситовому рассеву с целью выделения необходимой фракции в зависимости от назначения порошка.

Методы газовой атомизации позволяют получать мелкодисперсные порошки со сферической формой частиц (рис. 12) при достаточно высокой производительности процесса с контролируемой дисперсностью порошка и обеспечивают высокий выход годного по фракции порошка.

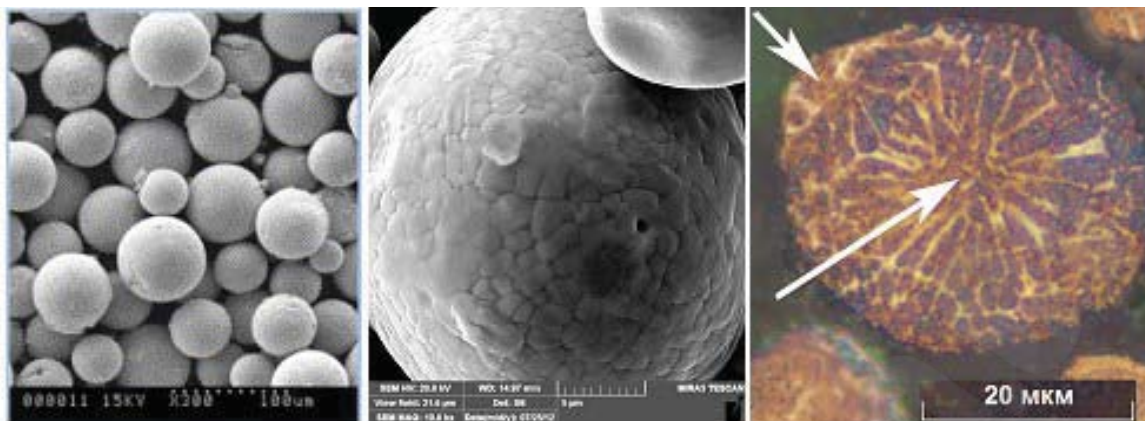


Рисунок 12 – СЭМ-изображения частиц, полученных при помощи газовой атомизации

Недостатки получения порошков методами газовой атомизации заключаются в том, что частицы порошка, получаемые этими методами, могут иметь внутреннюю пористость из-за захлопывания инертного газа внутри частиц в процессе их кристаллизации. Кроме этого, существуют некоторые ограничения по получению порошков активных металлов, например, титановых сплавов, связанные с высокой активностью материала, а также имеются трудности при получении однородных по составу порошков, вызванные ликвацией.

Наиболее характерным и неизбежным дефектом гранул жаропрочных материалов, получаемых распылением жидкого металла потоком инертного газа, являются сателлиты, т. е. «налипание» мелких частиц на более крупные.

Технологию получения порошков с использованием машин для вакуумного плавления называют *VIGA* – Vacuum Induction Melt Inert Gas Atomization (рис. 13). Атомайзеры типа *VIGA* применяются, в частности, для получения никелевых жаропрочных сплавов. Технология *VIGA* позволяет получать порошки металлов (кроме титановых сплавов и реактивных металлов) с дисперсностью $d_{50} = 30$ мкм.

К металлическим порошкам для данной технологии предъявляются жёсткие требования: сферическая форма частиц строго определённого гранулометрического состава, высокая химическая однородность, отсутствие пористых гранул, пониженное содержание газовых примесей – кислорода и азота.

Для технологии послойного лазерного сплавления в ВИАМе используют порошки фракции от 10 до 50 мкм, для ремонтных технологий лазерной газопорошковой наплавки – фракции от 40 до 80 мкм, а порошки припои – фракций 40–100 и 10–200 мкм.

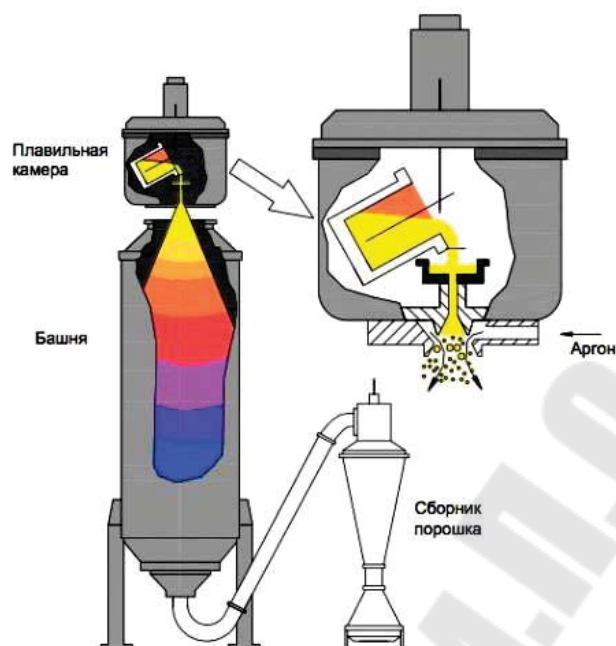
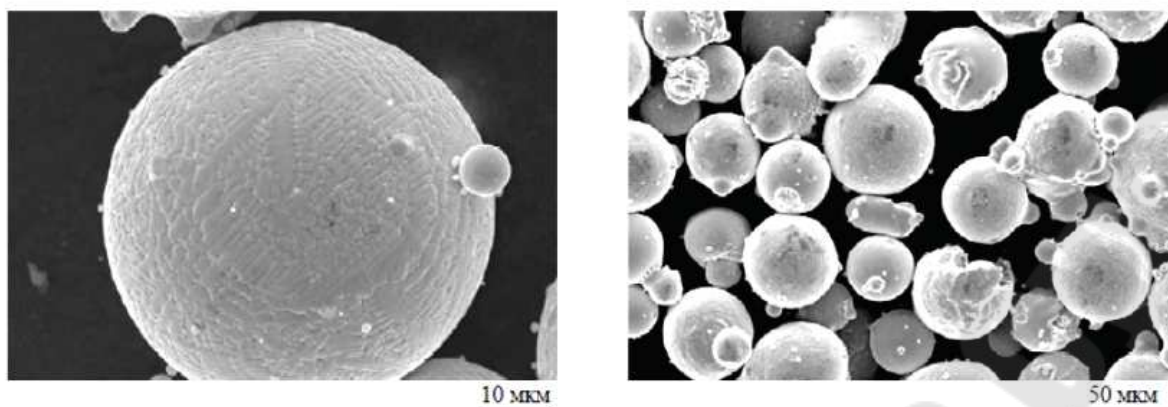


Рисунок 13 – Схема атомайзера VIGA

Атомайзеры типа *VIGA* применяют, в частности, для получения следующих порошков:

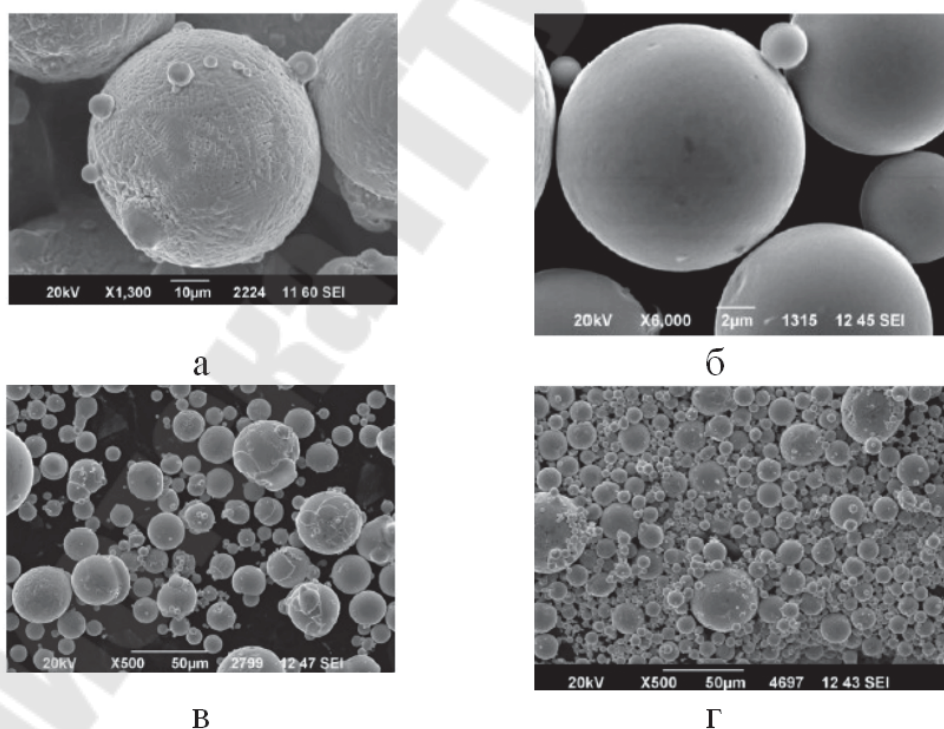
- *никелевые жаропрочные сплавы* (например, *Inconel 718*, *Rene 88* и т. д.) для деталей авиационных и стационарных турбин;
- *сплавы на основе кобальта* для использования в медицине, стоматологии и производстве мишеней ионного распыления;
- *порошки для плазменного напыления* (например, *NiCrAlY*, *CoCrAlY* и т. д.) для плазменного напыления защитных покрытий на детали из жаропрочных сплавов;
- *порошки для гранульной металлургии* (например, *17-4 PH*, *316L*) для автомобильных деталей массового производства;
- *композиции для спекания в порошковом слое* (например, кобальтовые сплавы и драгоценные металлы) для применения в АМ-машинах;
- *высоколегированные стали* (например, инструментальная и быстрорежущая сталь) с очень высоким содержанием карбидов;
- *цветные металлы* (например, медные или оловянные сплавы) для различного применения.

Исследование структуры поверхности гранул сплава ЭП648-ВИ показало, что все гранулы имели выраженную дендритную структуру во всем диапазоне гранулометрического состава и сферическую форму (рис. 14, а), однако для них характерно большое количество образующихся дефектов – сателлитов (рис. 14, б).



а) б)
 Рисунок 14 – Микроструктура (а – х1500; б – х500) поверхности гранул порошка сплава ЭП648-ВИ

Большое количество сателлитов также отмечалось при исследовании высокотемпературных припоев, таких как ВПр36 и ВПр44, представляющих собой, по сути, также жаропрочные сплавы на никелевой основе, дополнительно легированные кремнием и бором (рис. 15).



а) б) в) г)
 Рисунок 15 – Микроструктура гранул припоев ВПр36 (а), ВПр50 (б), ВПр24 – распыление холодным (в) и горячим (г) газом

Пористость в гранулах, полученных распылением расплава потоком газа, является неизбежным следствием технологии их получения. Таким образом, несмотря на высокую производительность, высокий выход годного порошка и сферическую форму получаемых частиц, метод газовой атомизации имеет недостатки, связанные с образованием дефектных частиц и необходимостью последующей сепарации порошка.

Одним из видов газовой атомизации является технология *EIGA* (*Electrode induction-melt Inert Gas Atomization* – индукционная плавка электрода с распылением газом) (рис. 16, 17). Эта технология применяется для получения порошков активных материалов (например, *Ti, Zr, Hf, V, Pt, Ir, Nb, Mo* и др.), т. к. плавка этих металлов в керамических тиглях затруднена даже в условиях вакуума.

Согласно этой технологии, предварительно выплавленные в форме электродов прутья (*feed stock* – сырье, исходный материал), подвергаются индукционной плавке. Плавление производится опусканием медленно вращающегося электрода в кольцевой индуктор. Капли металла попадают в систему форсунок и распыляются инертным газом.

Технология *EIGA* весьма производительна (при 2-сменной работе может быть получено до 500 кг порошка в день) и универсальна по распыливаемым металлам, но порошки имеют размер частиц равный $d_{50} = 60\text{--}80$ мкм в зависимости от материала.

Данная технология характеризуется низкими капитальными расходами и относительно низким потреблением энергии. Технология *EIGA* является надёжным, простым, безопасным и экономичным процессом.

К недостаткам технологии относится возможность образования закрытой пористости в порошке и относительно высокое потребление аргона (существует возможность рециркуляции).

В конструкции *EIGA*-атомайзера может быть предусмотрена возможность слива металла в изложницы, т. е. он может быть использован в качестве плавильной установки.

Ещё одной разновидностью газовой атомизации активных металлов и сплавов свободных от керамических включений является использование разряда плазмы в водохлаждаемом медном тигле (*PIGA* – *Plasma Melting Induction Guiding Gas Atomization*).

Комбинация индукционной плавки в медном водохлаждаемом тигле – *VIGA-CC* позволяет избежать контакта расплава металла с керамикой, тем самым обеспечивать высокое качество порошковых материалов.

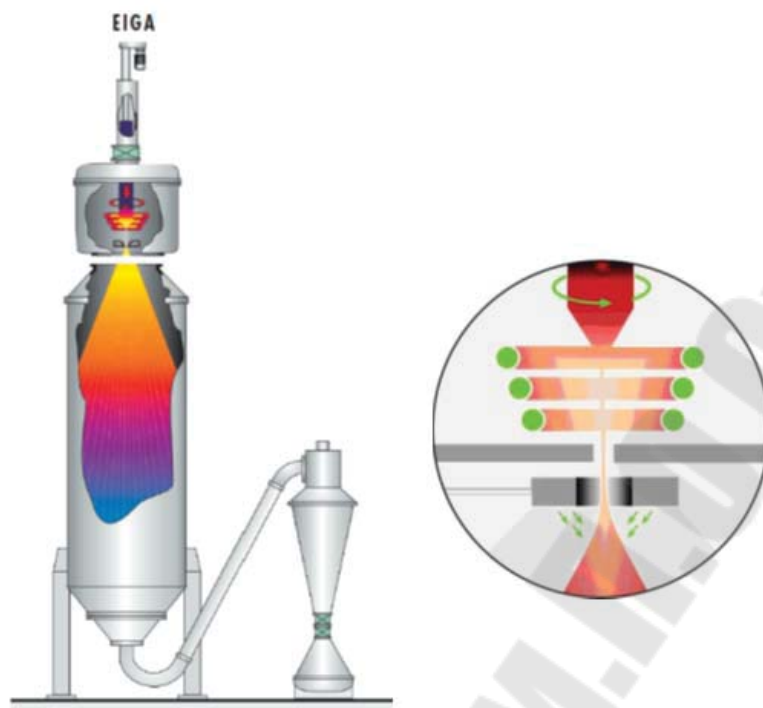


Рисунок 16 – Схема процесса атомизации по технологии EIGA

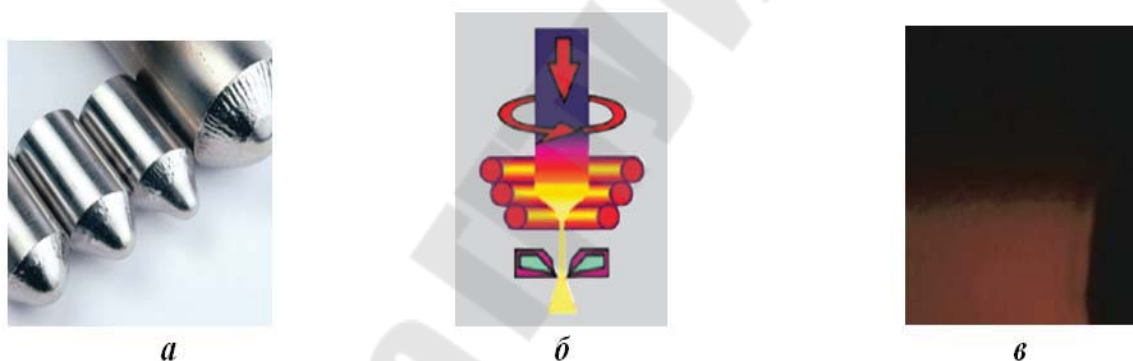


Рисунок 17 – Технология EIGA: а – исходный материал (*feed stock*) для получения порошка; б – схема процесса; в-процесс EIGA. Предоставлено ALD

Центробежная атомизация. Наибольший интерес среди технологий центробежной атомизации представляют те технологии, которые позволяют получать порошки активных и тугоплавких металлов, являющихся наиболее ценными для аддитивных технологий. Технология *REP – Rotating Electrode Process* (метод вращающегося электрода) – предполагает распыливание расплава, создаваемого электрической дугой между прутком материала и вольфрамовым электродом. Главным достоинством технологии является полное исключение контакта расплава с тиглем и разливочными устройствами. Центробежное распыление состоит в том, что струя расплава распыляется вращающимся диском на капли (рис. 18).

Вариантом этой технологии является процесс *PREP – Plasma Rotating Electrode Process*, в соответствии с которым плавление прутка производят высокоскоростным потоком ионизированного инертного газа.

Технология PREP характеризуется узким гранулометрическим составом, отсутствием газовой пористости и относительно низким потреблением аргона (возможна внутренняя рециркуляция). К недостаткам данной технологии относят сравнительно высокое потребление энергии, отсутствие полного расплавления перед атомизацией (анизотропия свойств частиц), дорогостоящие сырьевые материалы (прецизионно обработанный слиток) и возможность образования брызг от вольфрамового электрода.

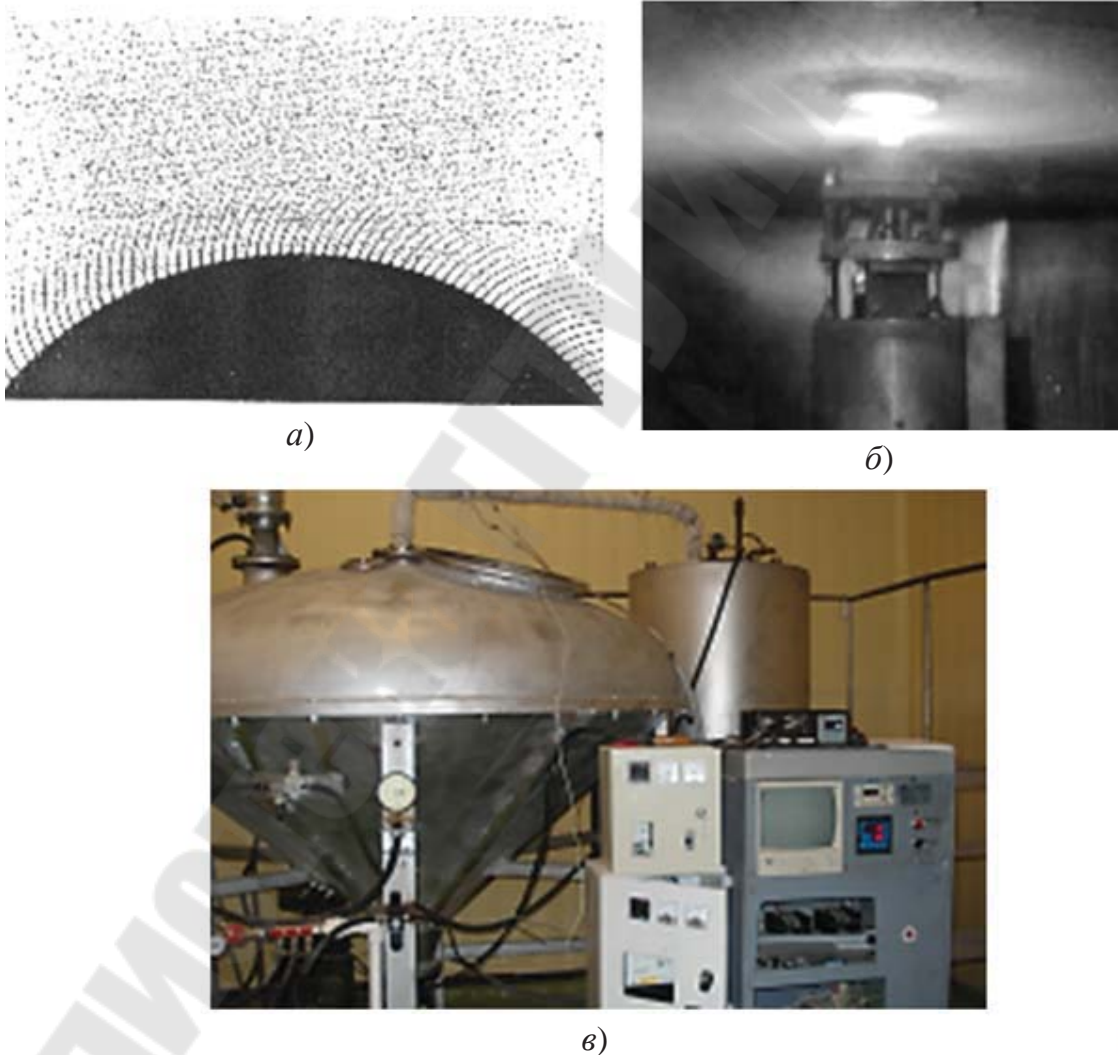


Рисунок 18 – Центробежное распыление расплава: *а* – схема; *б* – распыление стали; *в* – установка УР-7М

Технологии REP и PREP применяют для получения особо чистых мелкодисперсных порошков сферической формы. Отсутствие контакта расплава с разливочными устройствами даёт возможность получения чистых сферических порошков из активных металлов и их сплавов. Однако предварительно необходимо изготавливать прутки в форме электрода. При этом для обеспечения однородного химического состава прутков, необходимо осуществлять многостадийный переплав материала.

Распыление из твёрдого вращающегося электрода имеет существенное ограничение, т. к. сплавы, имеющие интервал кристаллизации в диапазоне более 20–30 °С, подвержены значительной ликвации при распылении. Одновременно происходит образование частиц с различным химическим составом.

Плазменная атомизация. В технологии плазменной атомизации в качестве исходного материала для распыления используется проволока (рис. 19), источник оплавления – плазма.

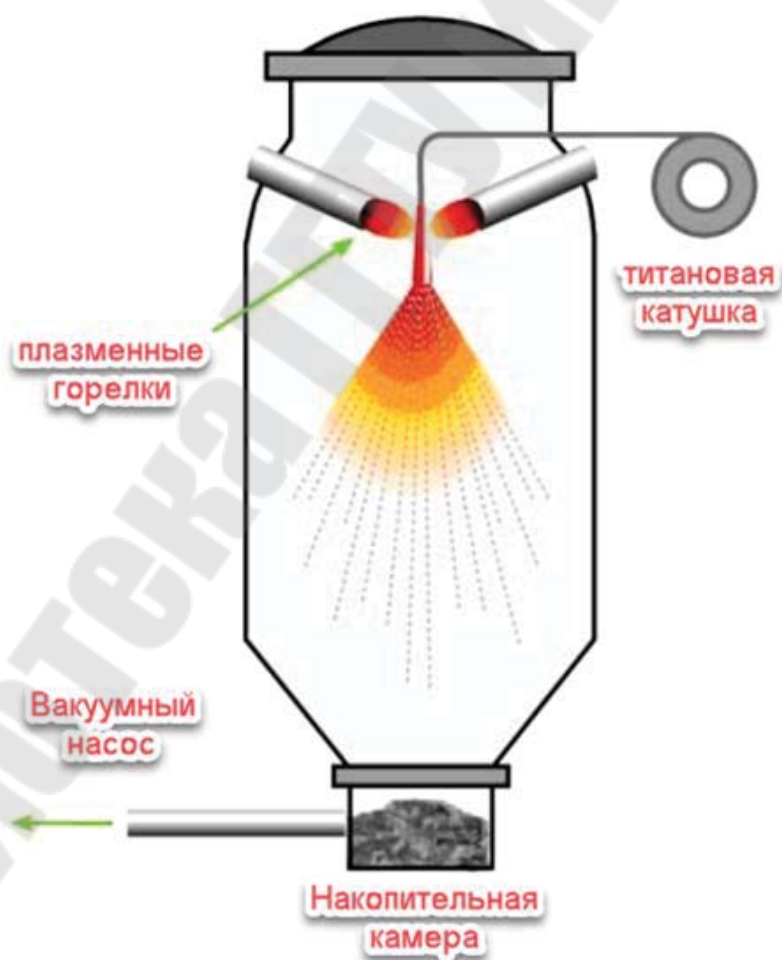


Рисунок 19 – Схема процесса плазменной атомизации с использованием проволоки

С учётом недостатков получения порошков из твёрдого вращающегося электрода разработана технология получения сферических гранул металлов и сплавов методом центробежного распыления расплава из гарнисажного тигля, вращающегося с регулируемой скоростью. В данной технологии реализован капельный метод образования гранул, исключая захват инертного газа и образование внутренних пустот в сферической грануле.

Существует технология грануляции (сфероидизация) порошковых материалов с использованием энергии плазмы (рис. 20).

Эта технология предназначена для изменения формы частиц порошков, полученных не методами диспергирования расплава, либо исправления формы некондиционных порошков. Порошок неправильной формы оплавляется в струе плазмы, в результате чего частицы порошка приобретают правильную сферическую форму. Подаваемые частицы порошка нагреваются, оплавляются, затем охлаждаются и кристаллизуются при контролируемых условиях.

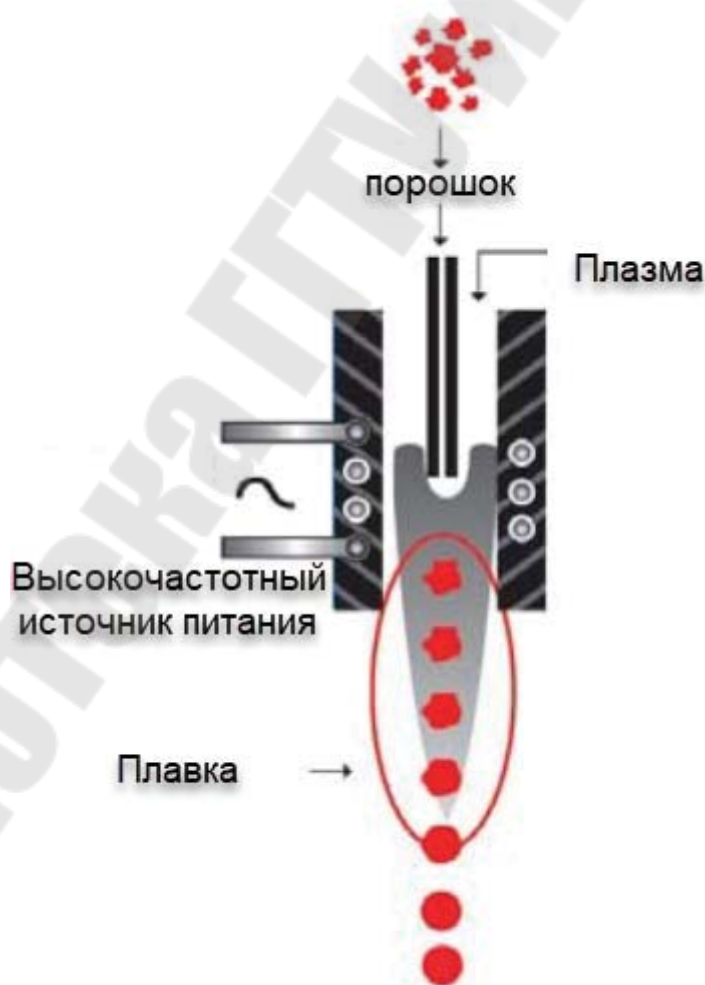


Рисунок 20 – Схема процесса сфероидизации частиц порошка с помощью плазмы

В результате такой обработки улучшается морфология частиц порошка (рис. 21), повышается текучесть, снижается пористость частиц и увеличивается чистота порошкового материала.

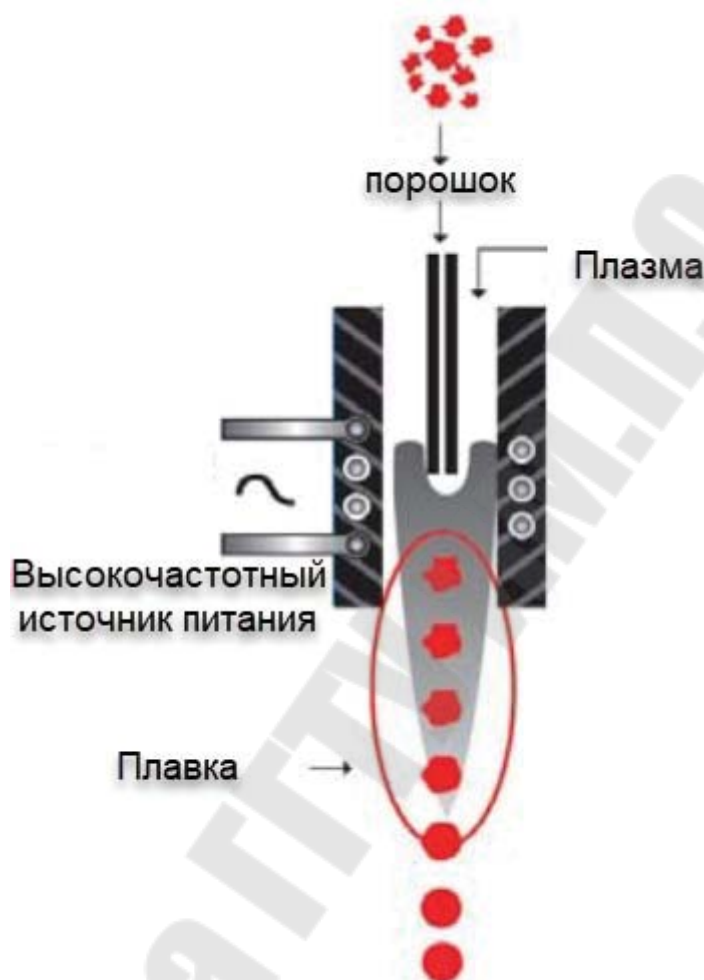


Рисунок 21 – Морфология частиц порошка карбида вольфрама до (а) и после (б) обработки плазмой

Технология Spray forming. Существует ряд новых технологий, находящихся на стыке разных традиционных технологий. Это, в частности, так называемая технология Spray forming, объединяющая в себя процессы литья (плавка металла) и распыления металла (порошковая металлургия). В конечном итоге получается заготовка, полученная послойным синтезом, что и «роднит» технологию Spray forming с AF-технологиями.

Spray forming – технология получения заготовок из конструкционных и специальных сплавов распылением (атомизацией) металла была предложена в 1970 г. профессором *Singer* (*Swansea University*, Великобритания).

Суть технологии заключается в послойном напылении металла на подложку и «выращивании» болванки (заготовки) для последующей механообработки.

Металл расплавляется в плавильной камере, затем специальным соплом распыляется потоком инертного газа, частички металла размером 10–100 мкм осаждаются на подложку, формируя массив болванки (рис. 22).

В отличие от литой заготовки, полученной заливкой металла в изложницу, заготовка, изготовленная методом *spray forming*, имеет однородную микро- и макроструктуру материала (рис. 23).



Рисунок 22 – Схема технологии *Spray forming*: 1 – тигель; 2 – сливное устройство; 3 – подвод газа; 4 – выращиваемая болванка; 5 – вращающаяся подложка; 6 – отвод газа; 7 – бункер для порошка; 8 – камера распыления; 9 – (опция) бункер для подшихтовки дополнительного материала

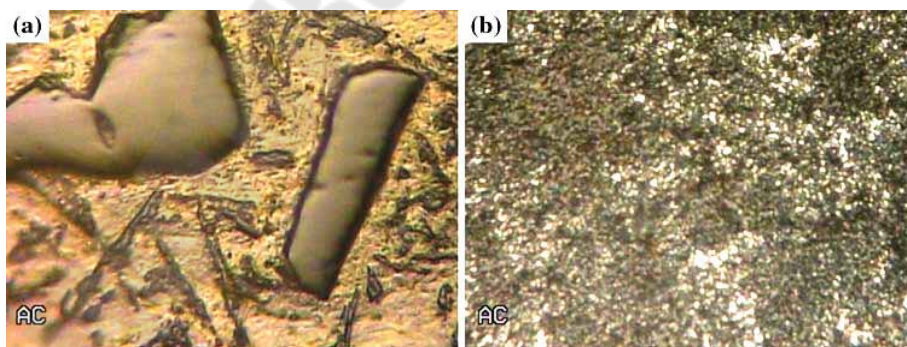
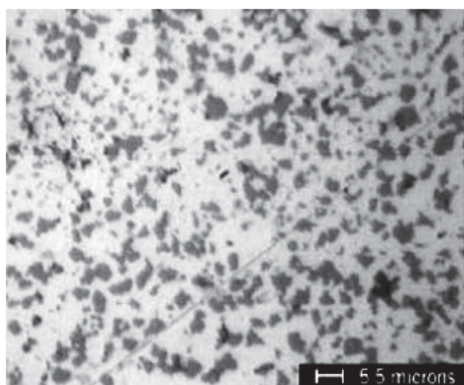
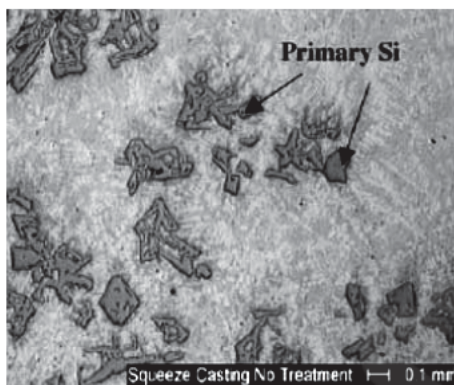


Рисунок 23 – Микроструктура сплава Al-15 % Si: а – отливка; б – *spray forming* (x400)

Равномерность распределения ингредиентов по массиву заготовки и однородность микроструктуры (рис. 24) являются главными преимуществами данной технологии.



а)



б)

Рисунок 24 – Распределение Si в образце сплава Al-25 % Si – 0,89 % Cu-1 % Ni – 0,84 % Mg: а – spray forming; б – отливка + ковка

К недостаткам следует отнести относительно высокие потери материала (до 20 %) при атомизации и осаждении металла на подложку и относительную сложность управления процессом.

Технология *spray forming* открывает широкие возможности для создания так называемых *градиентных материалов* (с переменными по сечению физико-химическими свойствами), которые могут быть получены путём послойного нанесения различных материалов через два (или более) распылительных сопла.

Преимуществом данной технологии является и возможность получения *биметаллических композиций*. Примеры деталей авиадвигателя, полученные с использованием технологии «*Spray forming*», показаны на рис. 25.



Рисунок 25 – Детали авиадвигателя, полученные по технологии «*Spray forming*»

Методы механохимического синтеза. Перспективными технологиями получения порошков для аддитивных технологий являются методы механохимического синтеза, поскольку они обеспечивают возможность получения разнообразных по химическому составу порошковых материалов с образованием наноструктуры с одновременным образованием неравновесных фаз.

Механосинтез разделяют на две основные категории: *механический размол* (mechanical milling) и *механическое легирование* (mechanical alloying).

Механический размол используется как для измельчения исходного материала, так и для перевода его в аморфное состояние. Механическое сплавление обеспечивает измельчение, перемешивание, массоперенос и химическое взаимодействие порошков нескольких чистых элементов, соединений или сплавов. С помощью механического сплавления получают вещества, как в кристаллическом, так и в аморфном состояниях. Образование метастабильных структур может происходить как в процессе механолегирования одного металла в другой, так и в процессе механоактивации металлического соединения.

Механическое легирование (рис. 26) – обработка порошковых частиц повторной деформацией за счёт высокоэнергичных столкновений среды в размольном процессе. С использованием механического легирования возможно получение однородных по составу и структуре частиц порошка с одновременным формированием мелкозернистой структуры, в том числе нанокристаллической структуры.

Однако существуют сложности получения порошков со сферической формой частиц путём механохимического синтеза, что на данный момент затрудняет их использование в аддитивных технологиях.

Процесс изготовления образцов селективным лазерным плавлением с использованием порошков, полученных путём механического легирования реализуется путём смешения порошков упрочняющих частиц с частицами порошка металла – матрицы и дальнейшей обработки смеси порошков в планетарной мельнице.

Полученные материалы применяются для изготовления компактных образцов с использованием метода селективного лазерного плавления. Использование таких порошковых композиций позволяет получать изделия с плотностью близкой к 100 % и с равномерным распределением упрочняющих частиц по объёму материала, что приводит к повышенным прочностным свойствам при сохранении пластичности.

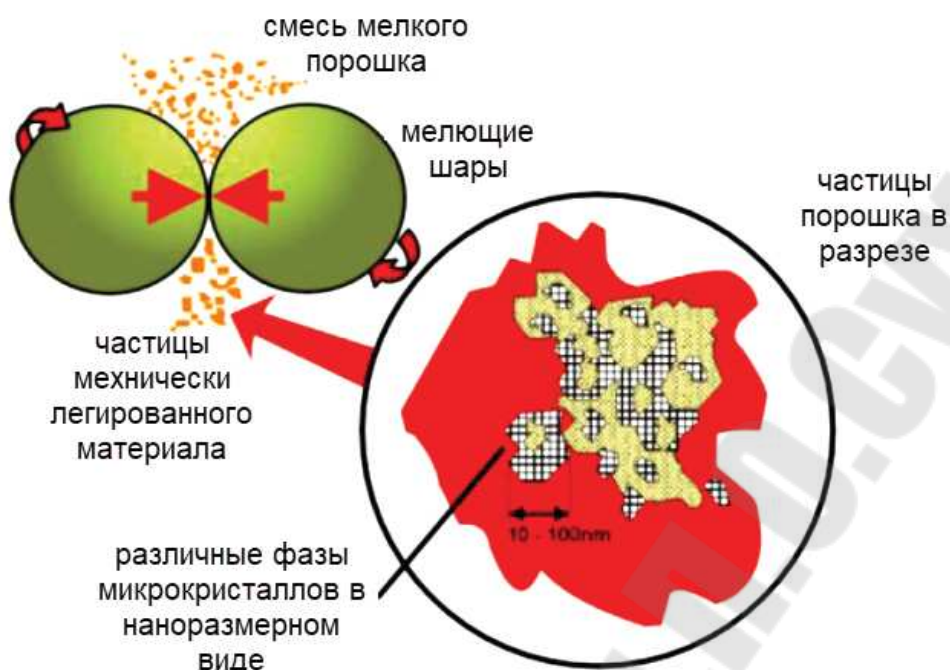


Рисунок 26 – Схема процесса механического легирования

Высокая теплопроводность, склонность к окислению, большие силы поверхностного натяжения расплавов и высокая отражательная способность делают металлические порошки значительно более труднообрабатываемыми материалами по сравнению с полимерами.

Процессы аддитивного производства изделий из металлических материалов классифицируют в зависимости от способа подачи материала (PBF и DED) (рис. 27–29), источника энергии и т. д. (табл. 10).

В АП-процессе каждый отдельный слой металла наносится поверх предыдущего, создавая сложный и изменяющийся с течением времени температурный профиль внутри детали. В результате сплав может многократно переходить из твёрдой фазы в жидкую фазу и обратно. Быстрое затвердевание (например, скорость остывания для процессов типа SLM имеет порядок 10^4 К/с) затрудняет сегрегацию химических элементов и повышает растворимость в твёрдой составляющей, а это в свою очередь приводит к образованию метастабильных фаз. Выраженная направленность теплового потока в АП-процессах задаёт предпочтительное направление роста зёрен и кристаллографическую текстуру.

Все эти процессы – быстрое затвердевания, направленное охлаждение и фазовые переходы, вызванные повторяющимися термическими циклами, формируют микроструктуру материала изделия и создают сложности, которые обычно отсутствуют в традиционных процессах.

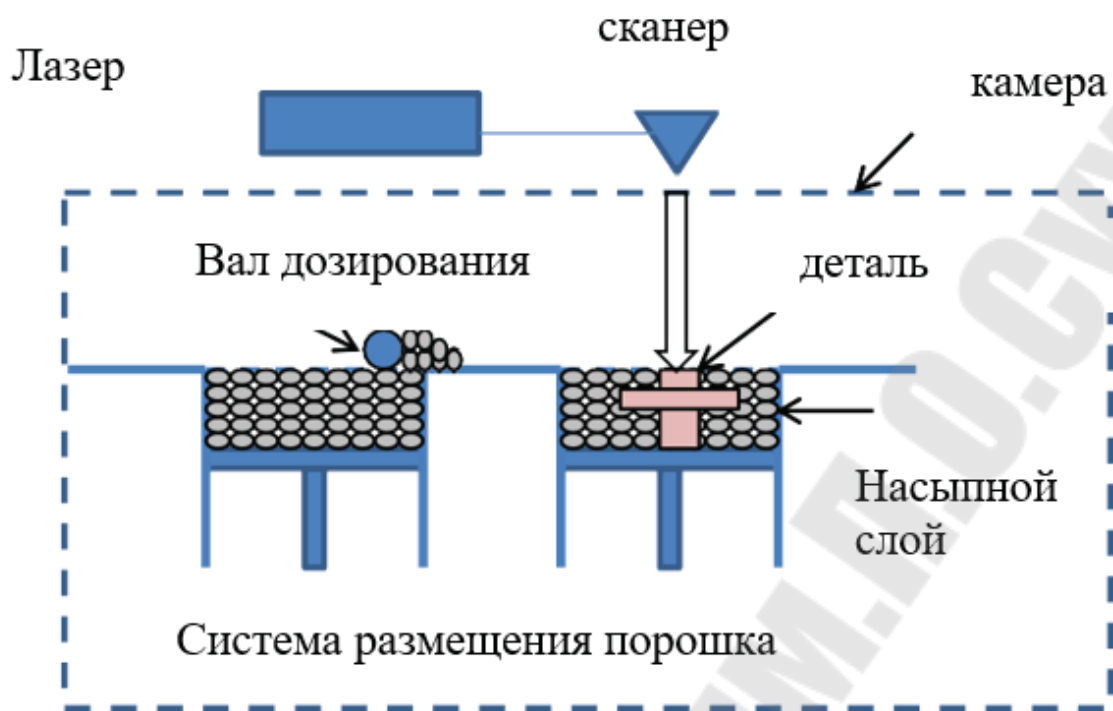


Рисунок 27 – Иллюстрация процессов PBF

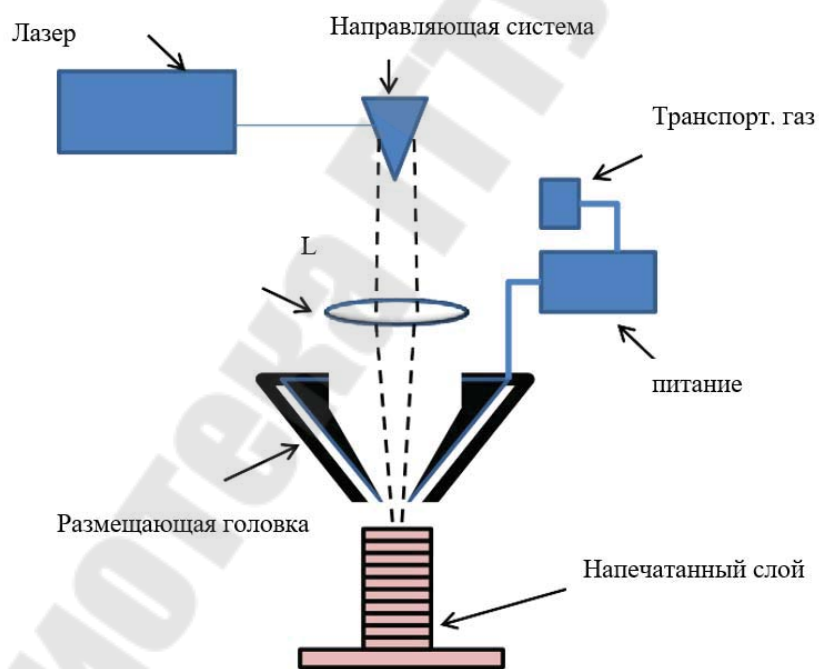


Рисунок 28 – Иллюстрация процессов DED (подача порошка)

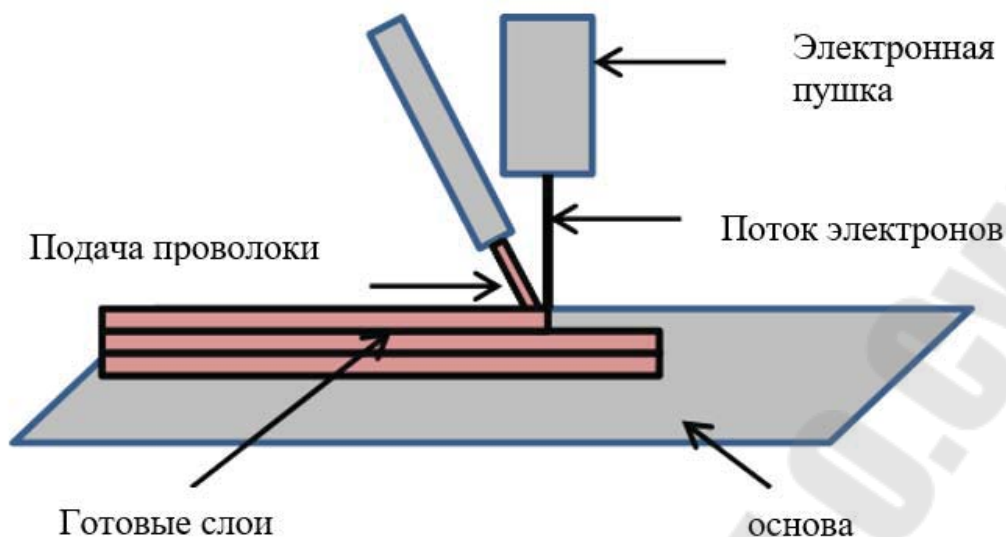


Рисунок 29 – Иллюстрация процессов DED (подача проволоки)

При надлежащей технологии АП-процесса металлические материалы демонстрируют статические механические свойства, сопоставимые со свойствами аналогичных материалов, полученных при использовании традиционных технологий. АП-материалы в результате быстрого охлаждения имеют преимущества благодаря менее выраженной химической сегрегации и мелкозернистости. Однако характерная для АП-материалов анизотропия микроструктуры влечёт за собой соответствующую анизотропию механических свойств (в направлении, перпендикулярном слоям, механические свойства оказываются более низкими).

В изделиях, полученных по технологии селективного лазерного спекания, помимо специфической структуры могут присутствовать микротрещины и поры, которые разделяют на два основных вида: газовые поры, вызванные неполнотой выхода газов из расплава при лазерной обработке, и поры, образующиеся из-за недостаточного проплавления порошкового слоя.

Механические свойства компактных образцов из сплавов Inconel 718 и Ti-6Al-4V отличаются в зависимости от направления выращивания. У вертикально расположенных на платформе образцов прочностные свойства при испытании на растяжение ниже, а ударная вязкость выше, чем у размещённых горизонтально.

После термической обработки образцы, изготовленные в горизонтальном положении, имели более высокие показатели при испытании на ударный изгиб ввиду устранения влияния остаточных напряжений. Отличие прочностных свойств образцов было связано с присутствием направленных дефектов и особенностями формирующейся микроструктуры материала в процессе селективного лазерного плавления.

Факторами, влияющими на присутствующую анизотропию механических свойств изделий, изготовленных селективным лазерным плавлением порошковых материалов, являются:

- остаточные напряжения, устраняемые термической обработкой;
- плоские поры, расположенные перпендикулярно направлению выращивания;
- вытянутая вдоль направления изготовления микроструктура зёрен.

Динамические свойства АП-сплавов (например, усталость), изученные значительно меньше статических, обычно определяются наличием таких дефектов как микропоры, которые часто связывают с захватом газов и качеством поверхности.

Влияние качества поверхности на динамические свойства остаётся предметом споров. В некоторых исследованиях утверждается, что оно критически важно для повышения сопротивления усталости, в других работах делается вывод о его незначительной роли в рамках динамического диапазона жизненного цикла изделия. Для решения этого вопроса необходимы систематические исследования, охватывающие более широкий круг АП-материалов.

Таблица 10

Источники энергии и характеристики типичного оборудования для аддитивного производства

Установка	Про- цесс	Рабочее про- странство (мм)	Источник энергии
PBF			
ARCAM (A2) (a)	EBM	200 x 200 x 350	Электронный пучок, 7 кВт
EOS(M280) (b)	DM LS	250 x 250 x 325	Иттербиевый волоконный лазер, 200x400 Вт
Концепт Laser Cusing(M3) (b)	SLM	300 x 350 x 300	Волоконный лазер, 200 Вт
MTT (SLM 250) (b)	SLM	250 x 250 x 300	Иттербиевый лазер, 100–400 Вт
Группа систем Phenix (PXL) (c)	SLM	250 x 250 x 300	Волоконный лазер, 500 Вт

Продолжение таблицы 10

1	2	3	4
Renishaw (AM 250) (d)	SL M	245 x 245 x 36	Лазер, 200 или 400 Вт
Realizer (SLM 250) (b)	SL M	250 x 250 x 220	Лазер, 100, 200 или 400 Вт
Matsuura (Lumex Advanced 25) (e)	SL M	250 x 250 в диаметре	Иттербиевый волоконный лазер, 400 Вт
DED (подача порошка)			
Optomec (LENS 850-R) (f)	LE NS	900 x 1500 x 900	Волоконный лазер IPG, 1 или 2 кВт
POM DMD (66R) (f)	DM D	3200 x 3670 x 360	Волоконный лазер с диод- ной накачкой или дисковый лазер, 1–5 кВт
Система лазерного от- верждения Accufusion (g)	LC	1000 x 1000 x 1000	Nd: YAG-лазер
Лазер Ipera (LF 6000) (c)	LD		Лазерное плакирование
BeAM (MAGIC LF6000) (c)	CL AD	1500 x 800 x 800	Волоконный лазер 1000– 6000 Вт
Trumpf (b)	LD	600 x 1000 в длину	
Huffman (HC-205) (f)	LD		Плакирование CO ₂ -лазером
DED (подача проволоки)			
Sciaky (NGI) EBFFF (f)	EB DM	760x 480 x 500	Сварочный источник тока с мощностью от 40 кВт при напряжении 60 кВ
Система MER произ- вольной формовки (FFF) посредством се- лективной сварки плаз- менной дугой (f)	PT AS FFF	610 x 610 x 5180	Два источника постоянного тока 350 А для создания плазменной дуги
Страна-производитель: (a) Швеция, (b) Германия, (c) Франция, (d) Ве- ликобритания, (e) Япония, (f) США, (g) Канада			

Сравнение процессов аддитивного производства, использующих в качестве исходных материалов порошок и проволоку, представлено в табл. 11.

Толщина слоя при использовании порошка составляет 20–100 мкм, размерная точность готовых изделий равна $\pm 0,05$ мм, шероховатость поверхности составляет 9–16 мкм. Производительность, как правило, примерно 10 г/мин., что ограничивает применение технологий, использующих порошки в качестве исходных материалов, в изготовлении деталей средних и крупных размеров.

В случае использования в качестве исходного материала – проволоки коэффициент использования материала (КИМ) – до 100 %, поэтому данная технология – более экологична. Производительность до 2500 см³/ч (330 г./мин для нержавеющей стали).

В зависимости от источника энергии, используемого для нанесения металла, технологии аддитивного производства, использующие в качестве исходного материала проволоку, подразделяют на три группы:

WLAM – источник энергии – лазер;

WAAM – источник энергии – дуга

EBF3 – источник энергии – электронный луч.

Таблица 11

Сравнение некоторых типовых процессов АП

Материал	Процесс	Толщина слоя, мкм	Производительность, г/мин	Размерная точность (мм)	Шероховатость поверхности (мкм)
Порошок	LC	N/A	1–30	$\pm 0,025$ - $\pm 0,069$	1–2
	SLM	20–100	N/A	$\pm 0,04$	9–10
	SLS	75	~0,1	$\pm 0,05$	14–16
	DLF	200	10	$\pm 0,13$	~20
Проволока	WAAM	~1500	12	$\pm 0,2$	200
	EBF3	N/A	До 330	низкая	высокая

2.2. Керамические материалы

Доступность технологий получения близкой к заданной форме изделий способствовала промышленному использованию в аддитивных технологиях высококачественных керамических материалов. Механообработка керамики – процесс затратный по времени и дорогостоящий,

требующий, как правило, использования алмазных инструментов (во многих случаях на станочную обработку приходится до 80 % всех производственных затрат).

Количество технологий, использующих керамические материалы в качестве исходных, является относительно ограниченным. В то же время потребность в получении керамических изделий в промышленности и, в частности, в авиации постоянно увеличивается.

Изготовление керамических изделий очень похоже на процесс производства металлических деталей. Полуфабрикаты, созданные с помощью этого процесса, подвергаются термическому разложению перед спеканием, чтобы удалить полимерное связующее. После выжигания связующего температуру в печи повышают до температуры спекания керамического материала. Иногда для керамического материала используется пропитка, реагирующая с образованием связующего, если используется пропитка металлом, то образуется металлокерамический композит.

Впервые об изготовлении деталей с помощью распыления связующего на керамические материалы было сообщено в 1993 г. Обожжённые компоненты, согласно этому заявлению, имели плотность, как правило, больше 99,2 %. В этом процессе использовались оксид алюминия, диоксид кремния, диоксид титана.

Данные о керамических материалах и аддитивных технологиях, с помощью которых возможно получение изделий, приведены в табл. 12.

Таблица 12

Изделия, получаемые из керамических материалов, с помощью аддитивных технологий

Материалы	Технологии				
	3DP	SLS	SLA	Material Extrusion	LOM
Структурные керамики	ZrO ₂	ZrO ₂	Al ₂ O ₃	ZrB ₂	Al ₂ O ₃ , ZrO ₂
	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃ -ZrO ₂	Al ₂ O ₃	SiC/C
	Ti ₃ SiC ₂	Al ₂ O ₃ -SiO ₂	Al ₂ O ₃ -SiO ₂	Муллит	Si ₃ N ₄
	Si ₃ N ₄	TiC-Al ₂ O ₃	SiO ₂	SiC	SiO ₂
	TiC-TiO ₂	SiC	SiO ₂	Si ₃ N ₄	TiC/Ni керамики, полученные из полимеров, SiO ₂ -Al ₂ O ₃ -RO-стекло
	SiC	SiSiC	TiO ₂	ZrO ₂	
			SiC	WC-ZrO ₂	
		Al ₂ O ₃ /SiO ₂ /муллит/ZrSiO ₄	ZrC		
			Al ₂ O ₃ -ZrO ₂		

Продолжение таблицы 12

1	2	3	4	5	6
Функциональные керамики	BaTiO ₃	PZT	PZT	BaTiO ₃	LZSA-стекло
	PZT TiO ₂	BaTiO ₃	SiCN Fe ₂ O ₃ /Fe(C ₂ O ₄)*2H ₂ O	PZT PMN LiFePO ₄ Li ₃ Ti ₄ O ₁₂ BaZrO ₃ ZnO TiO ₂	PZT
Биокерамики	Гидрокси-апатит(НА) TCP, TTCP ZrO ₂	Апатит-муллит НА-HDPE НА-РА BCP	НА НА-Al ₂ O ₃ TCP	Al ₂ O ₃ НА TCP фосфор биостекла	НА, TCP

При изготовлении компонентов газотурбинного двигателя из керамики с использованием аддитивных технологий, наиболее перспективным материалом для использования при повышенных температурах в качестве замены металлических компонентов в газотурбинных двигателях является композиционный материал на основе карбида кремния, упрочнённый волокнами SiC (SiC/SiC).

Материалы на основе SiC широко применяются в различных отраслях промышленности. Это связано с их высокой износостойкостью, высоким сопротивлением окислению, термостойкостью, химической стойкостью, высокой технологичностью процесса изготовления.

Образование SiC вследствие реакции между кремнием и углеродом может проходить при температурах меньших, чем температура плавления чистого кремния. Карбид кремния является единственным соединением, которое образуется в системе Si-C (рис. 30).

Имеется множество политипных модификаций (около 200) карбида кремния, но только несколько из них распространены. Они являются вариациями одного химического соединения, которые идентичны в двух измерениях, но отличаются в третьем.

α -SiC имеет кристаллическую структуру по типу вюрцита (рис. 31а) и образуется при температуре свыше 1700 °С. β -SiC имеет кристаллическую структуру типа цинковой обманки (рис. 31, б). Превращение $\beta \rightarrow \alpha$ является необратимым при нормальном давлении.

Теоретическая плотность β -SiC составляет $3,210 \text{ г/см}^3$, α -SiC – $3,208 \text{ г/см}^3$. Учитывая низкий удельный вес, низкий коэффициент термического расширения, высокую теплопроводность, прочность и твёрдость, SiC считается перспективным материалом для замены традиционных металлических сплавов.

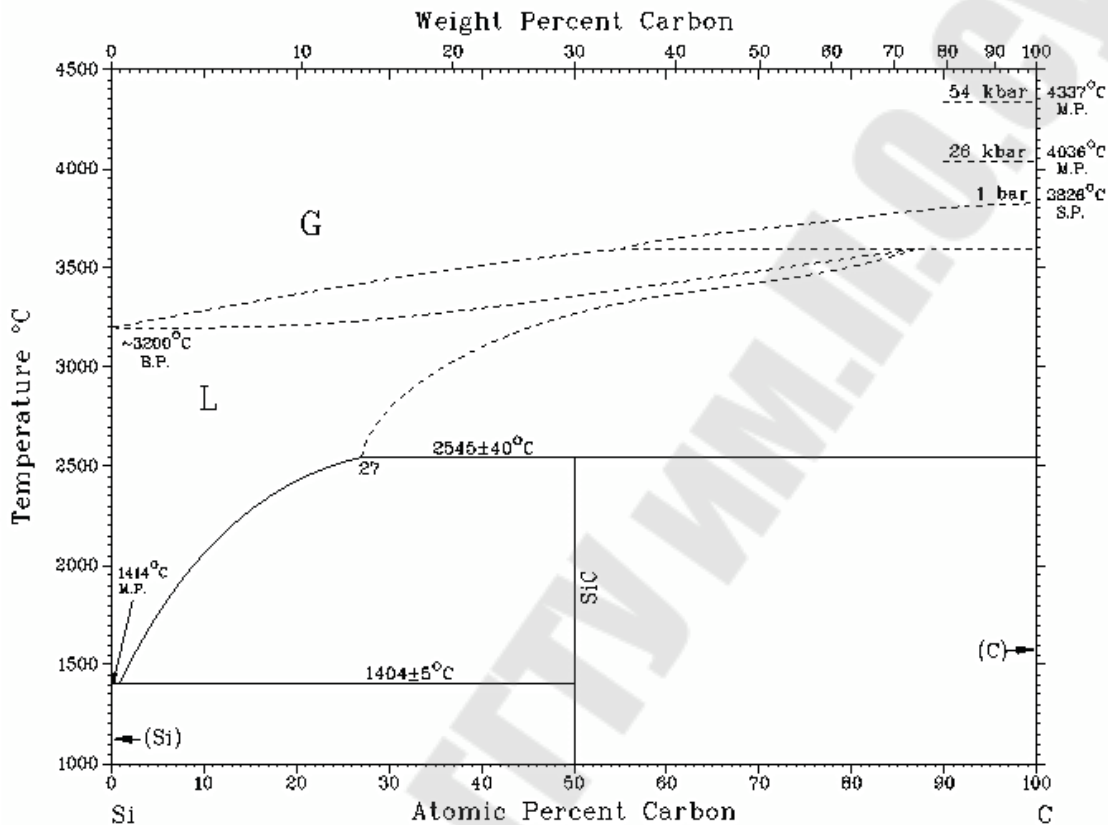


Рисунок 30 – Диаграмма состояния системы Si-C

Наиболее распространёнными формами SiC являются порошок, волокна и монокристаллы. Порошки карбида кремния получают по методу Ачессона. Вследствие высоких температур при использовании метода Ачессона получаемый карбид кремния имеет α -модификацию. Волокна карбида кремния изготавливают путём пиролиза органических кремнийсодержащих полимеров, например, поликарбосилана.

Материалы на основе SiC начали применяться значительно раньше, чем материалы на основе Si_3N_4 , AlN, B_4C и BN. Уже в 20 гг. XX в. использовались карбидокремниевые огнеупоры на связке из диоксида кремния (90 % SiC+10 % SiO_2), а в 50 гг. из карбида кремния на нитридокремниевой связке (75 % SiC+25 % Si_3N_4) изготавливали сопла ракет. В настоящее время керамика на основе карбида кремния применяется для изготовления уплотнительных колец для насосов, компрессоров, смесителей, подшипников и гильз для валов, дозирующей и регулирующей арматуры для коррозионных и

абразивных сред, деталей двигателей, металлопроводов для жидких металлов. Разработаны новые композиционные материалы с карбидокремниевой матрицей.

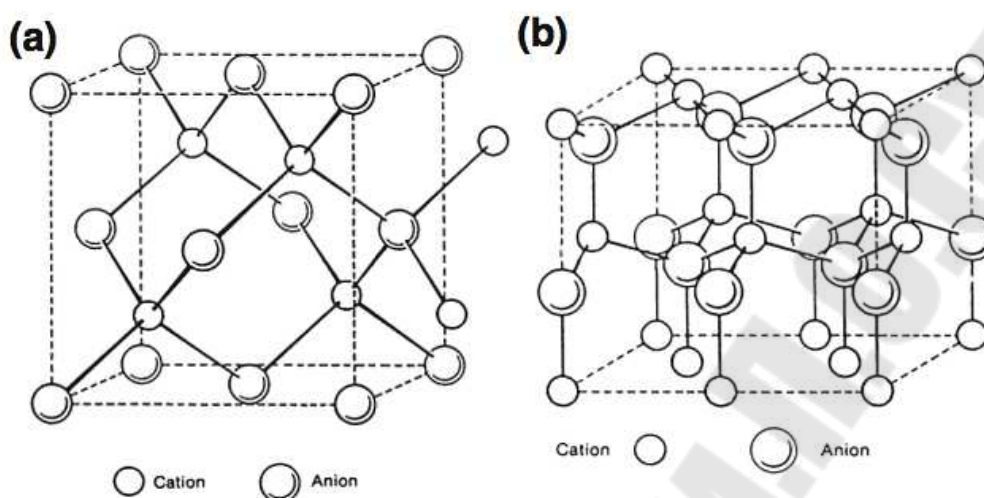


Рисунок 31 – Кристаллические структуры карбида кремния:
 a – α -SiC; b – β -SiC

Керамические и композиционные материалы на основе карбида кремния (SiC) имеют уникальное сочетание физико-химических свойств:

- высокую конструкционную прочность в высокотемпературном диапазоне (1000–1500 °C),
- высокую износостойкость;
- высокую стойкость к окислению;
- устойчивость к радиационным воздействиям;
- высокую жаростойкость и теплопроводность;
- низкое значение коэффициента линейного термического расширения, который позволяет керамике выдерживать термоциклические нагрузки,
- доступность сырьевых материалов для производства керамики.

Для карбида кремния характерны высокие механические характеристики (твёрдость, модуль упругости), определяющие повышенную работоспособность материалов на его основе. Сочетание большой теплопроводности и низкого коэффициента термического расширения, обуславливают стойкость карбида кремния при больших скоростях нагрева и в условиях стационарного теплового режима.

Карбид кремния (карборунд) SiC является единственным соединением кремния и углерода. В природе этот материал встречается крайне редко. Существует в двух модификациях: политипная гексагональная α -модификация (около 20 структур) и кубическая β .

Переход β -SiC \rightarrow α -SiC происходит примерно при 2100 °С. Свыше 2600–2700 °С α -SiC возгоняется. Чистый SiC стехиометрического состава бесцветен. При превышении содержания кремния SiC становится зелёным, углерода – чёрным.

Свойства SiC: H_c до 45 ГПа, $\sigma_{изг}$ до 700 МПа, $T_{хр}$ \approx 2000 °С. При комнатной температуре разрушение SiC транскристаллитное и носит характер скола. При 1050 °С характер разрушения становится межкристаллитным.

SiC устойчив против воздействия всех кислот, за исключением HF и HF+HNO₃. К действию щелочей SiC менее устойчив. Установлено, что SiC смачивается металлами группы железа и марганцем.

В качестве характеристики механических свойств карбида кремния часто используется такая величина, как прочность на изгиб. Существуют два стандартных способа измерения прочности на изгиб: четырёхточечный и трёхточечный (табл. 13).

Таблица 13

Прочность на изгиб SiC, полученного компанией Poco Graphite, Inc

Температура, °С	Прочность на изгиб (трехточечное испытание), МПа	Прочность на изгиб (четырёхточечное испытание), МПа
комнатная	159±13,8	147±9,6
1000	–	146±8,8
1300	–	148±8,8
1500	–	149±14,7

Плотные материалы на основе SiC получают *горячим прессованием* и *методами реакционного и жидкофазного спекания*. Несмотря на широкое распространение того или иного метода изготовления изделий конструкционного назначения каждый из них имеет как свои достоинства, так и недостатки.

Методом горячего прессования (ГП) получают высокопрочную керамику на основе SiC (SSIC/Q₁) в результате предварительного размола смеси кремния с графитом, и последующего спекания прессовок в аргоне в течение 15 мин. Прессование проводят обычно в пресс-формах из графита или нитрида бора при давлениях 10–50 МПа и температурах 1700–2000 °С. При этом получают карбидокремниевые материалы с размером пор 0,2 мкм. Подвидом горячепрессованного SiC является карбид кремния сплошной, спечённый без давления (SSIC), который наиболее применим для концентрированных щелочно-кислотных сред.

Горячепрессованный карбид кремния (HPSiC) получают спеканием тонких порошков α -SiC с небольшим количеством (до 5–10 мас %) оксидных добавок. Материал обладает повышенным уровнем механических свойств (табл. 14).

Таблица 14

Параметры реакционно-спеченной и горячепрессованной карбидокремниевой керамики

Параметры	Реакционно-спеченный	Горячепрессованный – спеченный
Тип	SiC (Q ₂)	SSiC (Q ₁)
Содержание SiC. %	≥90	≥98
Плотность г/см ³	3,05	3,1
Прочность при изгибе, МПа	4,41 x 10 ²	4,9 x 10 ²
Прочность на растяжение, МПа	2,75 x 10 ²	2,8 x 10 ²
Прочность на сжатие, МПа	2,94 x 10 ³	3,0 x 10 ³
Модуль упругости, МПа	4,12 x 10 ⁵	4,10 x 10 ⁵
Твёрдость по Шору, HS	110–125	120–130
Теплопроводность, W/m.k	141	147
Коэффициент температурного линейного расширения при 20–100°C, 10 ⁻⁶ /°C	4,3 x 10 ⁻⁶	4,0 x 10 ⁻⁶
Предельная рабочая температура, °C	1600	1650

К недостаткам метода горячего прессования относится высокая энергоёмкость и невозможность получения изделий сложной геометрической формы без дополнительной механической обработки, что ограничивает промышленное производство изделий.

ГП позволяет получать только изделия довольно простой формы и относительно небольших размеров. Изделия сложной формы с высокой плотностью получают методом горячего изостатического прессования (ГИП).

Метод жидкофазного спекания. Жидкофазно-спеченные материалы (LPSSiC) получают спеканием SiC ($d_{0,5} \leq 1$ мкм) с оксидами (10–20 мас %) при 1850–1950 °C.

LPSSiC-материалы более коррозионностойкие и температуроустойчивые ($T_{\text{раб}} \approx 1450$ °C в воздушной атмосфере). Однако, высокая температура спекания, в отличие от SiSiC и большая усадка (до 20 %) ограничивают ряд изделий, производимых этим методом (табл. 15).

Метод реакционного спекания позволяет проводить процесс при более низких температурах и получать изделия сложной формы. Реакционно-спеченный карбид кремния (SiC/Q₂) получают процессом уплотнения и упрочнения, т. е. при воздействии высоких температур пористая заготовка из смеси карбидокремниевых и углеродных

материалов, пропитывается жидким реагентом – расплавом кремния, с образованием вторичного карбида кремния, который связывает исходные компоненты в плотный материал. В итоге образуются беспористые материалы ($\Pi < 0,5 \%$), содержащие 5–15 % свободного кремния в карбидокремниевой матрице.

Таблица 15
Физико-механические и высокотемпературные свойства керамики

Материал	$\rho \pm 0,02$ г./см ³	$\sigma_{\text{изг}}^{20} \pm 10$, МПа	$\sigma_{\text{изг}}^{1200} \pm 10$, МПа	$\sigma_{\text{сж}}^{20} \pm 20$, МПа	$K_{1c} \pm 0,2$, МПа·м ^{1/2}	HV $\pm 0,2$, ГПа	Рабочая температура, °С	
							Защитн. атмосф.	Воздушн. атмосф.
SiSiC	3,05	400	150	1200	3,5	22	1300	1200
LPSSiC	3,20	500	400	2000	5,5	21	1600	1450
HPSiC	3,15	750	500	2200	6,5	26	1700	1500

Реакционное спекание является экономичным процессом благодаря применению недорогого термического оборудования, температура спекания снижается с обычно применяемой 1600–2000 до 1100–1300 °С. Положительной особенностью SiSiC-материалов является использование крупных исходных порошков SiC и безусловное спекание. К недостаткам можно отнести значительное содержание SiO₂ (5–15 % об.), что ограничивает высокотемпературную область его использования SiSiC.

Реакционно-спеченный карбид кремния (РКК) представляет собой двухфазный конструкционный керамический материал (рис. 32). Международное обозначение этого подкласса карбидокремниевых материалов – SiSiC.

Микроструктура РКК имеет две характерные особенности – присутствие связанного карбидокремниевых каркаса, обеспечивающего высокие физико-механические показатели материала и свободного, несвязанного кремния.

Реакционно-спеченный (самосвязанный) карбид кремния (SiSiC) наиболее распространённый вид керамических материалов, широко используемый для производства конструкционных износостойких и динамически устойчивых материалов в промышленном масштабе.

На материалы изделий из РКК установлены требования технических условий ТУ 1915–010–2304285–2003 и ТУ 1915–015–2304285–2009 (табл. 16).

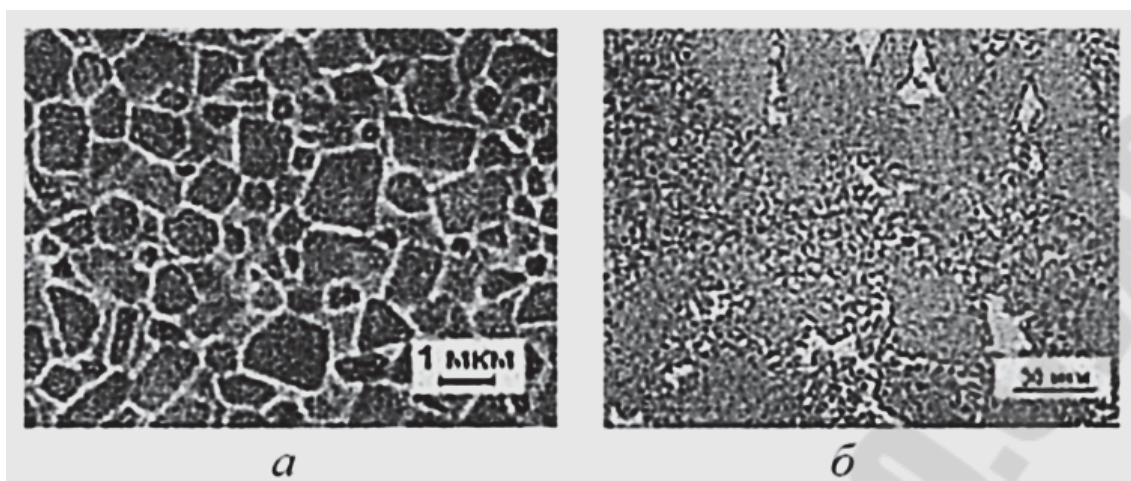


Рисунок 32 – Микроструктуры материалов:
a – LPSSiC (15 % YAG); *б* – SiSiC

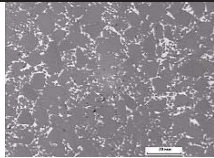
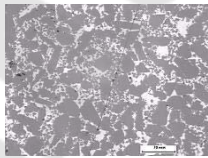
Метод получения керамических материалов на основе SiC путём реакционного спекания использует механизм взаимодействия расплава кремния с углеродом (процесс силицирования) в заранее спрессованной заготовке, для которой заданы состав (углерод, первичный карбид кремния и органическое связующее), геометрия и пористость. Процесс реакционного спекания обеспечивает формирование контактов между зёрнами первичного SiC, заполнение пор и образование непрерывного поликристаллического каркаса из SiC. Химическая реакция расплава кремния и углерода, при которой образуется вторичный SiC, обеспечивает образование связей между зёрнами первичного SiC.

Метод реакционного спекания карбида кремния позволяет в широких пределах изменять фазовый состав (соотношение фаз SiC-C-Si) и структуру керамики в зависимости от требований, предъявляемых условиями эксплуатации конкретного изделия.

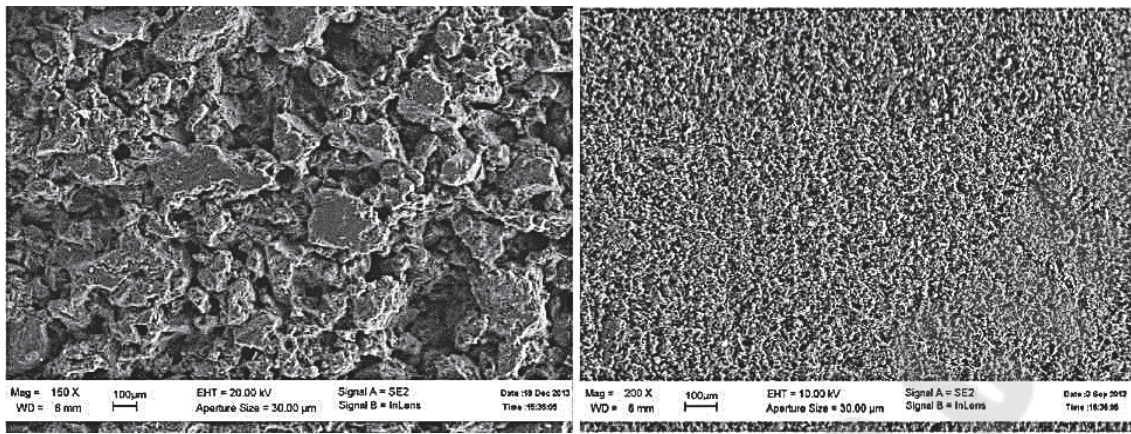
Применяя методы модифицирования структуры и консолидации керамики, регулируя гранулометрический состав и технологические условия формования и спекания материалов на основе карбида кремния можно получать изделия с новым повышенным комплексом механических и эксплуатационных свойств.

Для увеличения механической прочности заготовок можно исключить из состава исходной композиции порошок первичного карбида кремния и для прессования использовать только углеродные порошки различных фракций и органическое связующее. Варьируя соотношение порошков графита различных фракций, количество связующего и давление прессования, после карбонизации связующего (в защитной атмосфере при 900 °С) получают графитовые заготовки плотностью от 0,9 до 1,46 г./см. На рис. 30 показана микроструктура углеродных заготовок различной плотности.

Механические и физические свойства РКК

Характеристика	Материал	
	РКК ТУ 1915–010–2304285–2003	РКК для крупногабаритных изделий ТУ 1915–015–2304285–2009
Плотность, г/см ³ ;	3,05–3,11	3,00–3,04
Доля кремния, %	12–18	18–24
Микроструктура	 Плотность 3,08 г./см ³ , $V_{VSi} = 0,15$ репер-70 мкм	 Плотность 3,02 г./см ³ , $V_{VSi} = 0,24$ репер-70 мкм
Предел прочности при изгибе, МПа	330–450	240–320
Модуль Юнга, ГПа	380–410	360–400
Микротвёрдость зёрен SiC, ГПа	25–30	25–30
Трещиностойкость, МПа м ^{0,5}	3,50–4,50	3,00–4,00
Коэффициент теплопроводности, Вт м ⁻¹ К ⁻¹	140–180	100–120
Коэффициент термического расширения, 10 ⁻⁶ К ⁻¹	3–4	3–4

После силицирования углеродных матриц получены материалы на основе SiC керамики плотностью от 2,32 г./см³ для наиболее плотной (1,46 г./см³) графитовой заготовки до 3,1 г./см³ для углеродной заготовки плотностью 0,9 г./см³. Изменение микроструктуры и фазового состава материалов в зависимости от плотности углеродной заготовки показано на рис. 33, 34.



а б

Рисунок 33 – Микроструктура заготовки плотностью:
a – 1,24 г./см³; *б* – 0,93 г./см³

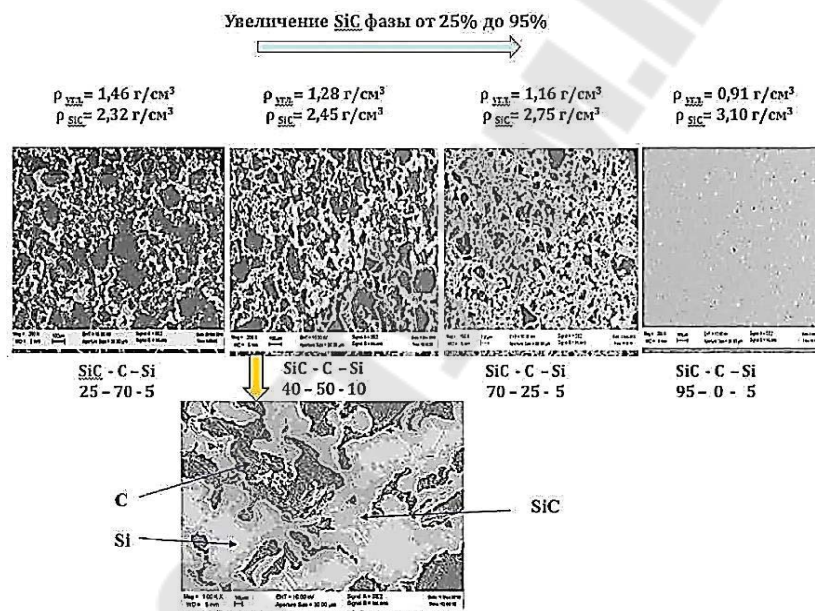


Рисунок 34 – Изменение фазового состава материалов в зависимости от плотности углеродных заготовок (от более плотных к менее плотным – слева направо)

После силицирования изменения размеров деталей составляло десятые доли процента, т. е. геометрическая форма деталей практически не изменялась. Таким образом, отсутствие усадок после взаимодействия с кремнием, позволило создавать детали сложной геометрической формы, обрабатывая мягкую углеродную заготовку и после силицирования получить деталь из керамики на основе SiC с минимальным припуском на последующую финишную механическую обработку.

В качестве углеродсодержащего компонента используют в основном нефтяной кокс, графит или древесный уголь. Сажа как углеродсодержащее сырье, несмотря на высокую химическую

активность, практически не используется вследствие агрегирования её частиц, что приводит к большому содержанию остаточного углерода в изделии в виде крупных включений, покрытых экранирующим слоем карбида кремния. Получение мелкозернистой структуры, равномерно распределённой по всему объёму изделия, способствует повышению прочности, износостойкости и увеличению срока службы антифрикционных карбидокремниевых изделий.

Предложен метод «реакционной сварки» для изготовления изделий сложной конфигурации из прессованных заготовок простой формы, соединённых друг с другом специально разработанной клеящей пастой, с последующим силицирующим обжигом смонтированных из заготовок изделий. Технологические возможности этого метода позволяют значительно расширить номенклатуру изделий сложных конфигураций из реакционно-спеченного SiC-материала.

Предложен способ получения изделий из реакционно-спеченных SiC-материалов с многослойной структурой, заключающийся в силицирующем обжиге заготовок, прессованных из шихты разного состава, загружаемой в пресс-форму равномерно распределёнными слоями. Таким образом, в разных частях одного и того же изделия формируются различные структуры и фазовые составы материала, что расширяет диапазон функционального использования такого рода SiC-изделий в технике.

Проблема повышения технологичности реакционного спекания и снижения себестоимости изделий из самосвязанного карбида кремния, позволяющая изготавливать изделия сложной формы и больших габаритов, была решена посредством развития известного в порошковой металлургии метода шликерного литья под давлением в процессе формования заготовки изделия из термопластичной массы, содержащей шихту карбида кремния. Разработанные составы временного связующего на основе парафина, пчелиного воска и олеиновой кислоты и углеродосодержащих добавок позволили существенно снизить вязкость горячего шликера и, следовательно, реализовать весьма технологичный процесс шликерного литья заготовок сложной формы и больших габаритов. Следует отметить, что технология шликерного литья практически полностью устраняет эффект влияния трения формовочной массы о стенки литейной формы, так как формование происходит горячим шликером, находящемся в жидком состоянии под гидростатическим давлением 0,6–0,8 МПа. Это обуславливает получение отливки с равномерной плотностью по объёму.

Для повышения термоокислительной стойкости деталей на их поверхность наносят газоплотные покрытия из SiC. Методика основана на взаимодействии расплава и паров кремния с углеродом, получаемым

при термическом расщеплении молекул углеводорода вводимого непосредственно в тепловую зону вакуумной печи. Толщина карбидокремниевого покрытия меняется в широких пределах в зависимости от условий в зоне взаимодействия, парциального давления газа и времени проведения процесса

Газоплотные защитные SiC покрытия существенно повышают термоокислительную стойкость керамических материалов SiC-C-Si. На рис. 28 показана микроструктура образцов материала на основе карбида кремния после отжига при 1000 °С на воздухе в течение 60 час.

Видно, что структура материала при отсутствии защитного покрытия сильно нарушена за счёт выгорания углерода из керамики. Эффективность работы защитного покрытия также подтверждается результатами взвешивания образцов до и после отжига. Потеря веса детали без покрытия достигает 50 %; вес детали с защитным покрытием при тех же условиях испытания не изменился.

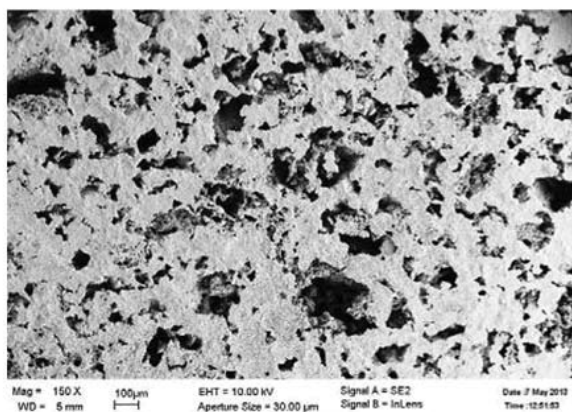
Защитные антикоррозионные покрытия из карбида кремния позволяют углерод- и кремнийсодержащим материалам работать в условиях окислительных сред при температурах, превышающих 1500 °С.

Сочетание возможности получения керамических деталей сложной геометрической формы из мягкой углеродной матрицы, высокой прочности, термоударной и высокотемпературной химической стойкости новой керамики с защитными антикоррозионными покрытиями существенно расширяет диапазон её практического применения.

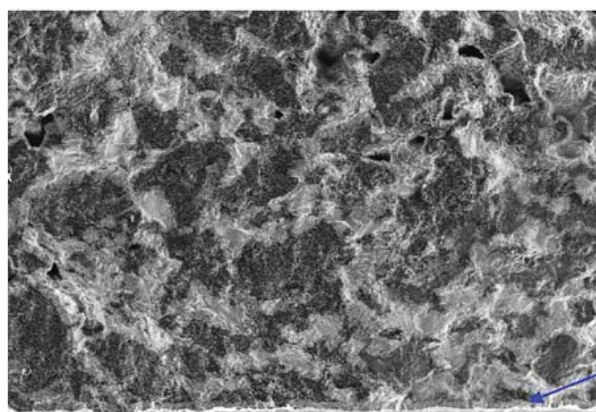
На рис. 35 показана последовательность операций по получению готовой керамической детали сложной геометрической формы, работающей в высокоскоростном газовом потоке при температурах, превышающих 1500 °С.

Применяют реакционно-спеченный карбид кремния в парах трения осевых и радиальных подшипников скольжения погружных центробежных и роторно-вихревых насосов и герметичных насосов, торцевых уплотнениях насосов, запорной арматуре, разнообразных износостойких изделиях.

Наиболее целесообразным считается применение SiC вместо металлов в двигателестроении. Это связано с тем, что изготовление проточной части газотурбинного двигателя (ГТД) из керамики и повышение его рабочей температуры до 1400 °С и выше позволит увеличить КПД с 26 до 45 %. При использовании керамики в дизельном двигателе его можно сделать неохлаждаемым, снизить массу и повысить экономичность.



а



б

Рисунок 35 – Микроструктура SiC: (C+Si)=50:50 материала без покрытия (а) и с SiC покрытием толщиной 39 мкм (б) после отжига при 1000 °С на воздухе в течение 60 час.

Изделия из карбидокремниевой керамики находят применение в качестве элементов газотурбинных двигателей для увеличения эксплуатационных температур, ведущих к существенному повышению эффективности многих конструкций (рис. 36).

Целесообразность применения керамики для двигателестроения объясняется не только её высокой жаропрочностью, но и тем, что благодаря её более высокой, по сравнению с металлами, коррозионной стойкости можно использовать низкосортное топливо. Применение керамики для изготовления деталей двигателей снижает их стоимость, в связи с низкой стоимостью керамики по сравнению с Ni, Cr, Co, Nb и др.

Аддитивные технологии для получения изделий из керамических материалов, подразделяют на 3 класса:

- технологии получения пористых структур (например, протезов для биологического применения, фильтров и др., в данных случаях пористость придаёт изделиям необходимую функциональность);
- технологии получения плотных монокристаллических изделий с ограниченными размерами;
- технологии получения плотных монокристаллических изделий без существенных ограничений по размерам.

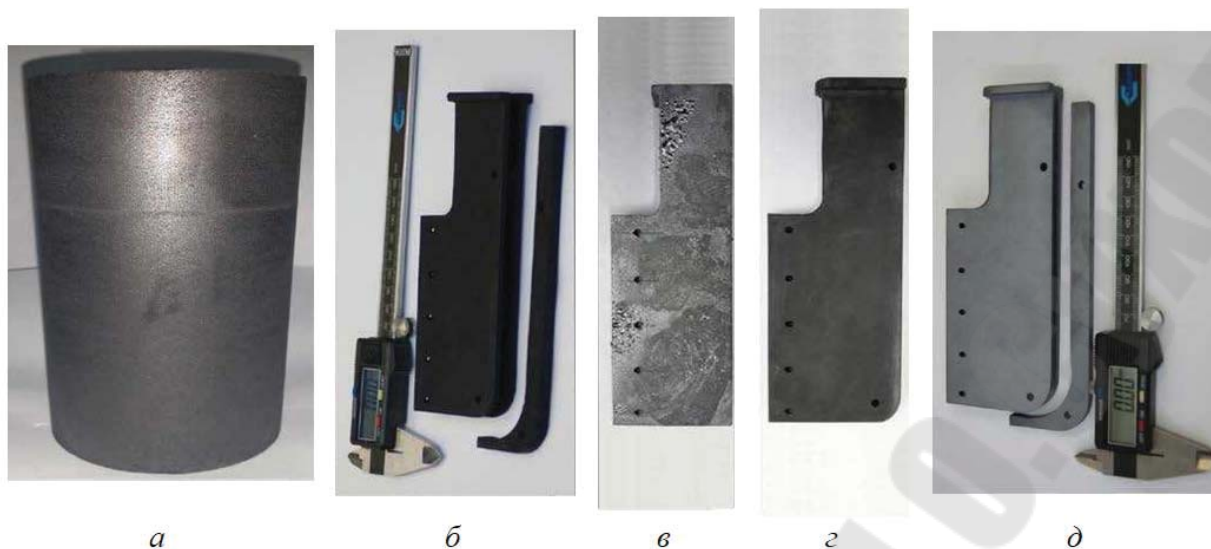


Рисунок 36 – Этапы изготовления керамической карбидокремниевой детали для работы в высокоскоростном газовом потоке при температуре более 1500 °С: *а* – болванка из углеродной пористой матрицы; *б* – углеродная заготовка после механической обработки; *в* – керамическая заготовка после силицирования; *г* – керамическая деталь после финишной обработки; *д* – деталь с нанесённым защитным SiC покрытием

В качестве исходных материалов для получения керамических изделий используют порошки и предкерамические полимеры (ПКП). Преимущество технологий, использующих ПКП, состоит в относительной простоте процесса с применением полимерных прекурсоров, что позволяет получать изделия по технологиям, предназначенных для полимерных материалов.

Существуют некоторые технологические сложности, связанные с пиролизом полимерных структур в керамику. Наиболее критичным является повышенное газообразование во время пиролиза ПКП, приводящее к усадке и не позволяющее напрямую получать готовые изделия. Кроме того, большинство предкерамических полимеров позволяют получать керамики только на основе Si.

Аддитивные технологии для получения керамических изделий условно разделяют на две группы: прямые («direct») и косвенные («indirect») (рис. 37).

Прямые в данном случае означает то, что материал наносится непосредственно в область поперечного сечения детали.

К особенностям прямых технологий относится необходимость наличия поддерживающих структур для построения нависающих поверхностей и возможность использования многокомпонентных систем для получения функционально-градиентных изделий.

В процессе косвенных технологий сначала наносится первый слой

материала, затем обрабатывается поперечное сечение изготавливаемой детали. После завершения процесса изготовления излишек материала, окружающий изделие, удаляется.

Особенности косвенных технологий заключаются в следующем:

- «лишний» материал может выступать в роли поддержек, что позволяет получать изделия с нависающими поверхностями. Но удаление лишнего материала в некоторых случаях может быть затруднено;
- материал наносится целиком на один слой, поэтому длительность процесса сокращается.

К наиболее распространённым косвенным технологиям относятся методы 3D-печати (3DP) и селективное лазерное спекание (Selective laser sintering – SLS). В первом методе используется печатающая головка, которая селективно наносит капли жидкого связующего вещества (рис. 37), во втором методе – энергия сфокусированного лазерного луча локально спекает или расплавляет порошок (рис. 38).

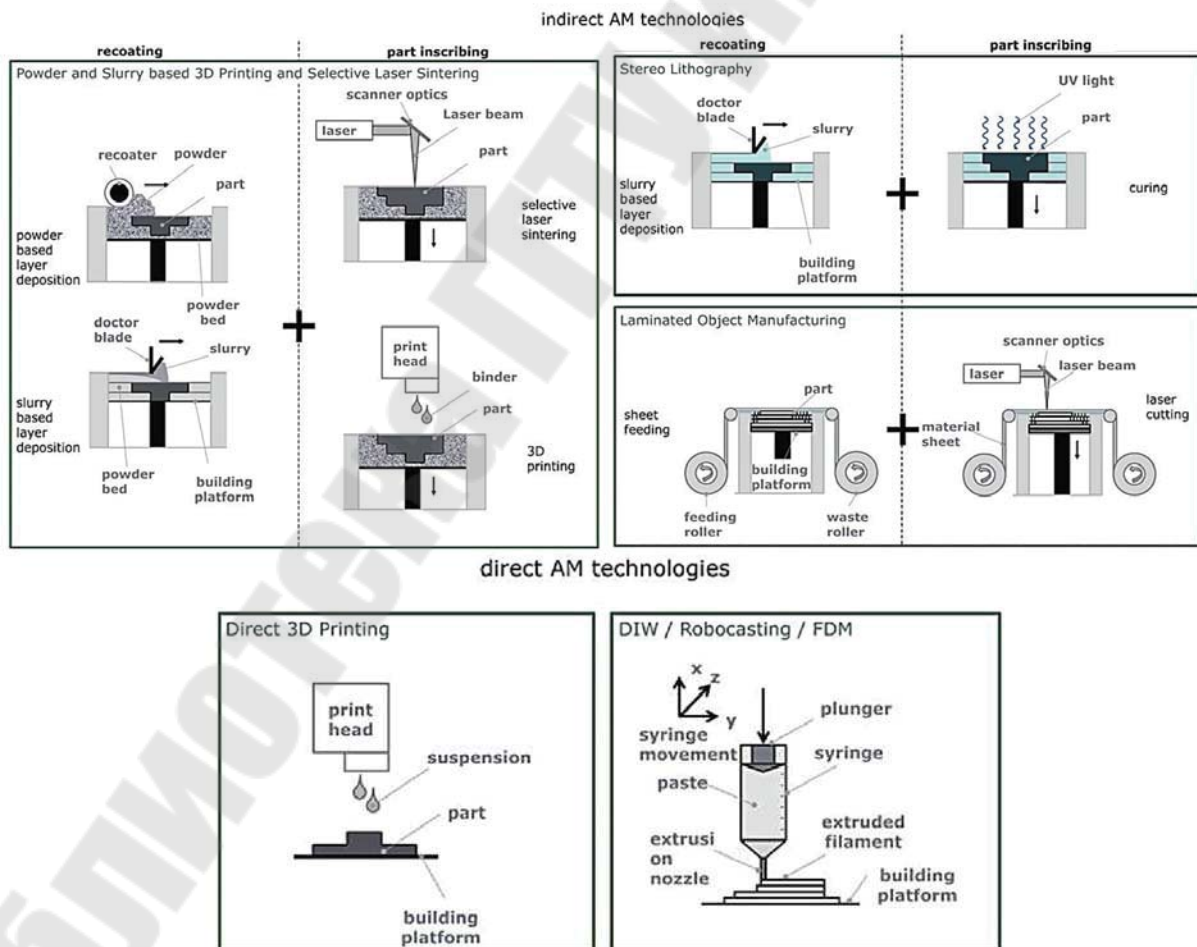


Рисунок 37 – Схемы основных процессов получения керамических изделий с помощью аддитивных технологий

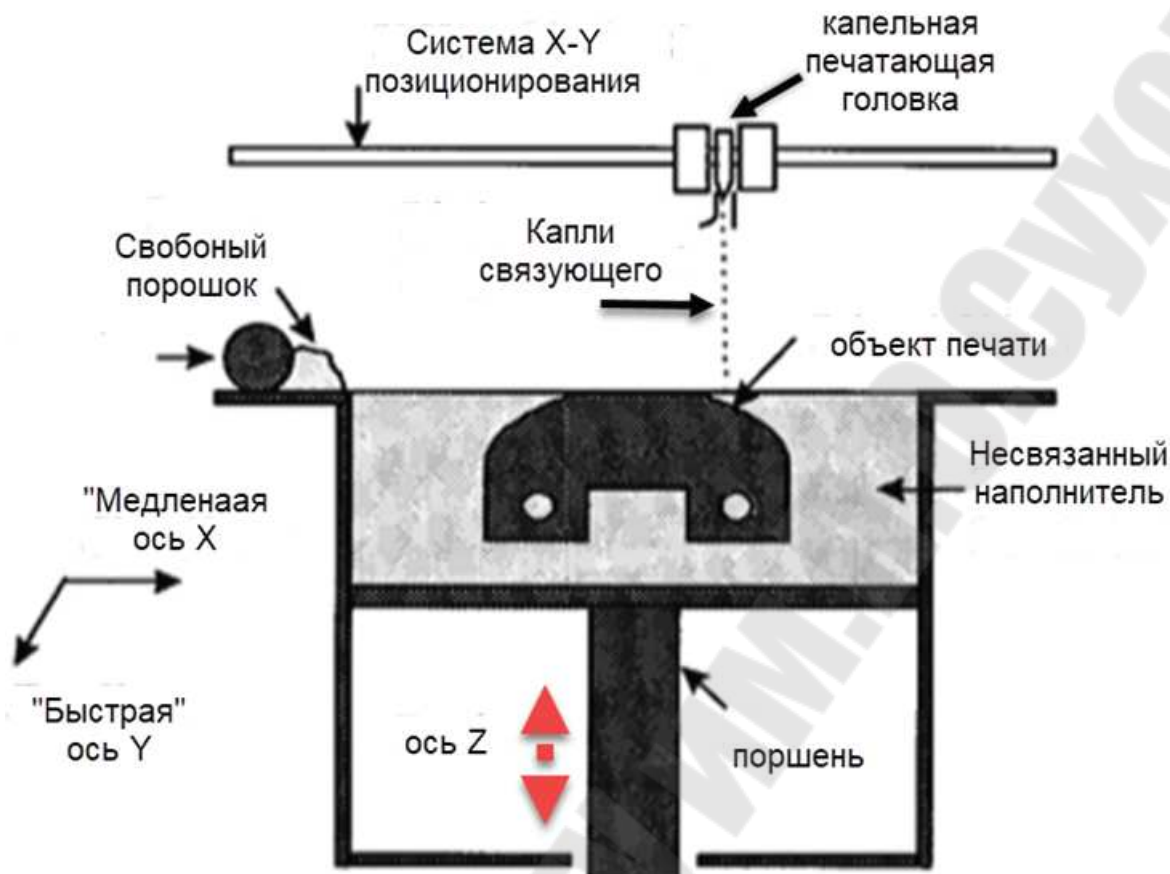


Рисунок 38 – Схема процесса 3DP

Технология 3DP. В качестве исходных материалов в процессе 3D-печати используют порошковые материалы. Слой порошка наносится на подложку и обрабатывается в соответствии с сечением детали путём локального соединения частиц порошка. Затем наносится новый слой порошка и происходит его обработка в соответствии с информацией о следующем сечении детали. В конце полученное изделие находится в толще порошка, из которого оно извлекается и очищается.

Технология 3DP, использующая связующий материал, также известна как Binder Jetting. В методе Binder Jetting сопловая печатающая голова наносит связующий жидкий материал на порошковый слой в места, соответствующие сечению детали. В некоторых случаях для стабилизации порошковый слой орошают водой. С целью увеличения скорости печати используют несколько печатающих головок.

Технология Binder Jetting, использующая порошковые материалы в качестве исходных, хорошо подходит для получения пористых керамических изделий. Большой проблемой, сдерживающей производство керамических деталей с помощью этого метода, является их низкая плотность и невысокая стабильность изделий во время

процесса изготовления. Это является следствием низкой плотности упаковки порошка в нанесённом слое (до 25 % от теоретической плотности). Для увеличения плотности порошкового слоя и использования более мелких порошков вместо сухих порошков применяются керамические суспензии (рис. 39).

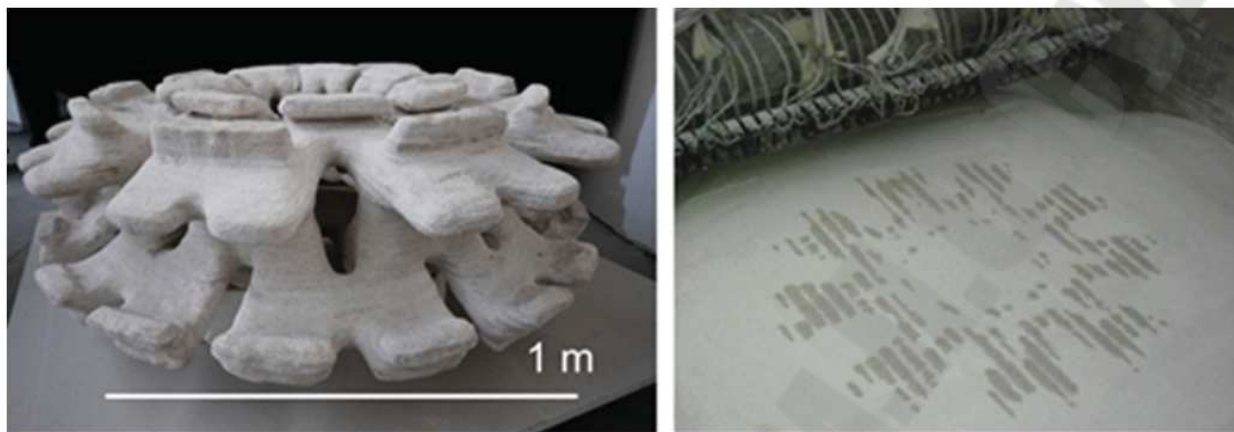


Рисунок 39 – Изделие, изготовленное по технологии 3DP из керамического порошкового материала с использованием связующего

Пористость изделий, получаемых по технологии 3DP, может быть уменьшена в результате дополнительной обработки. Для этой цели используют три основных способа:

1. Изменение состава керамического материала для улучшения спекаемости путём введения допирующих добавок или веществ, способствующих образованию вязкой жидкой фазы. Например, получение структуры с плотностью 95 % при добавлении ZnO и SiO_2 в трикальций фосфат.

2. Пропитка пористых заготовок, полученных при 3D-печати. Например пропитка медью заготовок из оксида алюминия, имеющих пористость 36 % после спекания. Аналогично процесс получения заготовок из смеси кремния, карбида кремния и декстрина. После пропитки заготовок жидкой кремниевой смолой пиролиз при $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ в атмосфере азота привёл к выделению углерода из декстрина и аморфного $SiOC$ из кремниевой смолы. В результате пропитки при $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ жидким кремнием в вакууме получен реакционно-связанный карбид кремния. Описано также получение углеродной заготовки с пористостью 48 % с использованием связующего на основе фуриловой смолы. При последующей пропитке заготовки кремнием при $1450\text{ }^{\circ}\text{C}$ в атмосфере азота получен реакционносвязанный композиционный материал на основе карбида кремния (рис. 40).

3. Использование холодного изостатического прессования либо горячего изостатического прессования заготовок. Получение изделий с

относительной плотностью 99,2 % из оксида кремния, допированного MgO, с помощью горячего изостатического прессования. Полученный материал имеет прочность на изгиб после спекания 324 МПа.

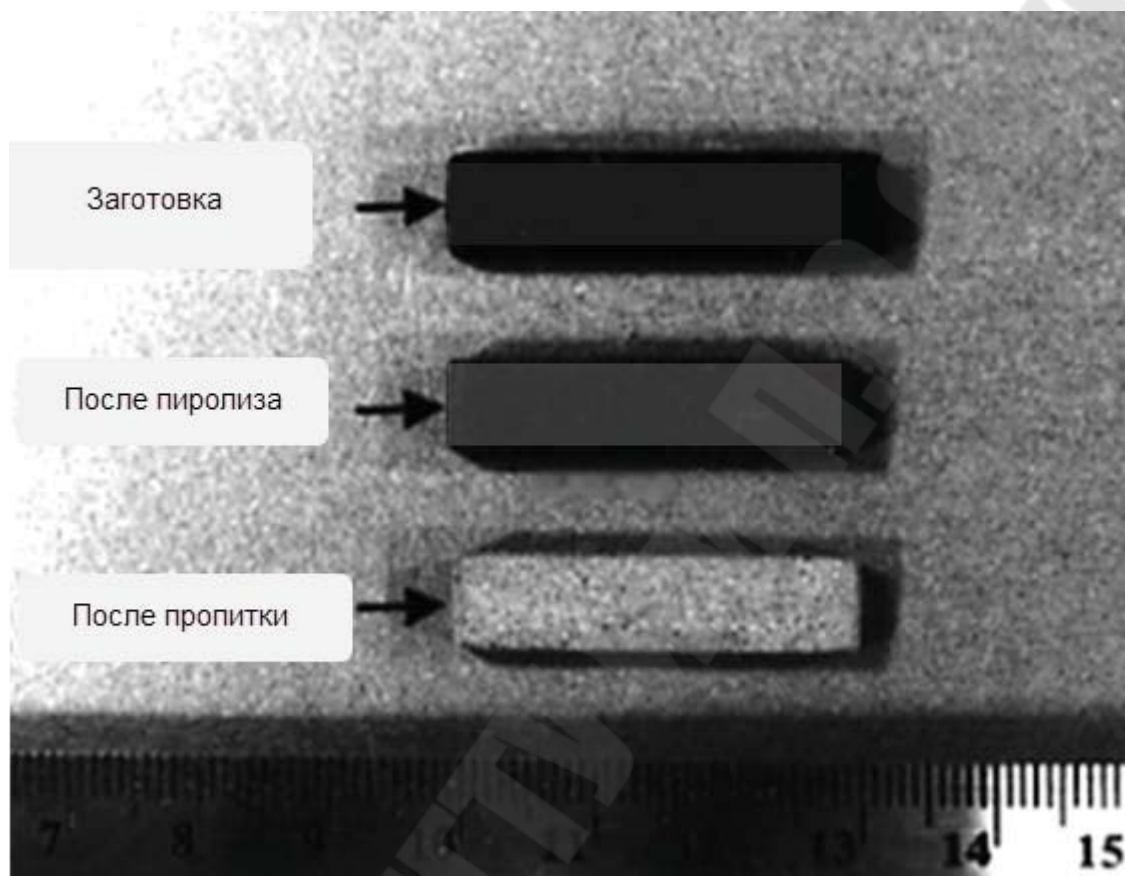


Рисунок 40 – Фото образцов до и после пиролиза и пропитки

Технология 3DP, или Binder Jetting, – перспективна для изготовления изделий из керамики, т. к. не имеет ограничений по форме деталей и их размерам. Однако данная технология позволяет получать изделия с высокой плотностью из ограниченного количества керамических систем, в связи с необходимостью последующей постобработки заготовок в виде пропитки.

Селективное лазерное спекание (SLS) порошков. Данная технология отличается от технологии 3DP тем, что в соответствии с сечением детали слой порошка обрабатывается лазерным лучом (рис. 38).

Получение плотной структуры путём лазерного спекания керамики затруднено, т. к. керамические материалы склонны к образованию трещин при резких локальных изменениях температуры. Кроме того, быстрое время взаимодействия лазерного излучения с порошком ограничивает диффузию материала и затрудняет спекание. Связующие вещества, смешанные с порошком, при термическом

взаимодействии могут использоваться для придания формы пористым керамическим изделиям (рис. 41).

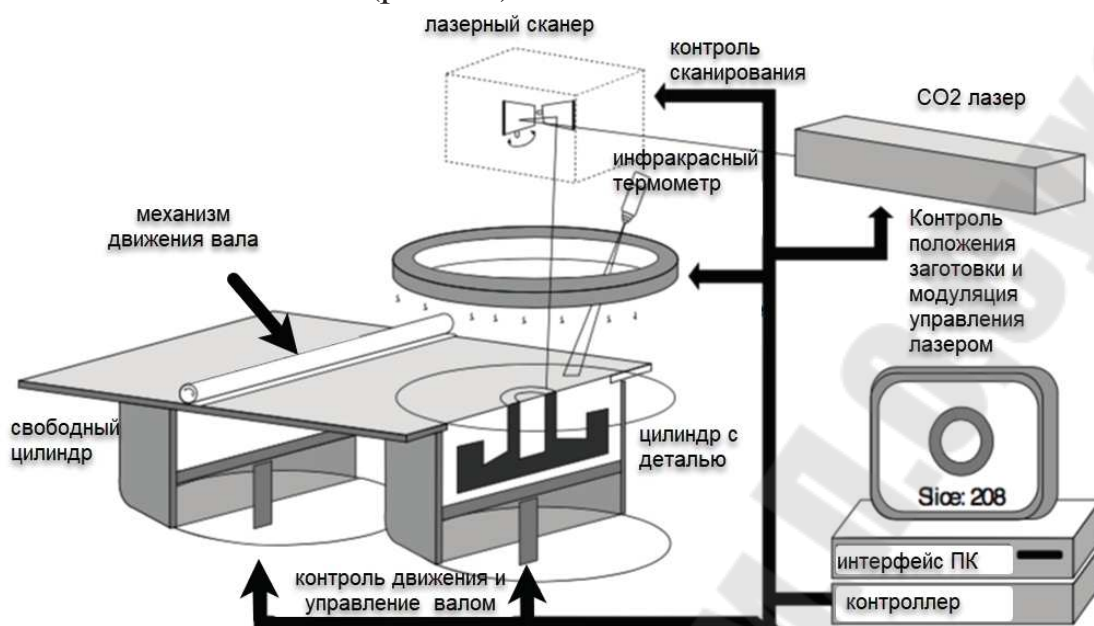


Рисунок 41 – Схема процесса селективного лазерного спекания

Получение плотной структуры из керамических порошков возможно при смешивании порошков и связующего вещества (неорганического либо полимерного), которое расплавляется под воздействием лазерного излучения.

Рассмотрим процесс получения изделий из материала на основе Si/SiC. В процессе лазерной обработки частицы порошка SiC связываются друг с другом в результате образования SiO₂ в атмосфере воздуха. Далее получаемые высокопористые заготовки пропитывают расплавом Si и производят получение плотной структуры путём плавления материала лазерным лучом и образования жидкой фазы.

Использование сферических частиц порошков оксида алюминия и циркония с размером 30 мкм в качестве исходного материала позволяет получать слой с высокой плотностью упаковки. Подогрев порошковой ванны, в которой происходит изготовление детали, до 1600 °С снижает склонность к образованию трещин в материале. При использовании технологии селективного лазерного плавления для керамики образование трещин нельзя предотвратить полностью и неконтролируемая пропитка порошка жидкой фазой, образованной при взаимодействии с лазером, приводит к получению нечётких контуров изделия.

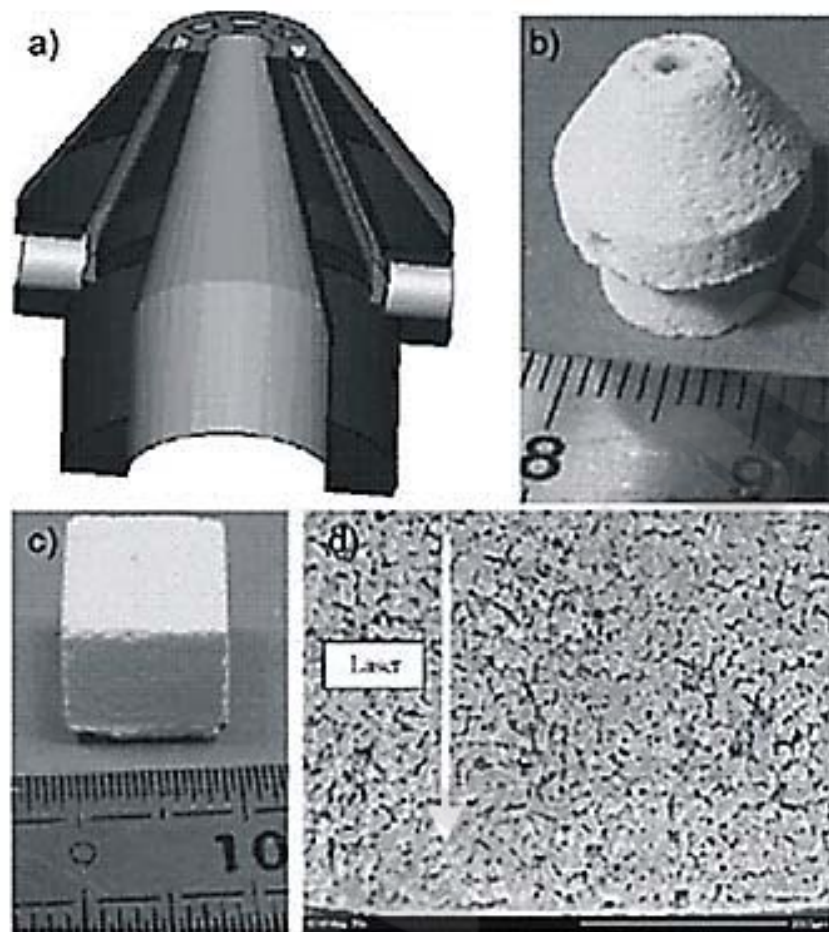


Рисунок 42 – Деталь, изготовленная из порошка стабилизированного иттрием диоксида циркония с помощью селективного лазерного спекания:
a – компьютерная модель, *b* – спечённая деталь, *c* – спечённый куб,
d – микроструктура поверхности материала куба

Стереолитография (SLA), основанная на послойном отверждении жидкого фотополимера и керамических частиц, также используется для получения керамических изделий. Обычно состав суспензии включает в себя раствор мономеров, фотоинициатор и добавки дисперсных керамических порошковых частиц содержанием 40–60 % об. (рис. 42).

В отличие от технологий, использующих порошки, в стереолитографии материал, окружающий деталь, является жидким, поэтому поддерживающие структуры изготавливаются вместе с изделием и требуют последующего удаления. С помощью стереолитографии можно получать керамические изделия с высокой относительной плотностью после спекания.

Австрийская компания Lithoz GmbH использует подход, в котором изготавливаемая деталь не погружается полностью в жидкий материал, а располагается в перевёрнутом положении на платформе и погружается в тонкий слой суспензии, находящейся на стеклянной подложке (рис. 43). Отверждение суспензии происходит при взаимодействии со

светодиодным излучением. Преимуществом такого подхода является малое количество исходной суспензии, необходимой для построения детали. Используют такие материалы, как Al_2O_3 , ZrO_2 , $Ca_3(PO_4)_2$, после спекания материалы имеют относительную плотность, равную 99 %. Недостатком такого метода является относительно низкая скорость изготовления и ограничения по размерам деталей. Стереолитография применяется и для получения пористых керамических изделий различного применения, в частности, для получения тонкостенных элементов, поскольку данная технология обладает высокой точностью построения.

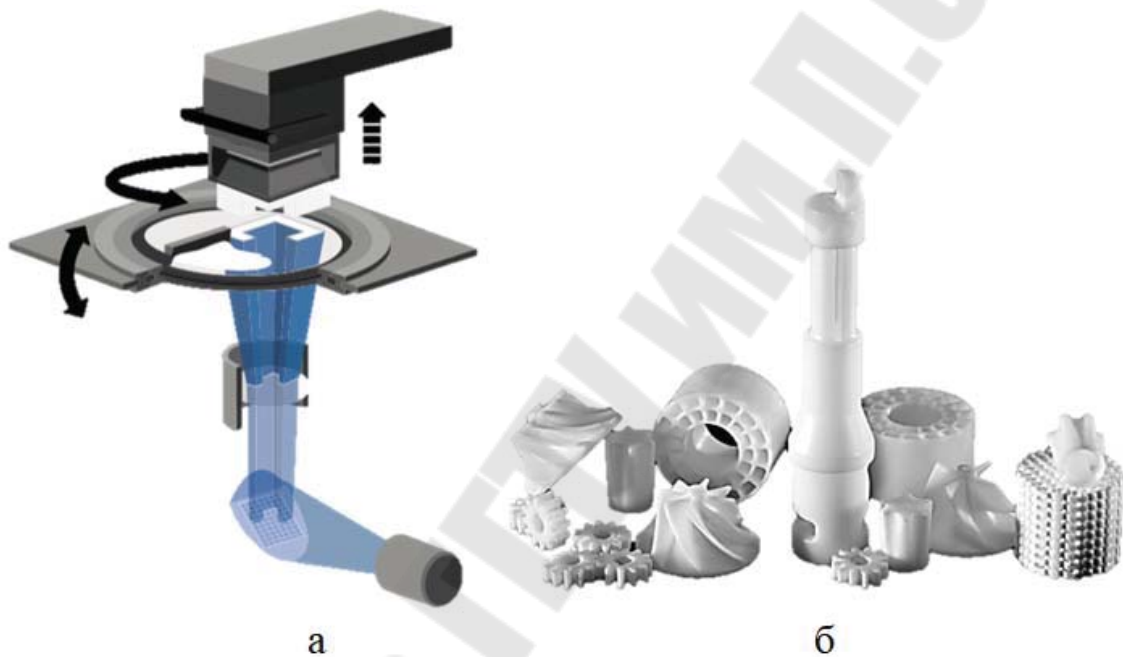


Рисунок 43 – Схема процесса изготовления изделий из керамики с помощью стереолитографии (а) и примеры полученных изделий (б) (компания Lithoz GmbH).

В общем случае стереолитография позволяет получать плотные монолитные керамические изделия. Лимитирующим шагом является процесс удаления связующего из заготовки перед проведением спекания. При нагреве связующее вещество переходит в газообразную фазу. Этот процесс может приводить к образованию дефектов в виде трещин. Процесс нагрева должен осуществляться очень медленно, удерживая давление внутри заготовки ниже критического уровня и обеспечивая выход образующихся газов из заготовки. Удаление связующего из керамических заготовок также проводится при получении изделий из паст с помощью литья под давлением. Для успешного удаления связующего из изделия со стенкой, толщиной около 1 см необходимо несколько дней.

В технологии «Three-dimensional printing techniques» в качестве исходного материала вместо сухих порошков используется керамическая суспензия. В данной технологии жидкая керамическая суспензия наносится в виде тонкого слоя как в технологии плёночного или шликерного литья. В процессе смачивания изделия капиллярные силы вытягивают жидкость из суспензии в пористую форму, и на поверхности формы образуется компактное порошковое изделие. В случае послойного нанесения суспензии форма образуется из ранее нанесённых и высушенных слоёв (рис. 44, 45).

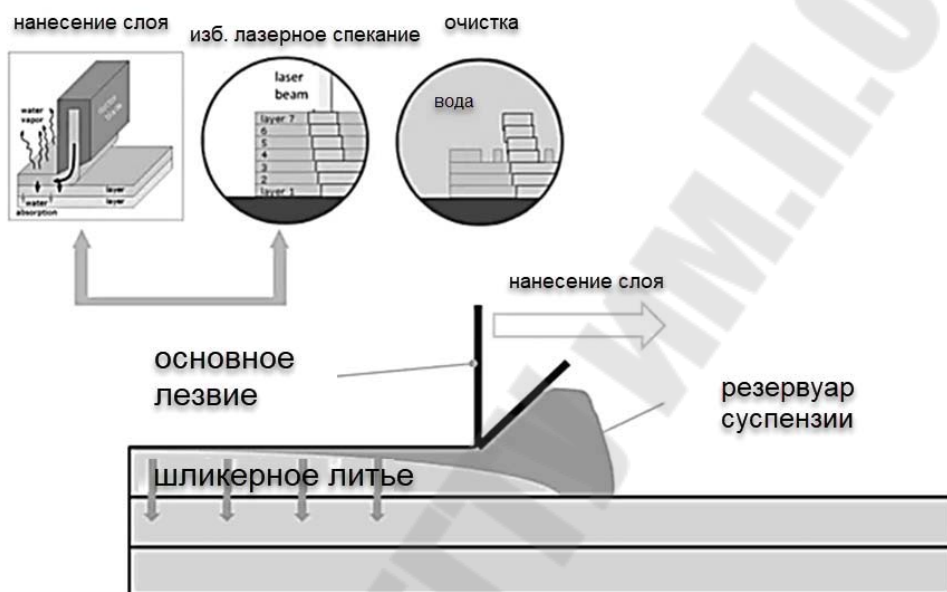


Рисунок 44 – Схема формирования изделия с помощью послойного нанесения суспензии

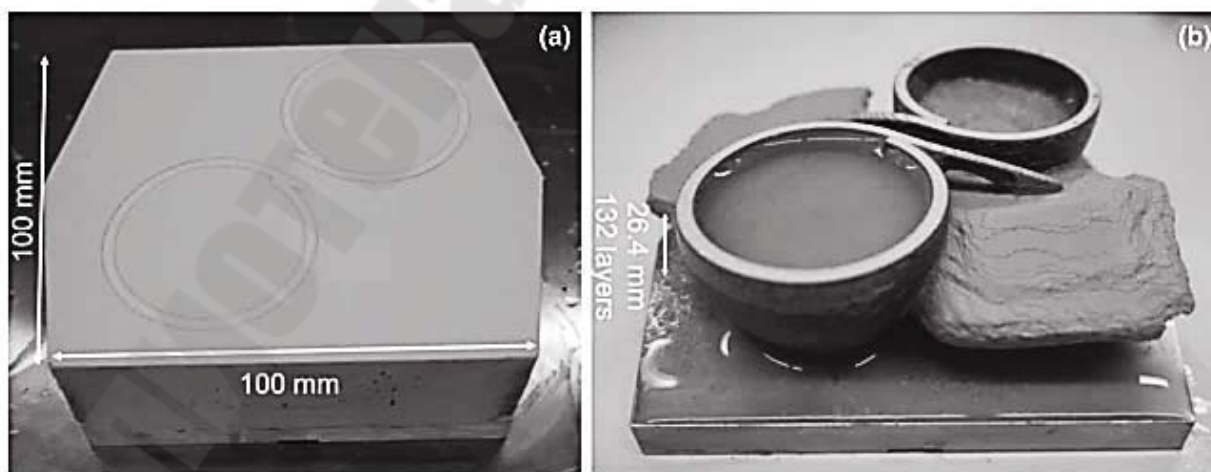


Рисунок 45 – Изделия из фарфора, полученные послойным нанесением суспензии

Для получения керамических изделий также используют технологию ламинирования листовых материалов (Laminated Object Manufacturing, LOM). Эта технология подразумевает изготовление изделий путём ламинирования бумаги, ленты и листов различных материалов при невысоких температурах и давлении.

Достоинством этой технологии является возможность получения изделий напрямую из заранее приготовленных листов или лент, полученных экструзией, плёночным литьём, предкерамической бумагой (рис. 46). Недостатки данной технологии – необходимость приготовления исходных листовых материалов и возможность образования дефектов между отдельными слоями.

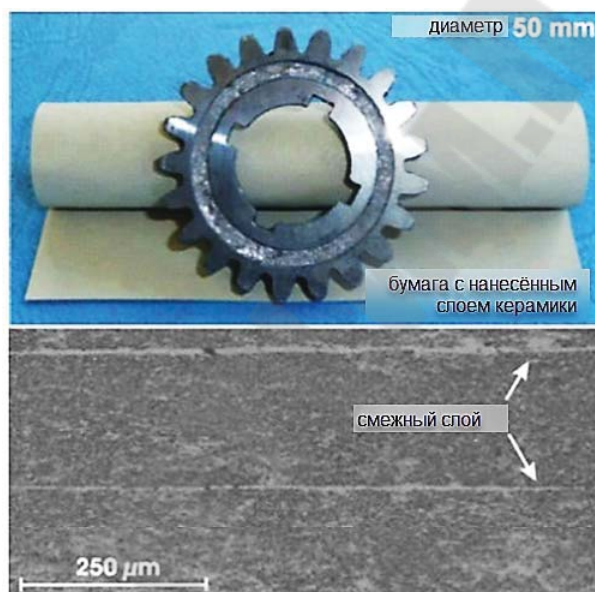


Рисунок 46 – Пример изделия из карбида кремния, полученного по технологии LOM и микроструктура материала (внизу)

К прямым аддитивным технологиям для получения керамических изделий относят:

- прямую струйную печать (Direct inkjet Printing);
- экструзию строжней и волокон, включающую робокастинг (Robocasting, Direct Ink Writing);
- моделирование методом наплавления (Fused Deposition Modelling, FDM).

В прямой струйной печати используется керамическая суспензия, наносимая в виде отдельных капель с помощью печатной головки и состоящая из керамических частиц (около 30 %), находящихся в жидкости. В жидкости также содержатся различные добавки для стабилизации суспензии, оптимизации вязкости и поверхностного

натяжения. Размер частиц керамики обычно находится в субмикронном диапазоне с малым распределением по размеру.

Технологии прямой струйной печати позволяют получать сложные структуры с высокой плотностью из различных оксидных и безоксидных керамик (рис. 47). Недостатком является необходимость приготовления суспензии и ограничения по размерам изготавливаемых деталей.

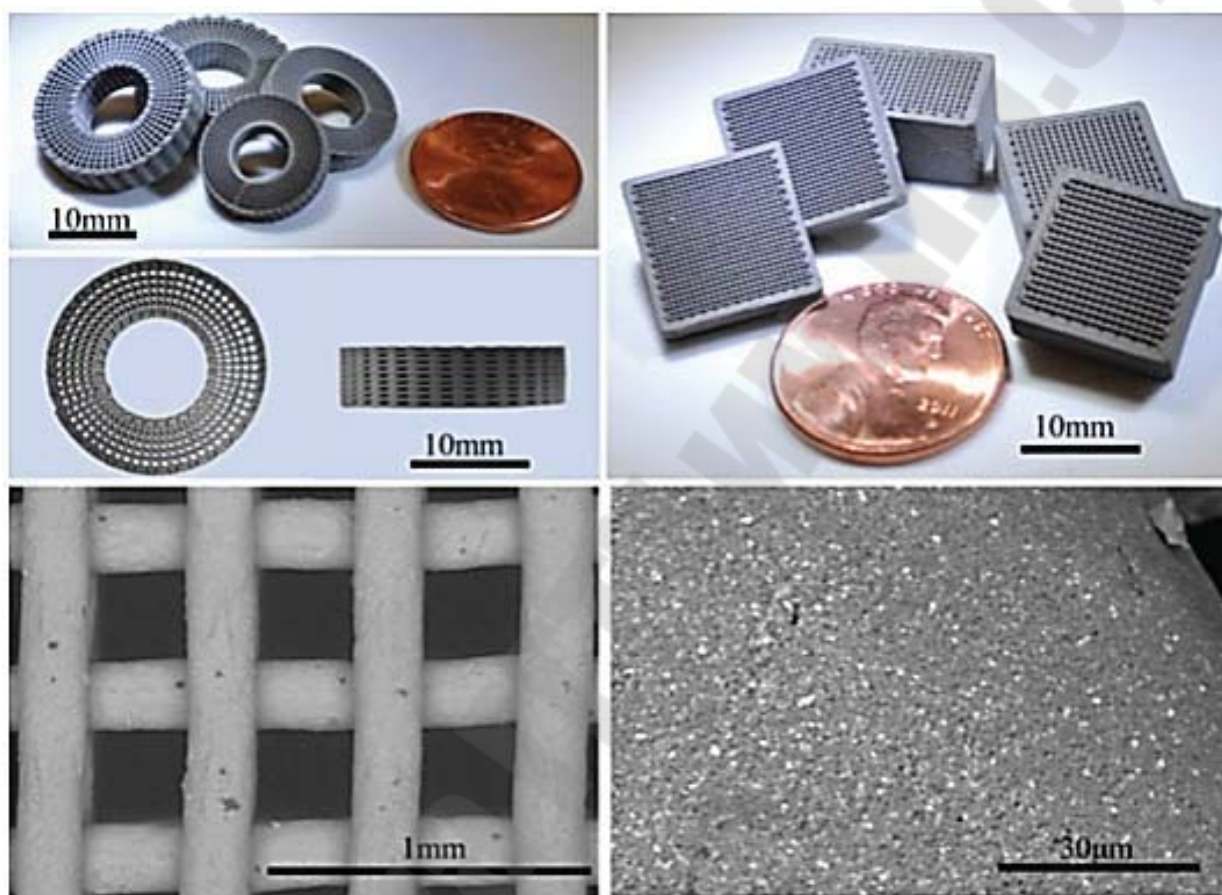


Рисунок 47 – Сетчатая конструкция, изготовленная из карбида кремния по технологии робокастинг

Получение монолитных изделий с помощью данных технологий имеет ряд сложностей. В частности, в случае использования исходных компонентов с большим количеством полимерного связующего (например, в FDM), его удаление может быть затруднено. В случае метода прямой струйной печати получаемое изделие состоит из отдельных волокон, создавая текстурированную структуру, что влияет на качество поверхности и механические свойства. Детали, изготовленные по технологии стереолитографии, имеют качество поверхности значительно выше. В случае применения технологии прямой струйной печати качество поверхности зависит от диаметра волокон исходного материала (рис. 48).

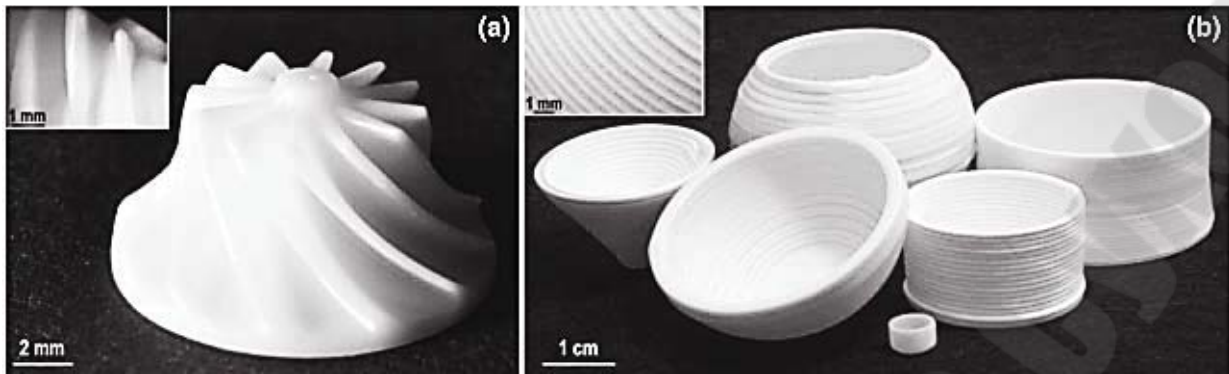


Рисунок 48 – Фотографии изделий из оксида циркония, полученного с помощью стереолитографии *a* – и из оксида алюминия по технологии прямой струйной печати *b*.

Проблемы изготовления монолитных керамических изделий с высокой плотностью с помощью аддитивных технологий разделяют на следующие:

1. Физико-химические свойства функциональных керамик существенно зависят от микроструктуры, которая связана с плотностью упаковки частиц порошка и их спекаемостью, и химического состава (например, наличия добавок для улучшения процесса спекания);

2. Керамические изделия обычно изготавливаются из мелкодисперсных порошков, обладающих плохой текучестью. В то же время порошки должны обладать хорошей текучестью для нанесения равномерных слоёв материала в случае использования технологий Binder Jetting или селективного лазерного спекания. Мелкодисперсные частицы склонны к агломерации и не обеспечивают нанесение равномерного слоя с высокой плотностью упаковки. Плотность упаковки сухих керамических порошков с размером частиц от 20 до 100 мкм обычно ниже 50 % от теоретической плотности (обычно 25–45 %). Плотность также зависит от способа нанесения слоя (ракель, ролик и т. д.). Использование керамических суспензий или паст делает возможным нанесение тонких слоёв материала с использованием мелкодисперсных частиц порошка. Однако большая часть керамических суспензий, используемых в аддитивных технологиях, содержат большое количество органических связующих веществ (40–60 % об.). Удаление органического связующего вещества имеет ряд ограничений в том случае, когда толщина элементов изделий превышает некоторую величину;

3. Для получения керамической заготовки с высокой плотностью с помощью аддитивных технологий требуется проведение спекания материала. В настоящий момент спекание, осуществляемое

непосредственно в процессе послойного изготовления изделия, происходит при использовании технологии селективного лазерного спекания. При использовании данной технологии спекание происходит в локальных участках при взаимодействии с лазером и высокоскоростном нагреве материала, значительно превышающем скорость нагреве при традиционном спекании керамики. Это приводит к образованию большого количества трещин в материале и затрудняет получение плотной структуры. В случае обработки лазером для получения плотной структуры необходимо образование жидкой фазы, что в свою очередь отрицательно влияет на склонность к трещинообразованию из-за высоких термических градиентов при лазерной обработке.

Немецкая компания Schunk GmbH изготавливает изделия из карбида кремния, используя технологию Binder Jetting, или 3DP, где в качестве исходного материала используется порошок. В патенте «Method for making a ceramic component» указывается, что трёхмерное изделие получается из порошкового материала в виде карбида кремния (возможны добавки чистого углерода) путём его послойного синтеза с помощью органического связующего вещества. Получаемая пористая заготовка пропитывается расплавом чистого кремния. Преимуществом данного способа является возможность использования относительно крупных частиц порошка карбида кремния, обладающих хорошей текучестью, что позволяет наносить равномерные слои порошкового материала. Остаточная пористость в заготовках устраняется путём пропитки расплавом кремния. Также возможно получение изделий сложной конфигурации без наличия существенных ограничений по размерам изделий. При таком подходе усадка материала незначительна по сравнению с другими технологиями.

При нанесении связующего материала на порошок карбида кремния можно добавить то количество углерода, которое необходимо для образования, вторичного SiC после пиролиза при спекании и пропитке кремнием. Полученные с помощью такой аддитивной технологии заготовки, не требуя специальных методик постобработки, могут быть подвергнуты стандартным процессам спекания и пропитки, применяющимся в традиционных технологиях при получении керамических изделий (рис. 49).

Немецкая компания WZR предлагает 3D-печать изделий из керамических материалов, в частности, оксида алюминия (рис. 50), используя технологию Binder Jetting.

Попытки получения изделий из керамоматричных композитных материалов с помощью традиционных технологий начались более 30 лет назад. Материалы только сейчас достигают того уровня, когда они

обладают комплексом необходимых свойств. Однако высокая стоимость материалов (волокон, покрытий) и множества технологических операций не являются экономически эффективными для изготовления небольших партий изделий.

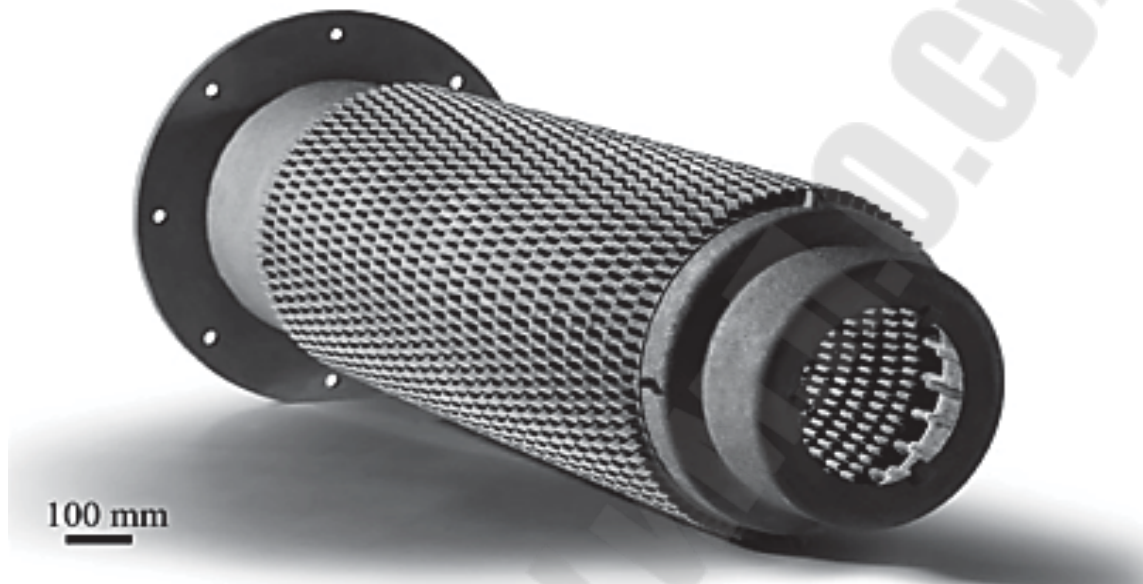


Рисунок 49 – Трубка рекуперативной горелки, изготовленная с помощью 3D-печати из карбида кремния (Schunk GmbH)



Рисунок 50 – Примеры изделий из оксида алюминия, изготовленные компанией WZR

Использование ламинирования (LOM), а также метода послойного изготовления изделий из порошков в заранее сформированном слое – в настоящий момент единственные методы из группы аддитивных технологий, которые позволяют добавлять упрочняющие волокна в материал детали.

В технологии LOM используется листовой материал с клеящим покрытием, который послойно разрезается лазером, и слои соединяются друг с другом с помощью клеящего вещества. Существует возможность получения Si-SiC керамики с помощью технологии LOM из прекерамической бумаги. В материале имеется остаточный чистый кремний, который ограничивает рабочие температуры до 1300 °С.

Для получения изделий из керамоматричных композиционных материалов применяют технология Binder Jetting (рис. 51).

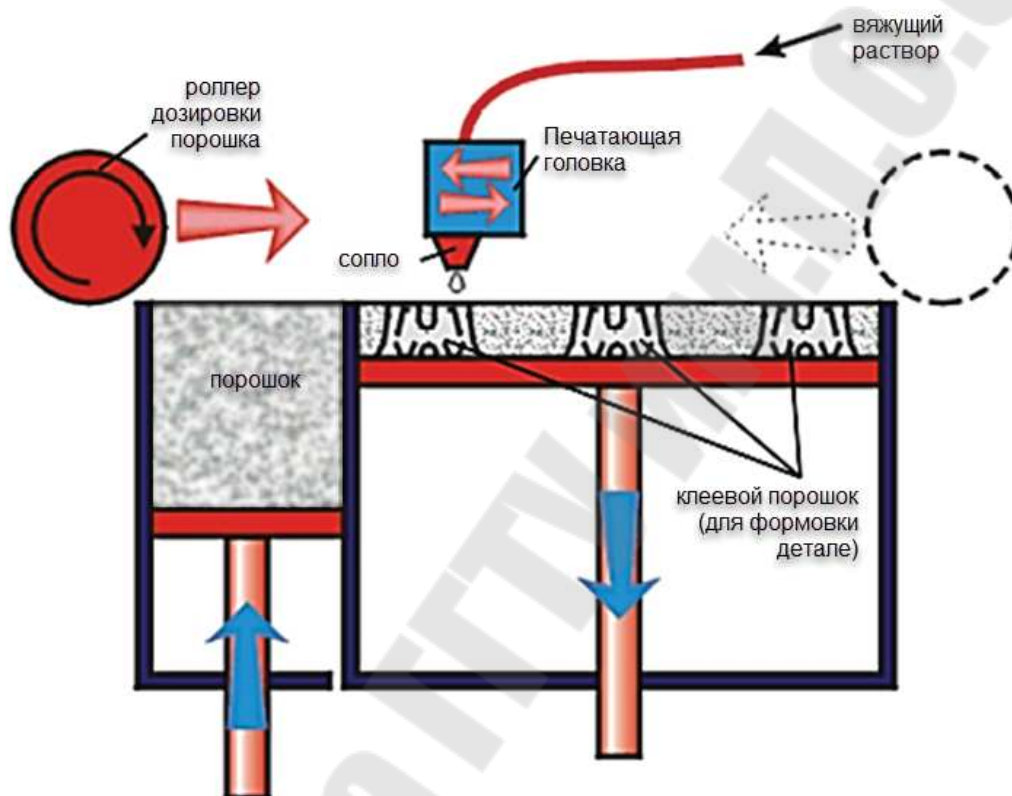


Рисунок 51 – Схема технологии Binder Jetting

В качестве исходных материалов использовали порошки SiC различного размера, а также смесь с бимодальным распределением частиц по размерам для повышения плотности упаковки. Частицы используемых порошков марки Carborex SiC (Washington Mills AS) с зернистостью F220, F240 F360, F600 имеют неправильную оскольчатую форму (рис. 52). В исходные порошки также добавляли волокна SiC с объёмной долей от 25 до 75 % и длиной 65–70 мкм (рис. 53).

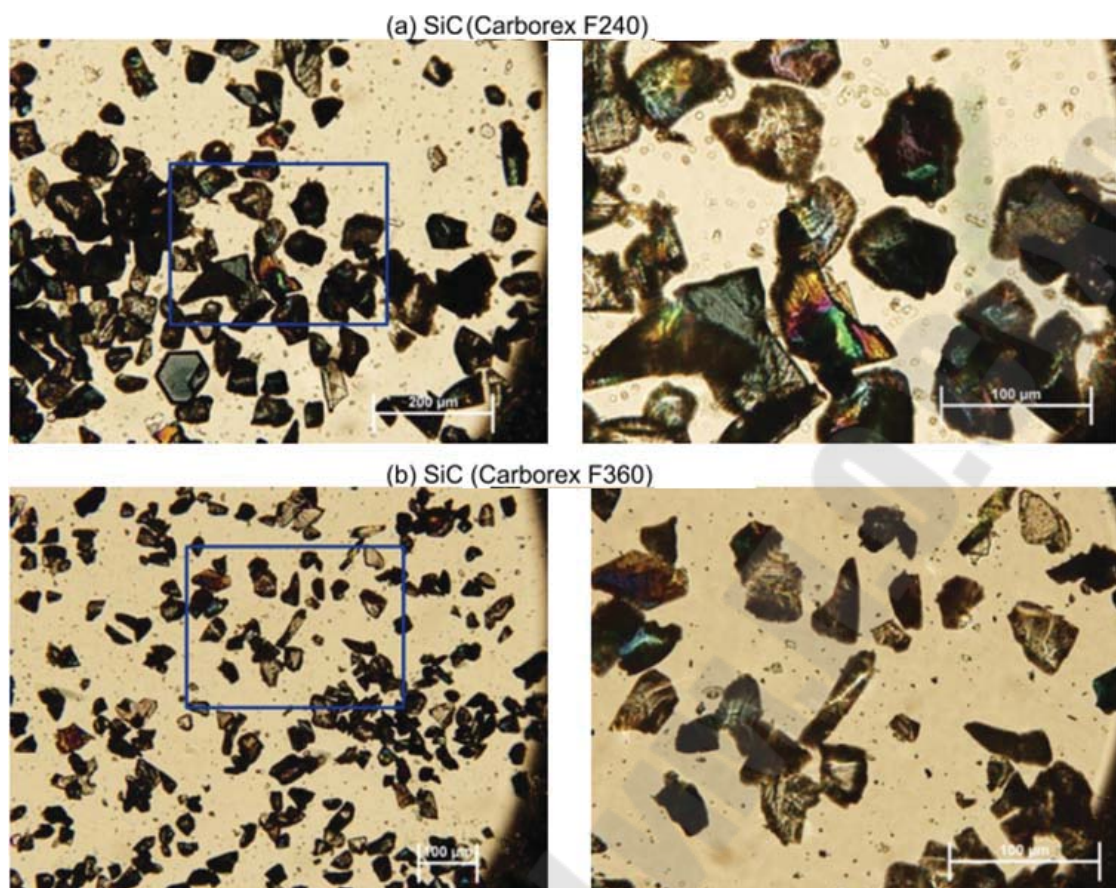


Рисунок 52 – Исходные порошки SiC



Рисунок 53 – Волокна SiC (Advanced Composite Materials, LLC)

Для получения керамических изделий использовалась установка M-Flex фирмы ExOne (рис. 54). В качестве связующего вещества применяли органическое связующее, поставляемое компанией ExOne. Заготовки пропитывались в вакууме поликарбосиланом или фенольной смолой. Использовали поликарбосилан марки SMP-10 компании Starfire Systems, который при температурной обработке (пиролизе в потоке аргона при температуре 1000 °C) переходит в SiC (рис. 55).



Рисунок 54 – Установка ExOne M-Flex, работающая по технологии Binder Jetting

Для уменьшения пористости заготовок их пропитывали расплавом чистого кремния. Плотность заготовок после 3D-печати в зависимости от размеров частиц используемого порошка составляла от 0,87 до 1,95 г./см³, что значительно ниже теоретической плотности материала (около 3,2 г/см³).



Рисунок 55 – Образцы из SiC, изготовленные по технологии Binder Jetting, после пиролиза

При использовании порошка с большей зернистостью F240 ($d_{50} = 44,5$ мкм) плотность образцов выше, чем при использовании порошка с зернистостью F360 ($d_{50} = 22,8$ мкм). При использовании

поликарбосилана SMP-10 для пропитки образцов их плотность выше, чем при использовании фенольной смолы.

После пропитки поликарбосиланом (рис. 56, 57), неравномерно покрывающим порошковые частицы SiC, между отдельными частицами карбида кремния обнаружены большие поры, что свидетельствует о неплотной упаковке частиц.



Рисунок 56 – Оптические изображения шлифов образцов из SiC, полученных по технологии Binder Jetting из порошка зернистостью F240, после пропитки поликарбосиланом

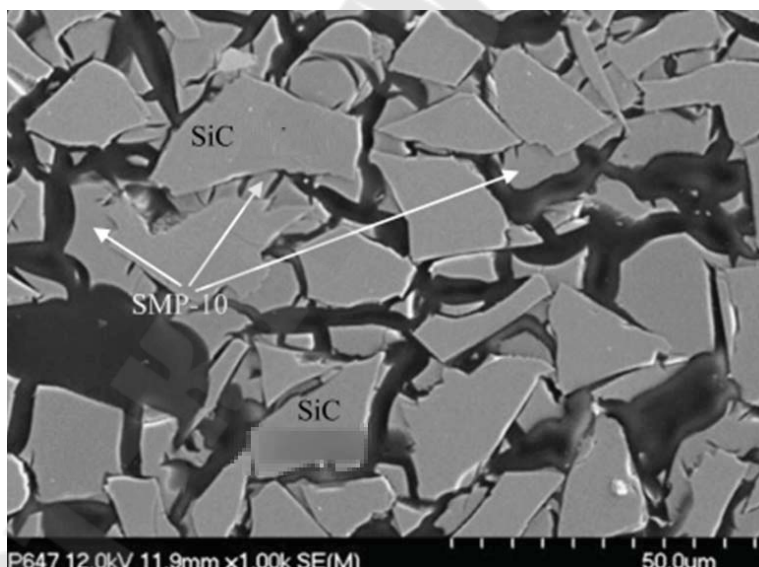


Рисунок 57 – СЭМ-изображения шлифов образцов из SiC, полученных по технологии Binder Jetting из порошка зернистостью F240, после пропитки поликарбосиланом

В образце после пропитки смолой (фенольной) также наблюдаются крупные поры, пропитывающее вещество сконцентрировано в большей части по краям образцов (рис. 58).

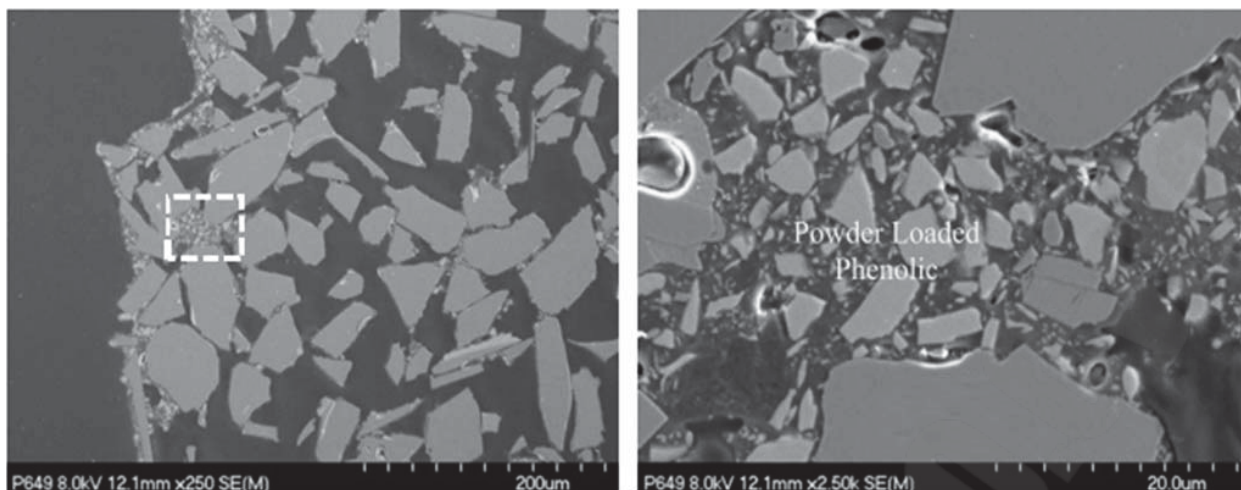


Рисунок 58 – СЭМ-изображения шлифов образцов из карбида кремния, полученных по технологии Binder Jetting из порошка зернистостью F240, после пропитки фенольной смолой

На рис. 59 приведены изображения микроструктуры образца, изготовленного из смеси порошков SiC, зернистостью F240 (90 % об.) и F360, (10 % об.) после пропитки. При добавлении в пропитывающее вещество – поликарбосилан – порошка SiC с размером частиц 0,7 мкм (25 % об.) плотность получаемых заготовок повысилась.

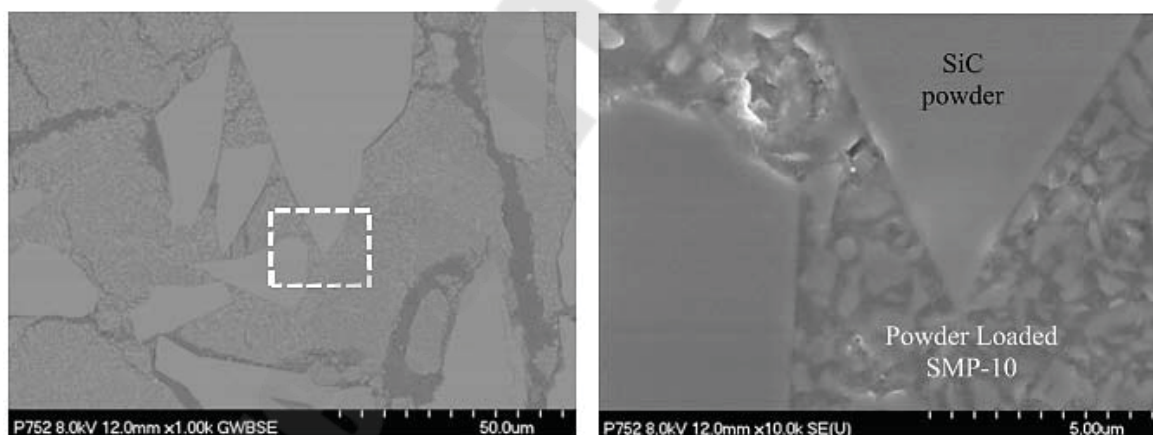


Рисунок 59 – СЭМ-изображения шлифов образцов из карбида кремния, полученных по технологии Binder Jetting из смеси порошков зернистостью F240 (90 % об.) и F360 (10 % об.), после пропитки поликарбосиланом

Для повышения плотности заготовок также применялась пропитка расплавом чистого кремния (рис. 60). Кремний полностью заполняет поры в образце, излишки его располагаются по краям образцов. Несмотря на то, что пористость образцов заметно уменьшается, пропитка кремнием приводит к снижению рабочей температуры материала из-за относительно низкой температуры плавления кремния.

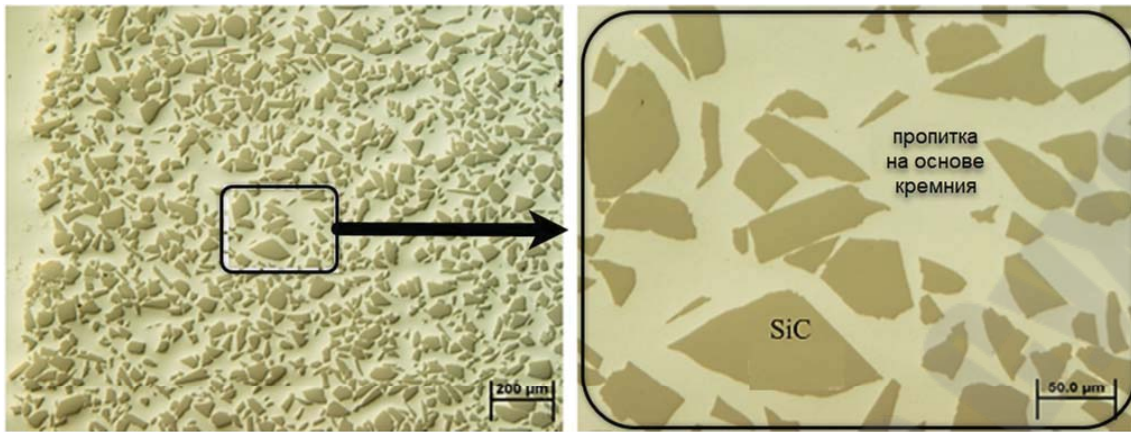


Рисунок 60 – Изображения шлифов образцов из карбида кремния, полученных по технологии Binder Jetting из порошков зернистостью F240, после пропитки фенольной смолой и последующей пропитки расплавом кремния.

При добавлении к исходному порошку SiC волокон SiC (35 % об.) и последующей пропитки заготовок поликарбосиланом (рис. 61), волокна SiC равномерно без определённой направленности распределяются по сечению.

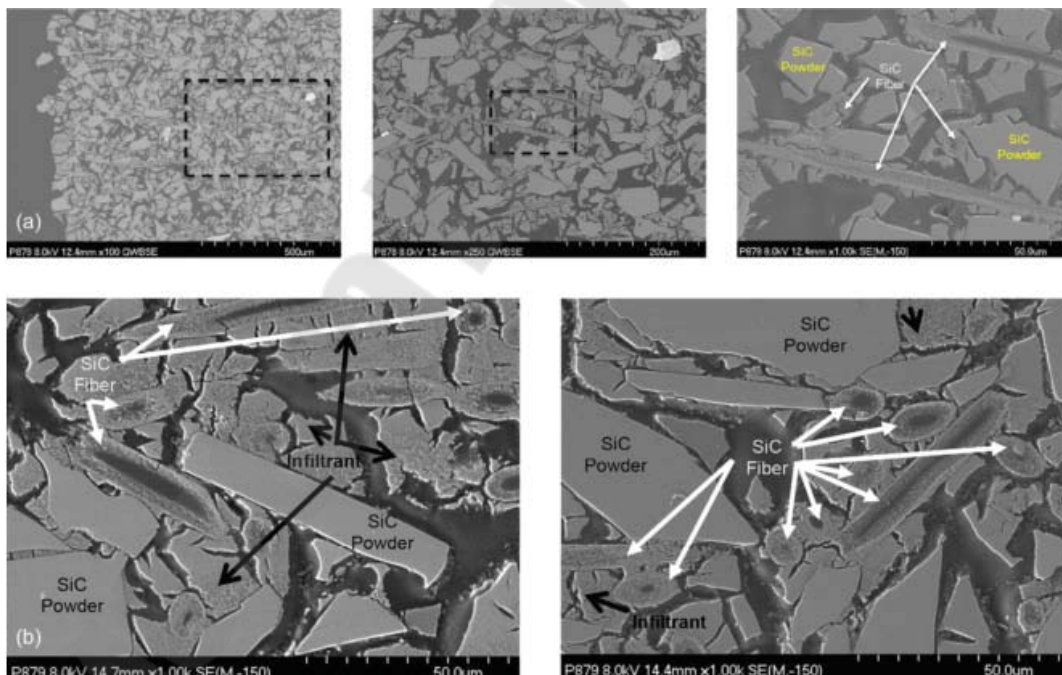


Рисунок 61 – Изображения шлифов образцов из карбида кремния, полученных по технологии Binder Jetting из смеси порошков зернистостью F240 (90 % об.) и F360 (10 % об.) с добавлением волокон SiC, после пропитки поликарбосиланом

Для повышения плотности заготовок использовали дополнительную пропитку образцов, в результате чего их плотность

повысилась от 0,20 до 0,55 г./см³. Наибольшее увеличение плотности произошло при проведении первых двух пропиток (рис. 62).



(a)



(b)

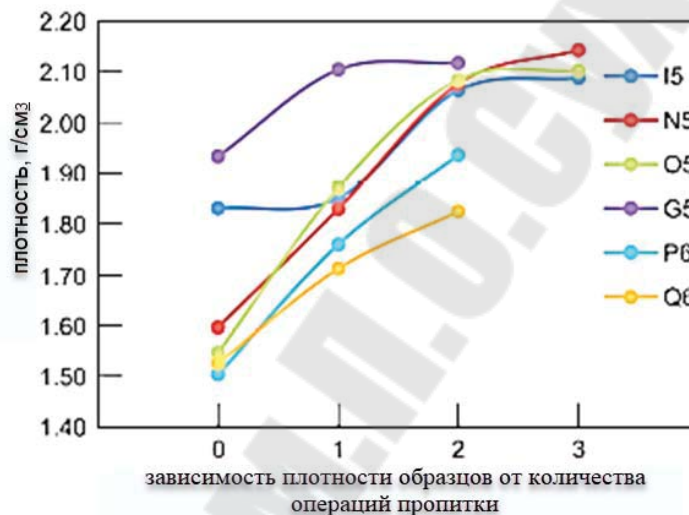


Рисунок 62 – Изображения образцов из карбида кремния после пропитки (a, b) и график зависимости плотности образцов от количества операций пропитки

При проведении испытаний на прочность образцы с упрочняющими волокнами показали более высокие значения прочности, чем образцы без упрочняющих волокон. Выход волокон из материала не наблюдался, видны волокна, соединяющие пористые области.

Было отмечено, что свойства композитного материала существенно зависят от покрытия между волокнами и матрицей. В данном случае волокна SiC жёстко связаны с матрицей из-за отсутствия промежуточной фазы. Это может привести к тому, что материал будет вести себя как монолитный.

По данным американской компании Starfire Systems, производителя керамообразующих полимеров, поликарбосилан марки SMP-10 имеет выход 72–78 % в виде карбида кремния. При температурах 1250–1700 °C образуется нанокристаллической β -SiC, при температурах 850–1200 °C – аморфный.

Процесс получения плотных монолитных заготовок из карбида кремния реализуется путём их пропитки поликарбосиланом марки

SMP-10 и пиролиза, осуществляемых в несколько итераций (рис. 63). Указано, что состав и пористость образцов существенно зависят от температуры обработки. При 1050–1100 °С заготовки из SiC имели малое количество кислорода и остаточного углерода, но высокую пористость. Более высокие температуры привели к кристаллизации β-SiC. При температуре обработки, равной 1700 °С, с удалением кислорода и избытка углерода путём отвода CO были получены соединения, близкие к стехиометрическому составу (рис. 64).



Рисунок 63 – Детали газотурбинного двигателя из SiC с упрочняющими волокнами SiC, полученные с помощью технологии Binder Jetting (сегменты турбинных лопаток)

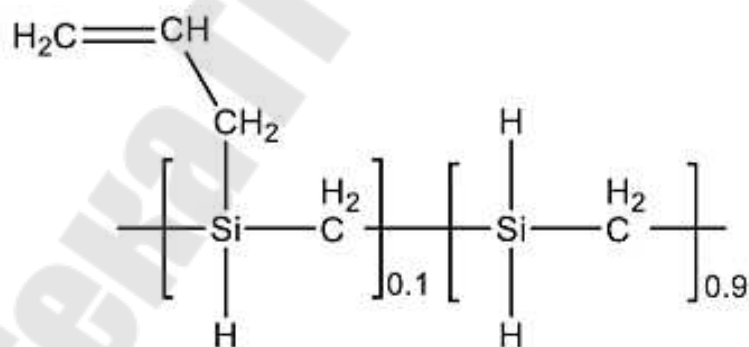


Рисунок 64 – Структура поликарбосилана SMP-10

На рис. 65 приведены дифрактограммы карбида кремния, полученного из керамообразующего полимера поликарбосилана SMP-10 при различных температурах пиролиза. Керамика, полученная при температуре 1300 °С, имеет аморфное строение. При более высоких температурах образуется кристаллический β-SiC с некоторым количеством α-SiC при 1700 °С. При этом объёмная усадка материала при различных температурах обработки составляла от 11 до 19 % об.

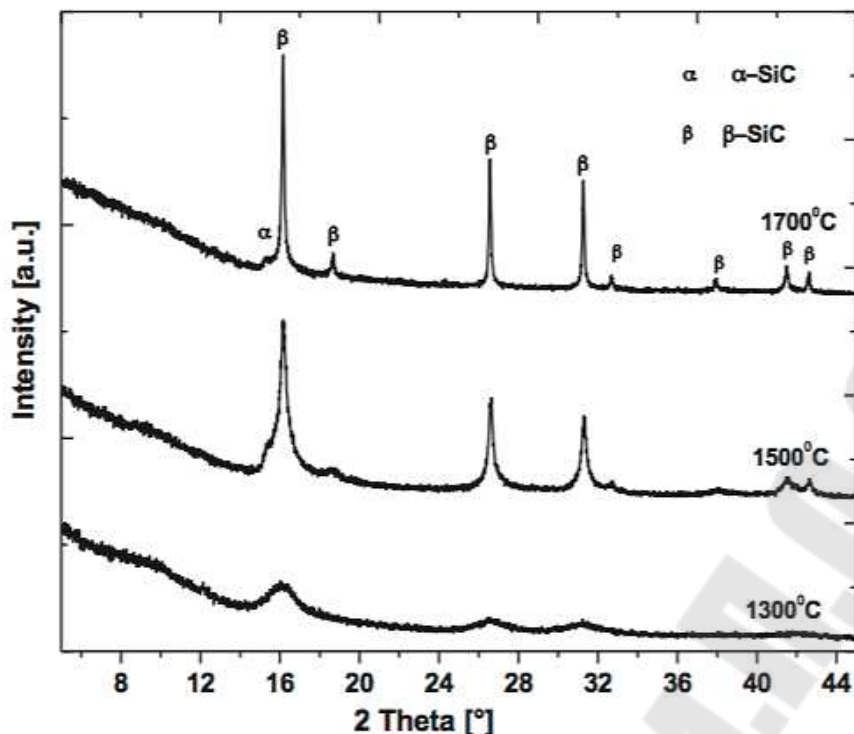


Рисунок 65 – Дифрактограммы карбида кремния, полученного из поликарбосилана SMP-10 при различных температурах

Оборудование для изготовления керамических изделий с помощью аддитивных технологий. В настоящий момент на рынке представлены различные 3D-принтеры, позволяющие изготавливать керамические изделия. Существующее оборудование работает по различным технологиям и использует в качестве исходных материалов главным образом керамические суспензии либо порошковые материалы.

Одним из методов, с помощью которого получают керамические изделия, является стереолитография. По этой технологии работает 3D-принтер французской компании 3DCeram Ceramaker (рис. 66).

Принтер имеет рабочую зону с размерами 1000x2300x2300 мм. Для обработки слоя материала используется ультрафиолетовый лазер. В качестве исходных материалов используются керамические суспензии, пасты, состоящие из фоточувствительных мономеров / олигомеров, смешанные с керамическими частицами.

Другой технологией, в которой в качестве исходного материала используется керамическая суспензия, является DLP (Digital Light Processing). Эта технология – альтернатива стереолитографии, вместо лазера использует светодиодные проекторы. Изображение слоя проецируется на исходный материал, где происходит его затвердевание. По этой технологии работает 3D-принтер австрийской компании Lithoz.

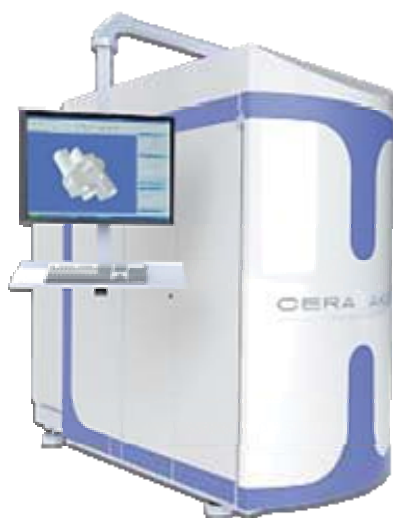


Рисунок 66 – 3D-принтер Ceramaker
компании 3DCeram

Установка CeraFab 7500 (рис. 67), разработанная компанией Lithoz, позволяет изготавливать керамические изделия с плотностью ~ 99 % от теоретической (рис. 68).



Рисунок 67 – 3D-принтер CeraFab 7500 компании Lithoz

В качестве исходных материалов используют оксид алюминия, диоксид циркония и трикальций фосфат. Размеры рабочей зоны – 76x43x150 мм.

3D-принтер, работающий по технологии DLP, ADMAFLEX 130 голландской компании Admatec (рис. 69), был анонсирован в 2014 г. Конкретные технические характеристики установки на данный момент не сообщаются.

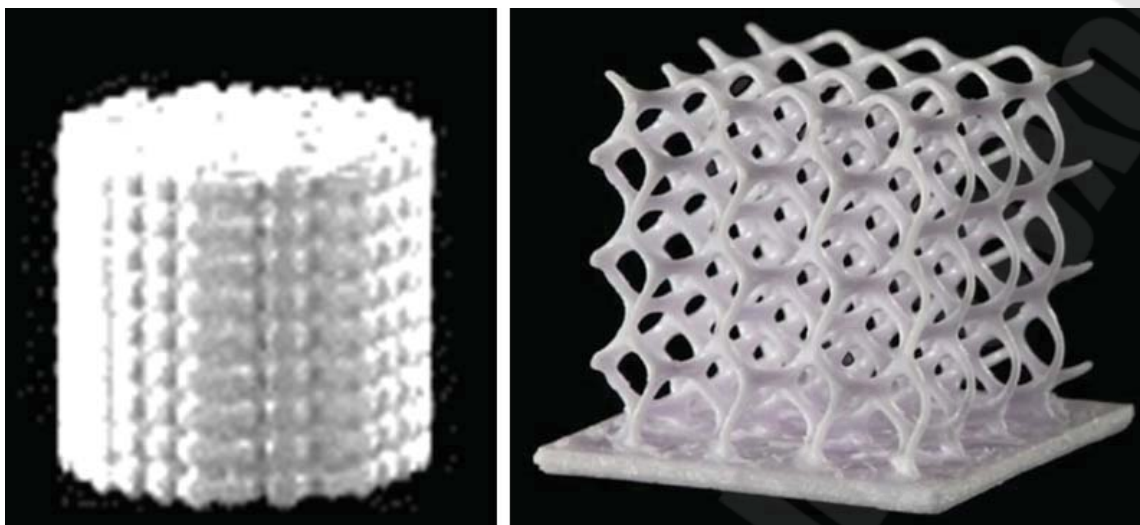


Рисунок 68 – Примеры изготовленных керамических изделий (компания Lithoz)

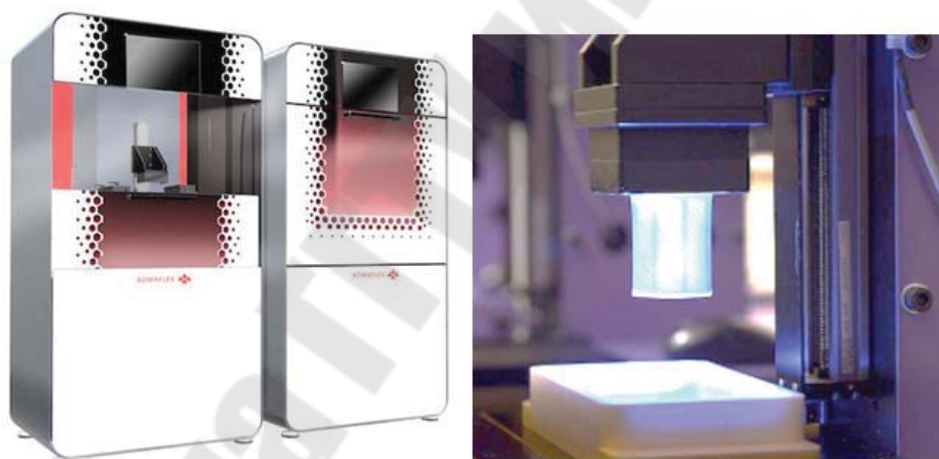


Рисунок 69 – 3D-принтер ADMAFLEX 130 компании Admatec

Компания ProdWays предлагает установку ProMaker V600 (рис. 70), работающую по технологии DLP с суспензией в качестве исходного материала. Данная установка может работать с высоковязкими материалами, в частности, с керамикой. Возможно получение изделий с высокой плотностью, достигающей 95–99 % от теоретической. Рабочая зона имеет размеры от 120x150x150 мм.

Компания 3D Systems в качестве исходного материала для своих установок, работающих по технологии стереолитографии, предлагает материал Accura CeraMax – фотополимер, упрочнённый керамическими частицами (рис. 71). Несмотря на то, что материал включает в себя керамические частицы, основная его часть состоит из полимерной составляющей, что сказывается на его свойствах.



Рисунок 70 – 3D-принтер ProMaker V600 компании ProdWays



Рисунок 71 – Изделия, изготовленные из материала Accura CeraMax 3D Systems

Установку, работающую по технологии изготовления объектов с использованием ламинирования (LOM), представила американская компания Ceralink Inc (рис. 72). Рабочая зона ограничена размерами около 12 см с возможностью увеличения зоны построения при заказе соответствующей опции у производителя. Толщина стенки изделия ограничивается 1 мм.



Рисунок 72 – 3D-принтер Ceralink CL-100, работающий по технологии LOM

Компания DeltaBots предлагает несколько 3D-принтеров, работающих по технологии Fused Deposition Modelling и использующих керамику, а именно глину, в качестве исходного материала. Принтеры имеют название 3D PotterBot и отличаются, прежде всего, используемыми экструдерами и размерами рабочей зоны (рис. 73).

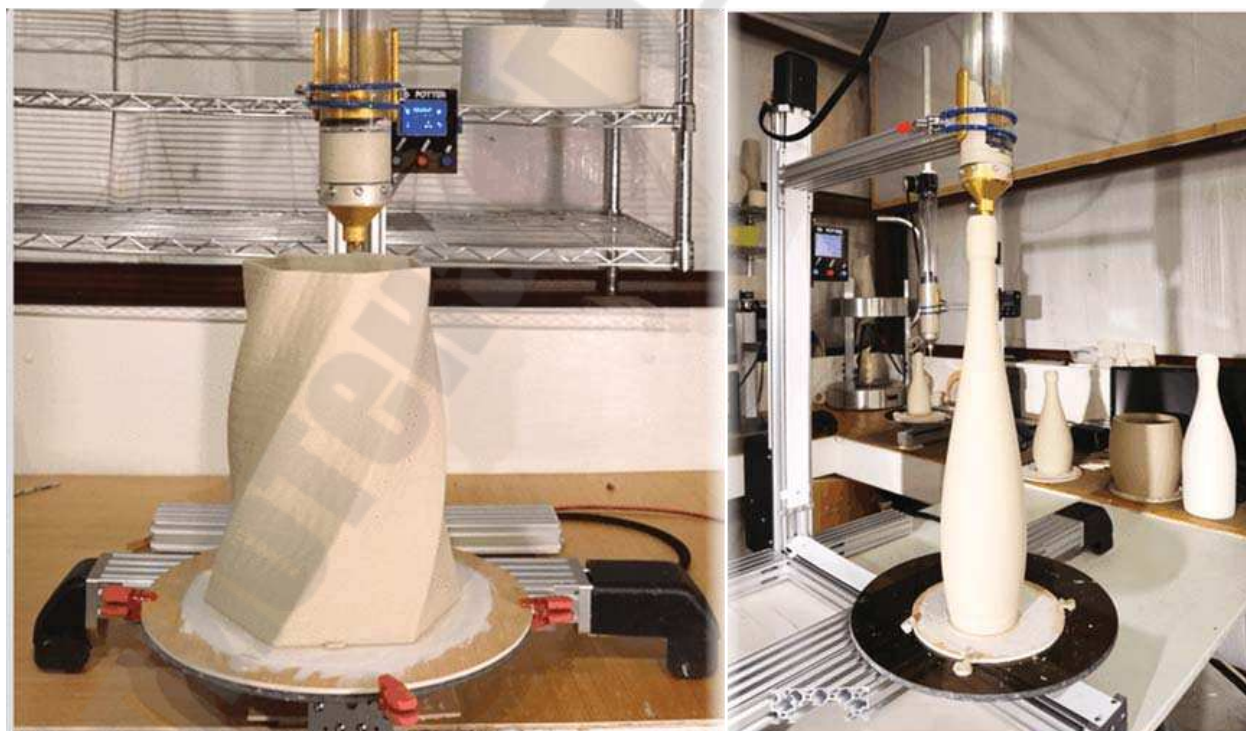


Рисунок 73 – 3D-принтеры 3D PotterBot компании DeltaBots

Аналогичные 3D-принтеры, работающие по технологии Fused Deposition Modelling, разработала компания VormVrij под маркой

LUTUM (рис. 74). Данные принтеры используют глину в качестве исходного материала.

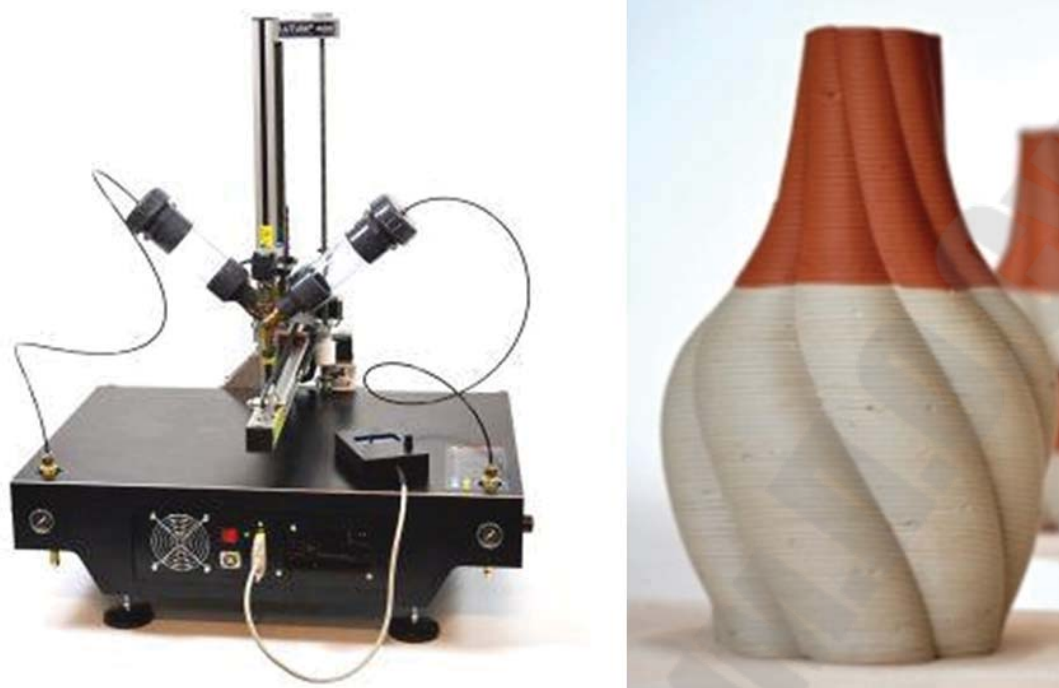


Рисунок 74 – 3D-принтер LUTUM и пример изделия из глины

Компания 3D Systems в 2014 г. представила принтер CeraJet для печати керамических изделий по технологии ColorJet Printing (CJP) (рис. 75, 76).



Рисунок 75 – 3D-принтер CeraJet компании 3D Systems



Рисунок 76 – Изделия, изготовленные на 3D-принтере CeraJet компании 3D Systems

Основными производителями оборудования, работающего по технологии Binder Jetting и использующего в качестве исходных материалов порошки, являются немецкая компания Voxeljet и американская компания ExOne.

Компания Voxeljet предлагает несколько 3D-принтеров, работающих по принципу Binder Jetting. 3D-принтеры главным образом отличаются размерами рабочей зоны. Наименьшие размеры области построения в линейке принтеров компании имеет установка VX200 с рабочей зоной 300x200x150 мм. Также имеются установки с размерами рабочей области 500x400x300 мм (VX500), 850x500x1500/2000 мм (VXC800), 1060x600x500 мм (VX1000), 2000x1000x1000 мм (VX2000) и 4000x2000x1000 мм (VX4000) (рис. 77).



Рисунок 77 – Рабочая зона построения 3D-принтера VX4000 компании Voxeljet

В качестве материалов для использования в своих установках компания Voxeljet предлагает песок либо полимер полиметилметакрилат (PMMA). В качестве связующего вещества при использовании песка применяется фенольная смола. Данные установки предлагается использовать для изготовления прототипов изделий и литейных форм.

Несмотря на то, что производитель не предлагает другие материалы для использования с 3D-принтерами Voxeljet, технология Binder Jetting позволяет применять и другие порошковые материалы. Кроме того, производитель при запросе может поставить своё оборудование с открытым программным обеспечением для проведения исследований по использованию других материалов.

Компания ExOne также предлагает ряд 3D-принтеров, работающих по технологии Binder Jetting. Оборудование компании подразделяется на три линейки: промышленные принтеры; принтеры для прототипирования; принтеры для исследований и образования.

Принтер ExOne M-Flex (рис. 78) имеет размеры рабочей области 400x250x250 мм и согласно данным производителя относится сразу ко всем трём линейкам оборудования.

Установки ExOne S-Print и M-Print (рис. 79) имеют рабочие области с размерами 800x500x400 мм. Первая предназначена для печати изделий из песка, вторая – для печати изделий из металлических порошков, обе относятся к линейке промышленных принтеров.

Наибольшими размерами рабочей зоны (2200x1200x700 мм с двумя камерами для построения) обладает принтер Exerial (рис. 76). Он предназначен для серийного производства сложных песчаных форм.

В качестве материалов для своих принтеров компания ExOne предлагает песок, нержавеющие стали марок 420 и 316L (с пропиткой бронзой), нержавеющую сталь марки 17-4, силикат циркония, хромит, Inconel 625, Inconel 718, железо / бронза, железо-хром-алюминий, кобальт-хром, вольфрам, карбид вольфрама. Возможно использование различных связующих веществ: фуран, силикат, фенольная смола, органическое связующее на водной основе. Существует возможность использования и других материалов, например, карбида кремния. В случае изготовления изделий из металлических порошков для устранения остаточной пористости производитель предлагает использовать пропитку заготовок расплавом бронзы. На рис. 79 представлены примеры изделий, полученных по технологии Binder Jetting с помощью принтеров ExOne.



Рисунок 78 – 3D-принтер ExOne M-Flex.



Рисунок 79 – 3D-принтер ExOne M-Print

Технологии селективного лазерного спекания / плавления редко используют для получения керамических изделий, что объясняется их склонностью к образованию трещин из-за термического влияния. Несмотря на это, компания Phenix (в 2013 г. была куплена компанией 3D Systems) в описании своих установок селективного лазерного плавления указала на возможность использования керамических материалов.

Имеются данные об использовании установки Phenix System PM100, снятой с производства, для получения керамических деталей турбинного двигателя (рис. 80). В новой информации о 3D-принтерах компании 3D Systems, работающих по технологии селективного лазерного плавления, данные о возможности использования керамики отсутствуют.



Рисунок 80 – 3D-принтер ExOne Exerial

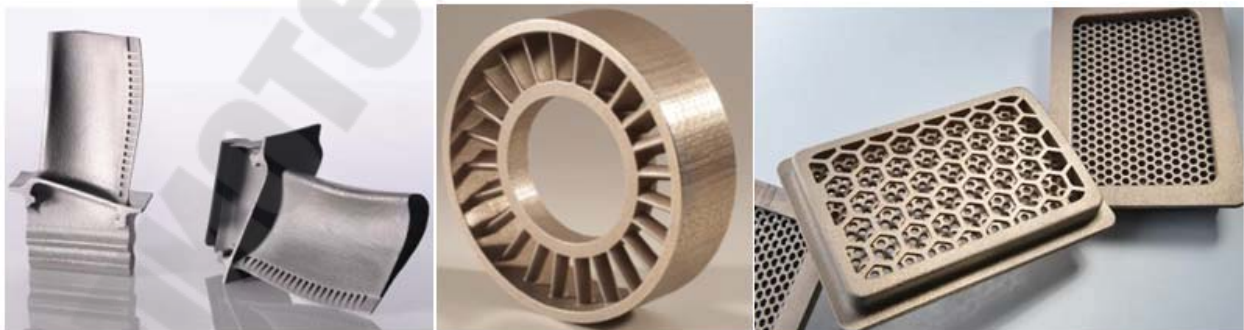


Рисунок 81 – Изделия, изготовленные с помощью принтеров компании ExOne



Рисунок 82 – Примеры керамических изделий, изготовленных с помощью принтера компании Phenix.

Получение керамических изделий с помощью аддитивных технологий связано с рядом трудностей и на данный момент не получило такого развития, как например, послойные технологии изготовления металлических деталей. В то же время использование керамики в ряде областей является перспективным с точки зрения повышения функциональных характеристик изделий и снижения их стоимости. В частности, карбид кремния и композиционные материалы на его основе обладают рядом преимуществ по сравнению с металлическими сплавами, и являются перспективными материалами для изготовления теплонагруженных деталей двигательных установок.

2.3. Композиционные материалы

Композиционные материалы имеют большие перспективы применения во многих отраслях промышленности, прежде всего в авиакосмической. Существенный интерес проявляется к созданию металломатричных композитов с помощью аддитивных.

Свойства композиционных материалов в основном зависят от физико-механических свойств компонентов и прочности связи между ними. Отличительной особенностью композиционных материалов является то, что в них проявляются достоинства компонентов, а не их недостатки. Вместе с тем композиционным материалам присущи свойства, которыми не обладают отдельно взятые компоненты, входящие в их состав. Для оптимизации свойств композиций выбирают компоненты с резко отличающимися, но дополняющими друг друга свойствами.

Композиционные материалы имеют ориентированную структуру и по своей природе являются гетерогенными. По структурным признакам композиционные материалы разделяют на волокнистые, слоистые и дисперсно-упрочненные композиционные материалы. Волокнистые композиции состоят из матрицы, содержащей упрочняющие одномерные элементы в форме волокон (проволоки) и нитевидных кристаллов. Слоистые композиты представляют собой набор чередующихся армирующих компонентов в виде листовых, пластинчатых и фольговых материалов, жёстко связанных между собой по всей поверхности. Дисперсно-упрочненные композиционные материалы содержат равномерно распределённые в объёме матрицы дисперсные нуль-мерные частицы, не взаимодействующие активно с матрицей и не растворяющиеся в ней.

Особенностью волокнистых композиционных материалов и подобных им слоистых композиционных материалов является возможность сочетания химически инертных по отношению одна к другой составляющих – матрицы и упрочнителей. Прочность волокнистых композиционных материалов определяется нагрузкой, которую выдерживают высокопрочные волокна, а матрица – лишь среда, передающая нагрузку на волокна посредством пластического деформирования. У волокнистых и слоистых композиционных материалов несущим элементом выступает армирующее волокно, проволока или фольга (фаза-упрочнитель), которые по своей природе имеют высокую прочность, весьма высокий модуль упругости и, как правило, сравнительно низкую плотность (табл. 17, 18). В волокнистых композициях матрица скрепляет волокна или другие упрочняющие элементы в единый монолит, защищая их от повреждений. Она является средой, передающей нагрузку на волокна, а в случае разрушения отдельных волокон перераспределяет напряжения. Кроме того, её механические свойства определяют характер поведения материала при сдвиге, сжатии и усталостном разрушении.

В дисперсно-упрочненных композиционных материалах основным элементом, несущим нагрузку, является матрица, в которой с помощью множества дисперсных практически не растворяющихся частиц и однородной дислокационной структуры создаётся эффективное торможение дислокаций. В этих композитах торможение движения дислокаций обеспечивается путём сложного легирования твёрдого раствора и создания оптимальных по размерам и распределению частиц вторых фаз. Структура дисперсно-упрочненных композиционных материалов термически стабильна вплоть до температуры начала плавления за счёт введения химически инертных некогерентных частиц окислов, нитридов, карбидов или других фаз – упрочнителей

оптимальных размеров, формы, распределения и объёмной доли. Дисперсно-упрочненные композиты специально предназначены для работы в условиях длительного воздействия высоких температур.

Таблица 17

Механические свойства некоторых металлических волокон

Материал волокон	Плотность, ρ , г/см ³	Диаметр, мкм	Модуль упругости E, ГПа	Средняя прочность* σ , ГПа
Бериллий	1,85	130	310	1,1
Сталь ВНС-9 (18Х15Н5АМ3)	7,8	100–300	200	3,5–3,8
Вольфрам	19,3	50	410	3,3
Молибден + 5 % V	–	250	334	1,8–2,0

* Здесь и далее средняя прочность определена для волокон длиной 10 мм.

Структура, взаимодействие компонентов и свойства композиционных материалов в значительной степени зависят от методов их изготовления.

Выбор технологического метода определяется в основном следующими факторами:

- видом исходных материалов матрицы и упрочнителя;
- возможностью введения упрочнителя в матрицу без повреждения его, создания прочной связи на границе раздела упрочнитель – матрица и максимальной реализации в материале свойств матрицы и упрочнителя, получения необходимого распределения упрочнителя в матрице, совмещения процессов получения материала и изготовления из него детали;
- экономичностью процесса.

Технологии изготовления дисперсно-упрочненных композитов. Для введения в матрицу частиц окислов или других упрочнителей используют методы порошковой металлургии, а также методы непосредственного введения наполнителей в жидкий металл или сплав перед разливкой. В последнем случае для очистки от жировых и других загрязнений, улучшения смачиваемости частиц жидким металлом и равномерного распределения их в матрице применяют ультразвуковую обработку жидкого расплава. Разработаны и другие способы введения дисперсных наполнителей в матричный расплав: механическое перемешивание, подача в струе газа; расплавление гранул из смеси порошков основного металла и

наполнителя, введение в расплав капсул или таблеток со смесью наполнителя и легкоплавкого флюса; образование частиц мелкодисперсной фазы в металлическом расплаве в результате реакции в процессе плавки.

Таблица 18

Свойства волокон и нитевидных кристаллов

Материал	$t_{пл.},$ °C	$\rho,$ г/см ³	$\sigma_B,$ МПа	Удельная прочность, км	E, ГПа	Диаметр волокна, мкм
Волокна						
Углерод или графит	3650	1,6–2	1687–3374	110–210	216–677	5,8–7,6
Бор на вольфрамовой проволоке	2300	2,63	2707–4060	110–160	373–402	102–142
Борсик на вольфрамовой проволоке	2300	2,77	2707–4060	100–160	373–412	104
Оксид алюминия	2040	3,14	2030	66	169	3
Бериллий	1284	1,85	686–981	38–54	295	125–1500
Вольфрам	3410	19,3	1657–3207	9–17	420	51–1270
Нитевидные монокристаллы						
Карбид кремния	–	3,22	13533 – 40600	440–1320	441–1010	0,51–11
Сапфир, Al ₂ O ₃	–	3,96	4021–23634	110–620	402–1010	0,51–11

В основе эффективности метода порошковой металлургии лежит качество смешения порошков. Тонкие металлические порошки матрицы в смесителях или шаровых мельницах смешивают со сверхтонкими порошками упрочняющей фазы. Однородность смешения тем ниже, чем больше различие в насыпных весах порошков. Ограничения этих процессов обусловлены комкованием дисперсных частиц при смешении, обычно не удаётся достичь однородного распределения размеров частиц.

Дисперсно-упрочненные композиционные материалы на алюминиевой основе, нашедшие широкое промышленное применение, в

основном получают методами порошковой металлургии. Так, например, САП – путём последовательного брикетирования, спекания и прессования окисленной с поверхности алюминиевой пудры. Исходным материалом для сплавов САП служит порошок, который изготавливают распылением расплавленного алюминия. Спечённые алюминиевые сплавы (САС) изготавливают в основном по той же технологии, что и САП – из порошков, полученных распылением сплавов заданных составов.

Другой путь введения упрочняющих окислов – внутреннее окисление. Сущность метода заключается в том, что при изотермическом отжиге порошков из низколегированного твёрдого раствора в контролируемой окислительной атмосфере, окисляться будет преимущественно тот компонент, сродство которого к кислороду больше. Металлическими матрицами в этом способе могут служить такие сравнительно легко восстанавливаемые металлы, как серебро, медь, никель и железо.

Основные трудности этого метода, позволяющего получать равномерное распределение упрочняющей фазы с хорошей дисперсностью, связаны с получением мелкозернистого порошка малолегированных, а поэтому пластичных твёрдых растворов.

Для получения дисперсно-упрочненных сплавов на основе никеля наилучшими оказались химико-металлургические методы, обеспечивающие смешение компонентов на уровне, близком к молекулярному. Сами процессы в технологическом отношении достаточно просты и позволяют использовать обычное химическое и металлургическое оборудование. Сплавы получают путём осаждения из водных растворов солей, при активном перемешивании которых образуется гидроокисная карбонатная пульпа. После фильтрации производится сушка, затем при 400–450°C разложение солей и удаление летучих составляющих, в результате последующего прокаливания при 800–900°C в камерной печи получают тонкую равномерную смесь окислов никеля и упрочнителя в виде окислов тория, гафния, иттрия и других.

Затем следует селективное восстановление окислов никеля (матрицы) до металла в водородной атмосфере и брикетирование заготовок. Заготовки проходят стадию спекания и экструзию при 1000–1050 °С. Прочностные характеристики дисперсно-упрочненных сплавов на основе никеля формируются при последующей деформации экструдированных заготовок в сочетании с высокотемпературным отжигом.

Заключительная деформационно-термическая обработка позволяет получить в результате полигонизации очень стабильную субструктуру,

причём стабильные субзёрненные границы формируются преимущественно на частицах диаметром более 50 нм. Располагаясь в стыках субграниц, эти частицы стабилизируют субструктуру вплоть до предплавильных температур.

Метод механического легирования, применимый к любым материалам матриц и упрочнителей, отличается иным подходом к измельчению и смешению порошков. Метод смешения порошков позволяет получить средний состав композиции в макроскопических объёмах навески шихты, механическое легирование обеспечивает средний состав композиции в объёме каждой порошинки. Идея метода была заимствована из технологии лакокрасочного производства. Для измельчения и смешения порошков металлов и упрочнителей применили схему атритора, используемого для растирания красок.

При механическом легировании большое значение имеют тип и технические характеристики (в первую очередь энергонапряжённость) того агрегата, в котором проводится обработка порошковой смеси. В последнее время наряду с атриторами для механического легирования используют более энергонапряжённые мельницы планетарного типа. В планетарных мельницах в результате высокоэнергетического воздействия ускоряются (более чем в 10 раз) все структурные изменения, необходимые для получения качественного материала. Также можно использовать энергонапряжённые мельницы планетарного типа для получения композитов крупных матричных частиц, включая отходы механической обработки, например, алюминия и его сплавов, что позволяет расширить сырьевую базу и несколько снизить стоимость композиционного материала данного класса.

Получение композиционных материалов по порошковой технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) основано на проведении экзотермических реакций химического взаимодействия между компонентами исходной порошковой смеси, приводящих к синтезу тугоплавких соединений. Синтез сопровождается высокими температурами (1800–3000 °С) и наблюдается как послойное горение со скоростью распространения фронта реакции по смеси 0,1–15 см/с, или объёмное одновременное сгорание всей смеси (соответственно послойный и объёмный СВС). Для спекания порошковых металлических материалов порошковую прессованную заготовку нагревают в электропечи до температуры воспламенения. Этот этап обработки называют периодом нагрева. Затем наступает период горения, в процессе которого происходят экзотермические реакции взаимодействия металлических компонентов при значительном выделении тепла. Развивающиеся при этом температуры достаточны для консолидации порошковых материалов, поэтому электропечь

отключают. При последующем периоде догорания происходят процессы кристаллизации материала. Короткий период процесса и возможность синтезировать компоненты в одну стадию позволяют существенно повысить производительность изготовления композиционных материалов по сравнению с промышленными технологиями. К другим достоинствам технологии СВС относятся:

- обеспечение термодинамической устойчивости композитов за счёт большого тепловыделения при СВС;
- обеспечение плотного контакта и хорошей связи (адгезии) между фазами, т. к. здесь новые фазы образуются непосредственно внутри композита, имеют свежие поверхности, не контактируют с атмосферой и не содержат газов;
- предотвращение химической деградации тонких керамических частиц, образуемых при СВС;
- предотвращение нежелательного роста зёрен, т. к. СВС-процесс протекает быстро;
- обеспечение широкого диапазона состава композиционных материалов.

Традиционные промышленные способы получения композиционных сплавов на алюминиевой матрице включают, как минимум, две стадии: синтез порошковых упрочняющих фаз и механическое введение в расплав алюминия тонкодисперсных порошков упрочняющих фаз. Для повышения смачиваемости частиц расплавом алюминия синтезированные порошки подвергают промежуточной операции химического или электрохимического плакирования никелем или медью, и ввод порошков осуществляют при повышенных (1200–1300 °С) температурах жидкого Al. Эти традиционные способы весьма сложны в технологическом отношении и дорогостоящи с точки зрения энергетики.

Близок к СВС-процессу САМ-процесс – получение литых композиционных материалов синтезом эндогенных армирующих материалов в жидкой матрице. САМ-процесс обеспечивает непрерывный и плотный контакт фаз и достаточно прочную связь между ними в литом композиционном материале. Сущность технологии в том, что дисперсные частицы армирующей фазы не вводят в расплав извне, а синтезируют в нём за счёт экзотермических химических реакций между предварительно введёнными компонентами. САМ – процессом можно получить, например, в расплавах алюминия дисперсные частицы тугоплавких карбидов, оксидов, нитридов, интерметаллидов. Дисперсность полученных частиц регулируется в широких пределах (0,1–20 мкм) изменением технологических

параметров процесса.

Исходные материалы для САМ-процесса вводят в расплав замешиванием порошков различной дисперсности (20 мкм в диаметре). Обычно, чем крупнее частицы, тем легче они замешиваются в расплав. Полученная твёрдо-жидкая смесь называется премиксом и является полуфабрикатом для САМ-процесса. Премиксы получают при нагреве сплавов алюминия до 700–800°C, при которых указанные вещества не реагируют друг с другом.

Премиксы можно рафинировать, дегазировать, получать слитки и фасонные заготовки, обрабатывать давлением в твёрдом и жидком состоянии. Для начала (запуска) САМ-процесса нужен общий или локальный разогрев премикса до температур выше 1100–1300 °С. Запуск САМ-процесса проводится непосредственно в литейной форме, применением локального разогрева, например, дугой от сварочного аппарата. Начальная температура премикса должна быть 600–700 °С, когда премикс находится в твёрдо-жидком состоянии. Поскольку реакции образования тугоплавких соединений – экзотермические, то САМ-процесс после запуска обеспечивает распространение реакции синтеза на весь объём премикса. Для непрерывного поддержания реакции необходимо достаточное количество теплоты.

В САМ-процессе армирующие частицы образуются внутри расплава, не контактируют с атмосферой, не содержат газов. Контакт частиц с расплавом плотный и непрерывный, а поверхностные связи с матрицей обладают максимально возможной для данной системы прочностью. Получаемые литые композиты термомеханически устойчивы, их свойства и структура сохраняются при переплавах и в процессе эксплуатации изделий.

Способы жидкофазной технологии отличаются универсальностью, возможностью достаточно тонко регулировать параметры технологического процесса и высокой производительностью. Интенсификация процессов течения расплавов по поверхности наполнителя и взаимодействия достигается дополнительным механическим воздействием, например, использованием композиционного литья. Этот способ заключается в ведении порошковых частиц в матричный расплав при энергичном перемешивании.

Установка для композиционного литья включает тигель с матричным расплавом, установленный в печи сопротивления и снабжённый донным стопором (рис. 83). Температура в печи и в расплаве контролируется термopарами. Армирующие дисперсные частицы вводят в тигель засыпкой сверху при вращающемся импеллере (impeller – лопастное крыло, крыльчатка).

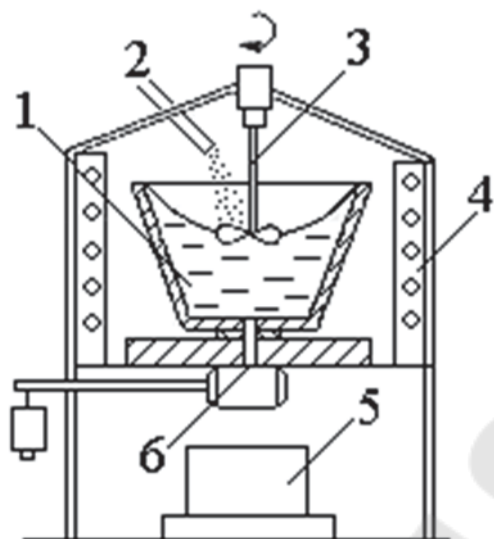


Рисунок 83 – Схема установки для композиционного литья:
 1 – тигель с расплавом; 2 – подача порошка; 3 – импеллер, 4 – печь;
 5 – литейная форма; 6 – стопор

Перемешивание продолжают до начала адгезионного взаимодействия в системе матрица – наполнитель. После подготовки жидкометаллической суспензии открывают донное отверстие и заливают суспензию в форму. На качество композиционного материала влияют скорость вращения импеллера, отношение диаметра импеллера к диаметру тигля и высота расположения импеллера над дном тигля. Конструкция установки усложняется, если вводимые частицы необходимо защищать от окисления. В этом случае шток импеллера делают полым и размещают в нём требуемое количество порошка, который не только прогревается до заданной температуры в замкнутом объеме, но и вводится под зеркало расплава. Подобная конструкция ротора предотвращает замешивание воздуха в расплав.

Кроме композиционного литья используют и другие способы введения наполнителей в расплав. Вихревой метод заключается в перемешивании расплава таким образом, чтобы в нём возникли вихревые зоны, в которые и вводят армирующие частицы. Поскольку скорости перемешивания в этом случае меньше, чем при композиционном литье, то количество вводимого порошка уменьшается. Если же использовать порошки с металлическими покрытиями, например, графитный порошок с никелевым покрытием, то количество вводимого порошка можно увеличить. Литые заготовки из подобных композиционных материалов изготавливают заливкой в кокиль или литьём под давлением.

Установка для введения наполнителя в расплав инъекционным методом состоит из плавильной печи, расположенного в ней тигля с донным стопором, форсунки для распыления потока, питателя для

дозированной подачи армирующих частиц и литейной формы (рис. 84). После достижения требуемой температуры стопор поднимается, и расплав начинает вытекать из тигля; газовым потоком из форсунки струя расплава дробится на капли, а под воздействием давления газа частицы, поступающие из питателя, внедряются в распылённый состав. Усвоение частиц улучшается при легировании, например, алюминиевых матриц кальцием (около 2 %), медных – титаном (0,5 %). Капли расплава попадают либо в форму, где образуется слиток из композиционного материала, либо на движущуюся подложку с образованием ленты-полуфабриката. Заготовки из таких композитов могут переплавляться, а полученный расплав – заливаться обычными литейными методами без ухудшения их физико-механических свойств.

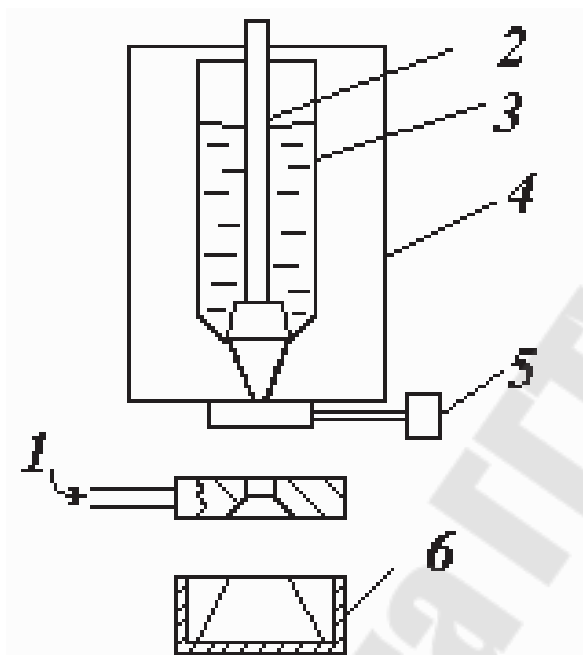


Рисунок 84 – Схема установки для инъекционного введения частиц в матричный расплав:

- 1 – распыляющее устройство;
- 2 – стопор; 3 – тигель с расплавом; 4 – печь; 5 – питатель для армирующего порошка;
- 6 – форма

Наиболее существенным недостатком различных методов замешивания армирующих частиц в матрицу является отсутствие плотного контакта фаз и возможность выкрашивания армирующих частиц из матрицы. Для устранения этих недостатков применяют адаптацию – процесс плавного предварительного приспособления частиц к условиям, ожидающим их в процессе совмещения с жидким металлом. Адаптация может быть термической или физико-химической. Термическая заключается в медленном нагреве армирующей фазы до температуры расплава перед её вводом в расплав. При физико-химической адаптации порошки металла и армирующих фаз длительно смешиваются в вибромельницах, при этом поверхность более твёрдых частиц армирующих фаз частично покрывается слоем более мягкого металла.

Применение более сложных и тонких способов получения литых композитов позволяет эффективно использовать композиционные материалы для получения деталей с улучшенными эксплуатационными свойствами и для модифицирования сплавов, в частности алюминиевых.

Некоторые литые дисперсно-упрочненные композиционные материалы изменяют свои свойства при обработке давлением и термообработке. Обработка давлением повышает плотность литых композиционных материалов, а также улучшает сцепление армирующих частиц с матрицей. Термообработка, применённая после обработки давлением, оказывает заметное влияние на свойства литых композитов и позволяет в ряде случаев повысить прочность ещё на 10–20 %. В необработанном, насыщенном порами композите влияние термообработки почти полностью нейтрализуется отрицательным влиянием пористости.

При выборе способа изготовления необходимо помнить, что основной вклад в ценообразование композиционных материалов вносит используемая технология их синтеза.

Значительное повышение свойств материалов, полученных посредством аддитивных технологий, может быть достигнуто при переходе от металлов и сплавов к соответствующим металломатричным композитам с использованием в качестве упрочняющей фазы микрочастиц и особенно наночастиц тугоплавких соединений. С применением аддитивных технологий получены композиты Fe/SiC, Al/Fe₂O₃, Al-Si-Mg/SiC, Al₅₀Ti₄₀Si₁₀, WC/Co, Ti₅Si₃/TiN, Ti-Al/TiC, W-Ni-Cu, сталь 316L/TiC(TiB₂), Al-4.5Cu-3Mg/SiC.

В качестве исходных материалов в экспериментах используются смеси индивидуальных компонентов композитов, подвергнутые гомогенизации (перемешиванию) механообработкой преимущественно в планетарных мельницах. Условия этой обработки таковы, что в случае использования наноразмерной упрочняющей фазы достигается лишь её перенос на поверхность металлических частиц матрицы без внедрения наночастиц в объём металла.

Важная область исследований связана с применением технологий АП для изготовления металлокерамических композиционных материалов с металлической матрицей (ММС – metal-matrix composite), например вольфрам-карбидного композита (Co-WC ММС). Плотность ММС, изготовленных с помощью АП-технологий, в значительной степени зависит от повышенного содержания газов, агломерации частиц и микротрещин, развивающихся по границам между включениями и матрицей.

Металломатричные композиты с титановой матрицей, усиленные керамическими частицами (TiB, SiC, Al₂O₃ и B₄C) имеют улучшенные

параметры сопротивления износу и растяжению. Так, например, небольшое количество включения TiB значительно повышает модуль упругости. От морфологии включений, упрочняющих матрицу, зависят такие свойства как сопротивление износу и предел прочности при растяжении, поэтому уменьшение размера и формы включений должно дать положительный эффект. Увеличение объёмной доли TiB в титановой матрице и выбор более мелких частиц (45 мкм вместо 100 мкм) значительно увеличивает твёрдость по Виккерсу и предел прочности при растяжении.

Технологии изготовления волокнистых композиционных материалов. Для получения волокнистых композиционных материалов с требуемым комплексом свойств необходимо:

- легирование матрицы для уменьшения взаимодействия и растворимости в ней армирующих волокон;
- создание барьерных слоёв на волокнах для предотвращения взаимодействия их с матрицей;
- разработка низкотемпературных и скоростных методов изготовления деталей из композиционных материалов, при которых отмечается требуемый уровень взаимодействия, обеспечивающий достижение расчётного значения свойств;
- использование схем армирования, позволяющих с максимальной эффективностью реализовать в композиционном материале потенциальные свойства волокон;
- создание методов расчёта, которые позволяли бы прогнозировать составы матриц и упрочнителей, обеспечивающих сохранение заданного уровня свойств при длительной эксплуатации.

Существует большое разнообразие методов получения композиционных материалов, выбор которых определяется не только свойствами, которые должен иметь материал, но и задачами получения геометрии детали. Любой метод получения волокнистых композиционных материалов должен обеспечить:

- введение в матрицу упрочняющей арматуры без её разрушения;
- возможность введения значительной объёмной доли упрочняющих волокон;
- равномерность распределения волокон;
- отсутствие изменений свойств волокон и матрицы при проведении технологических операций;
- достижение необходимой прочности связи волокно-матрица;
- получение изделия заданной формы.

- Условно методы получения волокнистых композиционных материалов можно разделить на две группы:
- традиционные способы обработки материалов с целью получения структуры композиционных материалов;
- совместная переработка полученных отдельно волокон и матриц с оформлением геометрии детали.

Методы получение упрочняющих волокон. Непрерывные волокна подразделяют на волокна пластичные металлические и волокна хрупкие неметаллические. Пластичные металлические волокна из металлов и их сплавов получают традиционными методами металлургического производства, включающими экструзию, волочение, прокатку, прессование и др. Наиболее распространённым из них является волочение, т. е. деформирование металла протягиванием катаных или прессованных заготовок через фильеру меньшего сечения. Методы получения непрерывных волокон из неметаллических материалов разделяют на две группы: разложение органических волокон и осаждение из газовой фазы.

Технологические процессы получения композиционных материалов. Полученные отдельно волокна и матрица подвергаются совместной переработке с целью оформления геометрии детали. Метод совместной переработки – сборка композиционных материалов из волокна и матрицы, в сущности, включает две составляющие:

- переработку волокна с получением промежуточных заготовок, например монослоев;
- собственно «сборку» – изготовление компактного композиционного материала в форме детали.

В подавляющем большинстве технологий волокна наполнителя пропитывают связующим составом, погружая на несколько секунд армирующее волокно в жидкое связующее. Иногда связующий материал наносят кистью или распылителем на заранее уложенный слой наполнителя. Скорость пропитки существенно зависит от физических свойств наполнителя и связующего, от структуры армирующего волокна и технологического режима пропитки. Наибольшее влияние на скорость пропитки оказывают силы поверхностного смачивания волокон и капиллярного подъёма связующего в порах, а также структура наполнителя, характеризуемая пространственным расположением волокон, нитей, жгутов.

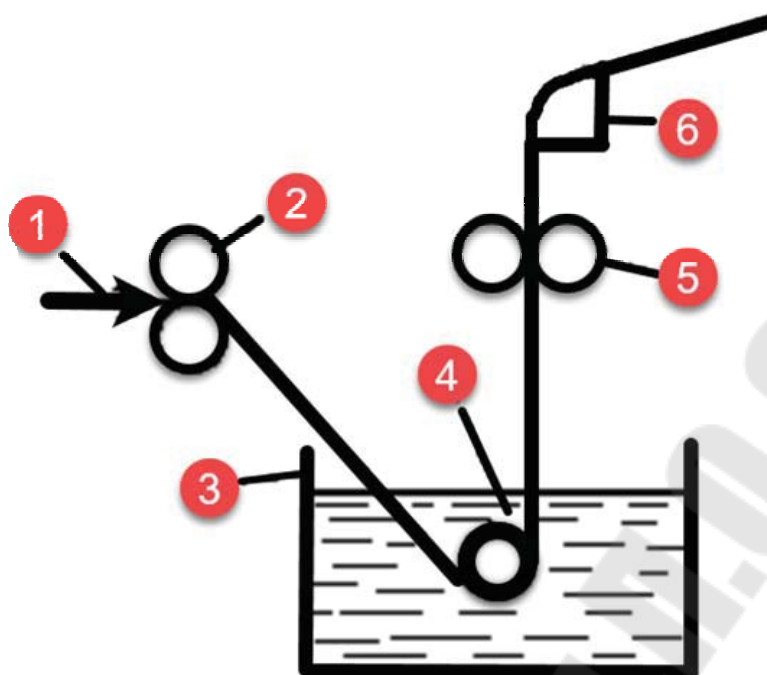


Рисунок 85 – Схема пропитки наполнителя связующим составом:
 1 – наполнитель; 2 – тормозное устройство; 3 – пропиточная ванна;
 4 – связующее; 5 – отжимные валки; 6 – формирующее устройство.

Различают два способа производства изделий: «мокрый», при котором наполнитель пропитывают непосредственно перед отверждением и формованием, и «сухой». При «сухом» способе осуществляют пропитку наполнителя и одновременно частичное отверждение связующего. Получаемый полуфабрикат (препрег) сохраняет способность к окончательному отверждению в течение нескольких суток.

Вторая стадия получения компактного композиционного материала – собственно «сборка» композитов обычно включает нагрев и деформацию пакета монослоев. Для этой цели используют методы твердофазного и жидкофазного совмещения, порошковой металлургии, газофазные, химические и электрохимические процессы. Каждый из этих методов имеет свои достоинства и недостатки, выбор любого из них зависит от геометрии изделия, физико-химических и механических свойств волокон и матрицы.

Методы твердофазной технологии, включающие операции выкладки пакета из чередующихся слоёв волокон и матричного сплава (или из волокон с покрытиями из матричного сплава) и горячего компактирования пакета прессованием (рис. 86), прокаткой и т. п., используются обычно для изготовления композиционных материалов с наполнителями в виде моноволокон большого диаметра (борных, стальных и т. п.). Методы порошковой металлургии обычно используют

для изготовления композиционных материалов с наполнителями из нитевидных кристаллов или коротких волокон.

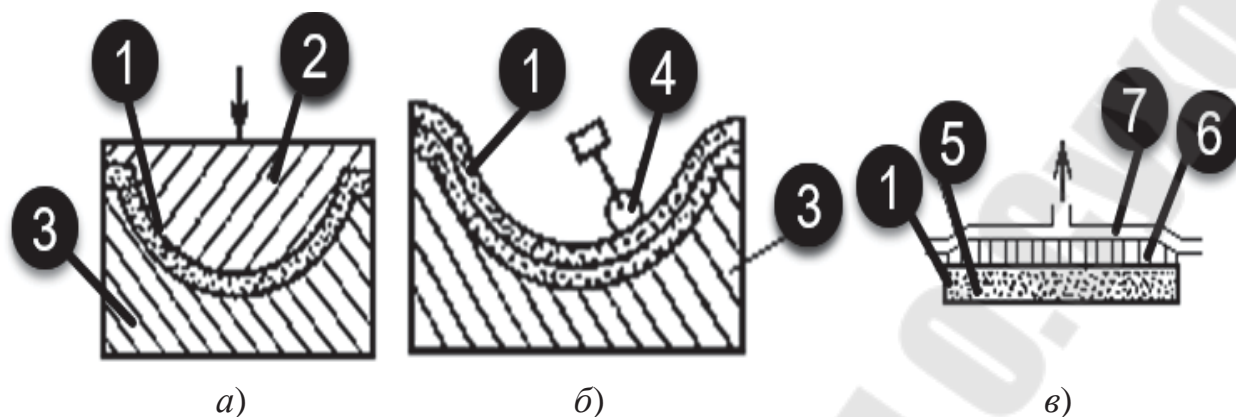


Рисунок 83 – Схема формирования изделий:

а – прессованием, б – контактным формованием; в-вакуумированием:

1 – волокнистый наполнитель; 2 – пуансон; 3 – матрица;

4 – уплотняющий валок; 5 – подогреваемая форма;

6 – пористый материал; 7 – полимерная плёнка

Методы жидкофазной технологии наиболее универсальны и позволяют применять наполнители любого типа. Главным препятствием широкого распространения методов жидкофазной технологии является опасение неконтролируемого, чрезмерного взаимодействия компонентов из-за высокой активности металлических расплавов.

Процессы, относящиеся к газофазной и парофазной, а также химической и электрохимической группам, используются главным образом для нанесения технологических покрытий на волокна.

При изготовлении композиционного материала любым способом, в том числе используя жидкофазные технологические процессы, необходимо создать физический контакт компонентов по всей поверхности раздела и осуществить физико-химическое взаимодействие компонентов при минимальном ухудшении свойств матрицы и наполнителя. Если в системе наполнитель – матрица имеет место смачивание, т. е. силы взаимодействия между частицами жидкости меньше, чем между частицами жидкости и твёрдого тела, то под действием адгезионных связей расплав распространяется по поверхности раздела (самопроизвольное пропитывание). Если смачивание в системе отсутствует, то установление физического контакта компонентов (пропитывание) возможно лишь при приложении внешних воздействий, например, давления, в результате чего осуществляется гидродинамический режим пропитывания и инициируется протекание физико-химических процессов на границе раздела (принудительное пропитывание).

Типичными методами пропитки матричным расплавом капиллярно-пористых тел, образованных конгломератом частиц наполнителя, являются методы компрессионного литья и компрессионной пропитки.

Специфика метода компрессионного литья выражается в подаче на расплав довольно высокого давления (до 100 МПа) и поддержание этих условий до полного затвердевания отливки. Метод характеризуется приложением высоких давлений пропитки, прекращением подвода тепла к форме после подачи давления и осуществлением затвердевания матрицы в этих условиях, использованием плунжера в качестве рабочего тела для подачи давления.

Метод компрессионной пропитки отличается от метода компрессионного литья тем, что пропитка и небольшая последующая выдержка производятся, как правило, в изотермических условиях. Затвердевание осуществляется обычно после снятия давления, рабочее давление сжатого газа не превышает 100 атм. Методы компрессионной пропитки используют для изготовления волокнистых высококачественных композиционных материалов, требующих жёсткой фиксации параметров технологических режимов.

Использование традиционных способов – это управление структурой в традиционных процессах обработки давлением и фазовых превращений (направленное эвтектоидное превращение, направленная эвтектическая кристаллизация и создание волокнистых структур деформированием двухфазных систем). Эти методы основаны на том, что игольчатые или пластинчатые кристаллы в сплавах, выделенные из них химическим путём, проявляют механические свойства нитевидных кристаллов, т. е. имеют прочность, близкую к теоретической. Преимущество такого подхода в совмещении операций получения волокон с операциями получения композиционных материалов. Недостаток – ограниченные в ряде случаев возможности регулирования объёмной доли упрочнителя, малая производительность, трудности получения правильной геометрии волокон.

Волокнистые структуры, называемые композиционными материалами на основе направленно закристаллизованных эвтектик, получают направленной эвтектической кристаллизацией. При выборе эвтектических композиционных материалов вначале определяется матричная основа, удовлетворяющая условиям эксплуатации по температуре плавления, плотности, взаимодействия с активными газами воздуха. Затем устанавливаются эвтектики, обеспечивающие прочность (для этого необходимо хорошее сцепление упрочняющей фазы с матрицей) и физические свойства композиционных материалов. Направленная волокнистая структура эвтектик получается при

медленном вытягивании тигля из горячей зоны печи с такой скоростью, чтобы фронт кристаллизации оставался плоским. Такую же структуру можно получить, подбирая условия зонной плавки. На прочность эвтектических композиционных материалов влияет скорость кристаллизации эвтектического состава.

Стабильность структуры эвтектических композиционных материалов обеспечивается равновесием матричной и упрочняющей фазы в соответствии с диаграммой состояния, поэтому такие композиционные материалы могут работать при высоких гомологических температурах. Потеря жаропрочности этих композиционных материалов связана со сфероидизацией волокон.

Кроме повышенной прочности, жаропрочности и циклической прочности, направленно закристаллизованные эвтектики могут иметь ценные физические свойства. Например, в эвтектике Fe-FeS, содержащей 9 об. % волокон железа, можно получить коэрцитивную силу более высокую, чем у чистого железа, т. к. ориентированные ферромагнитные волокна, имеющие диаметр около 1 мкм, образуют направленную однодоменную структуру.

Эвтектические композиционные материалы с направленной структурой на основе легированной системы Nb-Si рассматриваются в качестве перспективных высокотемпературных материалов, способных заменить монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов при производстве лопаток и других деталей перспективных газотурбинных двигателей (ГТД) с рабочей температурой до 1350 °С.

Получают естественные композиты на основе системы Nb-Si методом направленной кристаллизации. Основными фазами композита системы Nb-Si являются силицид ниобия Nb_5Si_3 с гексагональной решёткой и твёрдый раствор ниобия с ОЦК решёткой. Параметры элементарной ячейки основных фаз постоянны по всей высоте слитка за исключением верхнего торца, что связано с изменением химического состава остаточного расплава. В процессе направленной кристаллизации по высоте слитка доля армирующей фазы силицида ниобия увеличивается с 71 до 76 % (по массе), а доля твёрдого раствора ниобия уменьшается соответственно с 29 до 24 % (по массе). Возрастание количества силицида ниобия до 88 % (по массе) в верхней части образца связано с недостаточным количеством матрицы ниобия в остаточном расплаве.

Высокие температуры плавления Nb-Si высокотемпературных жаропрочных материалов на основе естественных композитов могут обеспечить повышение рабочих температур до 1350°C, а пониженная плотность (6,2–7,6 г/см³) снизить на 20 % массу ротора перспективных ГТД (по сравнению с существующими).

Первые патенты составов высокотемпературных композитов на основе ниобий-кремния предложены разработчиками США (US 5741376 – The United States of America as represented by the Secretary of the Air Force, US 5833773, US 5932033, US 5942055, US 6409848 – General Electric Company). Это сплавы системы Nb-Ti-Cr-Al-Si с композиционной структурой после направленной кристаллизации, содержащие помимо матрицы (твёрдого раствора Nb-Si) одну или более фаз на основе Nb₅Si₃ или Nb₃Si, а также фазу Лавеса типа Cr₂(Nb, Ti, Cr) и дополнительно легированные Hf. Сплавы имели хорошую высокотемпературную прочность и ползучесть.

Дальнейшие исследования показали, что путём дополнительного легирования Ta, W, Mo, Ge, Fe, Al и Sn можно улучшить служебные характеристики сплавов: сопротивление ползучести, стойкость к окислению. Улучшение свойств получено также вследствие дополнительного легирования рением и металлами платиновой группы.

Аналогичные работы велись по созданию композиционных сплавов на основе ниобий-кремния исследователями в Японии (JP 2001–226734, JP 2003–306736, JP 2004–232013 – Chokoon Zairyo Kenkyusho), в частности для легирования дополнительно использовали до 1 % ат. элементов из группы Al, Pd, Re, Os, Yr, Pt (JP 2013–028834 – UNIV HOKKAIDO).

На сегодняшний день в области технологий выплавки и направленной кристаллизации, обеспечивающих формирование естественно-композиционной структуры в сплавах на основе ниобий-кремния для деталей ГТД, выявлены следующие тенденции:

- *повышение уровня жаропрочных свойств* композиционного материала системы Nb-Si за счёт введения легирующих добавок (Hf, Cr, Al, Zr, Fe, Sn, Cz, Mo, Ta, W, V, Ge, Zn) и металлов платиновой группы (Rn, Os, Yr, Pt, Ru, Pd);
- совершенствование технологии направленной кристаллизации композитов системы Nb-Si путём применения:
- плавки и процесса направленной кристаллизации в «холодном тигле» из медных сегментов с водяным охлаждением;
- метода «зонной плавки» в вертикальном положении заготовки с нагревом лазером и дополнительным охлаждением в жидкометаллическом охладителе, а также с индукционным нагревом и охлаждением в жидкометаллическом охладителе;

- создание нового способа получения высокоогнеупорных оболочковых керамических форм и керамических стержней на основе тугоплавких оксидов и специально созданных связующих путём использования:
- новых составов на основе тугоплавких оксидов и силикатов редких металлов, наносимых на восковую модель в виде чередующихся слоёв;
- коллоидного кремния и неорганики в качестве связующего;
- прокалики при высокой температуре до 1500–1600 °С;
- создание технологии литья лопаток в оболочковых многослойных керамических формах в условиях высокотемпературной направленной кристаллизации с использованием жидкометаллического охладителя (Li, Na, Mg, Al, Ga, Cd, Yn, Sn);
- упрощение технологии получения лопаток при использовании метода пайки, в том числе лазерной – для соединения частей лопатки, выполненных из сплава ниобий-кремний;
- повышение стойкости к окислению изделий из композитов системы Nb-Si при:
 - введении в сплав Al (в качестве легирующей добавки), образующего интерметаллидные фазы, содержащие алюминий;
 - введении в сплав легирующих добавок: Ge, B, Fe, Sn, Al;
 - легировании Ti, Hf, Cr, Al и образовании фаз Лавеса типа Cr₂M, где M – Nb, Ti, Hf;
- использовании комбинированных теплозащитных покрытий.

Высокопрочные волокна в сплаве можно получить *направленным эвтектоидным превращением*. Например, в перлитных сталях можно получить мартенситные волокна, используя неполную закалку. Закалка доэвтектоидной стали с температуры прокатки позволяет получить материал со структурой из волокон феррита и мартенсита. Получение такой структуры обеспечивает повышение предела прочности для стали 20 с 430 до 1050 МПа.

Волокнистую структуру композиционных материалов можно получить деформированием двухфазных материалов, при этом одна из фаз должна быть более прочной при комнатной и повышенной температуре. Включения прочной фазы при подборе условий деформирования можно сделать вытянутыми, волокнистыми, например, сфероиды вольфрама в сплаве никеля с хромом и вольфрамом прокаткой превращаются в волокна.

В настоящее время активно исследуются композиционные материалы на основе керамической матрицы. Разработки в области керамических композиционных материалов проводят ведущие фирмы

США, Германии, Франции, Китая и Японии. По сравнению с металлическими материалами керамические материалы обладают комплексом уникальных свойств и имеют ряд преимуществ: способность сохранять свойства в окислительной среде при температурах выше 1200 °С, износостойкость, коррозионные свойства, малый удельный вес и низкий коэффициент теплового расширения.

Ведутся работы по исследованию работоспособности жаровых труб из композиционных материалов на основе карбида кремния. Жаровые трубы из SiC/SiC установлены в кольцевые камеры сгорания стационарных газовых турбин фирмы Solar Turbines Incorporated. Жаровые трубы были спроектированы фирмами Honeywell Advanced Composites, Inc. и B.F. Goodrich Aerospace. Жаровые трубы камеры сгорания из SiC/SiC испытаны в двигателях Centaur 50S. Многие зарубежные разработки конструкционных керамических материалов для новых двигательных установок остановили свой выбор на композиционных материалах с матрицами из SiC или Si₃N₄, армированными волокнами SiC, C.

В сравнении с высокотемпературными металлическими сплавами керамические композиционные материалы SiC_{вол}/SiC (на основе матрицы SiC, армированной ткаными или непрерывными волокнами SiC) имеют пониженную плотность (30–50 от плотности металлов) и термическое расширение (около 60 % от ТКЛР металла). Эти керамические композиционные материалы потенциально способны работать при температурах до 1600–1650 °С. Результаты зарубежных исследований выявили, что при высокотемпературных испытаниях керамические композиционные материалы SiC_{вол}/SiC на основе волокон карбида кремния и карбидокремниевой матрицы показывают наилучшие результаты.

В NASA разработаны несколько базовых систем керамических материалов SiC_{вол}/SiC для теплонагруженных деталей перспективных двигательных установок. В качестве непрерывных волокон SiC использованы волокна марки Sylramic, интерфазные защитные покрытия для волокон на основе BN с добавками кремния. При многократном применении SiC-образующего полимера для пропитки композиционного материала SiC_{вол}/BN/SiC с последующим пиролизом, несмотря на высокую остаточную пористость, удалось получить систему, которую можно использовать при температурах 1427 °С.

NASA при получении изделий турбинного двигателя с помощью аддитивной технологии Binder Jetting из композиционного материала SiC/SiC использовали в качестве исходного порошка карбида кремния абразивный материал марки Carboresh компании Washington Mills AS. В качестве упрочняющих волокон использовались волокна Si-TUFF SiC

компании Advanced Composite Materials, LLC.

На рис. 87 приведены потенциальные компоненты авиационного двигателя, которые могут изготавливаться из композиционных керамических материалов.

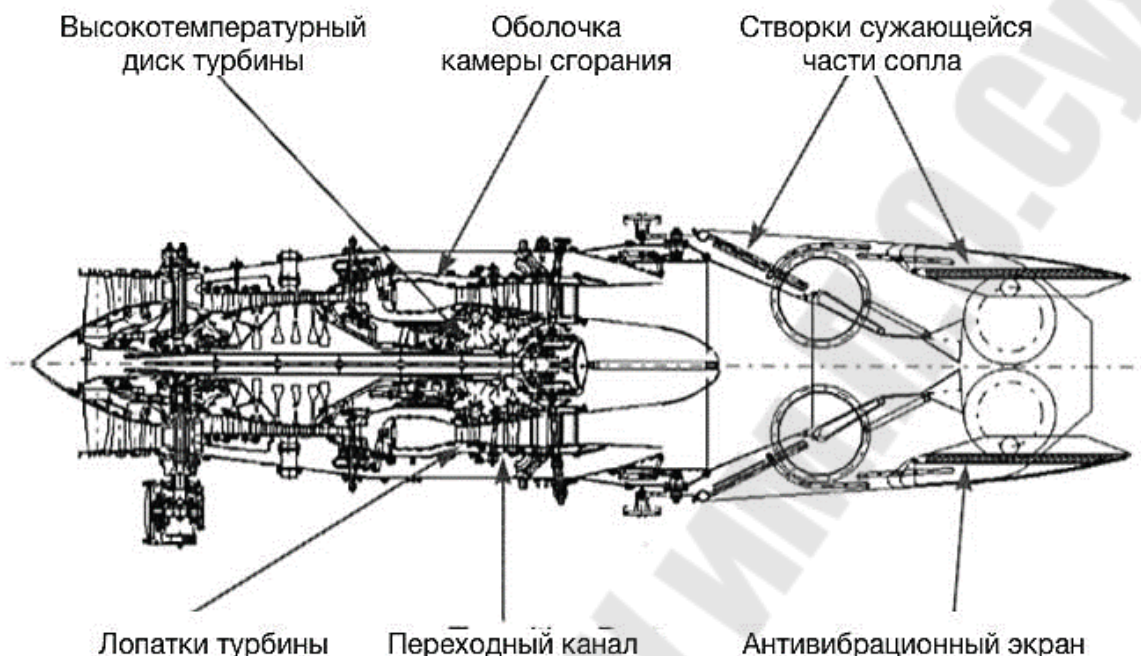


Рисунок 84 – Компоненты авиационного двигателя, которые могут изготавливаться из композиционных керамических материалов

Компания General Electric проводит разработки в области изготовления деталей газотурбинных двигателей из керамоматричных композиционных материалов, в том числе на основе матрицы из карбида кремния, упрочнённой волокнами SiC (рис. 88).

Керамические изделия планируется использовать в таких двигателях, как LEAP, GE9X.

Целесообразность внедрения того или иного материала, как известно, решается путём сравнения его основных характеристик с аналогичными свойствами используемых в технике стандартных материалов.

Лёгкие композиционные материалы с алюминиевой матрицей, армированной углеродными высокопрочными и высокомодульными волокнами, хотя и обладают пределом прочности немногим выше предела прочности лучших промышленных алюминиевых сплавов, однако имеют значительно более высокий модуль упругости (140–160 ГПа вместо 70 ГПа) при меньшей плотности (2,3 вместо 2,7 г/см³). Удельная прочность углеалюминиевой композиции 35 км, а у обычных

алюминиевых сплавов – менее 20 км. Удельная жёсткость углеалюминиевой композиции в 2,5 раза выше, чем у стандартных сплавов (6250 вместо 2550 км). Указанный уровень свойств дал основание конструкторам проверять эти материалы в опытных конструкциях для таких высоконагруженных деталей, как корпуса, сопловые лопатки двигателей, и деталей самолётов, вертолёт, энергетических установок и др.

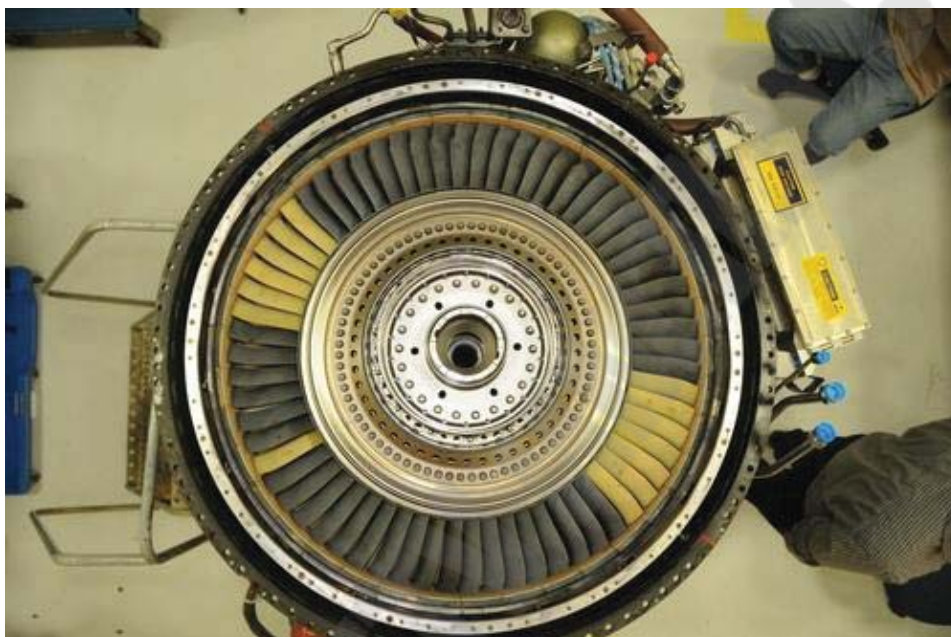


Рисунок 88 – Ротор турбины с лопатками, изготовленными из керамического композиционного материала (GE Aviation)

Необходимо иметь в виду, что композиционные материалы, так же как и традиционные сплавы, не являются универсальными. Использование их по назначению в той или иной конструкции рационально только в том случае, когда это технически обосновано и экономически целесообразно.

Дальнейшая работа в отношении материалов может быть следующей:

- некоторые комбинации металлических материалов обеспечивают хорошее протекание технологического процесса тогда, когда их смесь образует эвтектику. Существует необходимость поиска таких комбинаций, которые хорошо бы обрабатывались и позволяли получать качественные изделия;
- небольшое количество добавок зачастую позволяет изменять поведение ванны расплава, что позволяет получать более гладкую поверхность изделия;
- существенно труднее устранить неровность вертикальной поверхности, чем горизонтальной. Обработка боковой

поверхности изделия после сплавления каждого слоя поможет существенно улучшить поверхность;

- изготовление порошков непосредственно из руды позволит в перспективе снизить их стоимость.

3 ЦИФРОВЫЕ МОДЕЛИ ПРОИЗВОДСТВА

Высокие темпы развития новых технологий (киберфизических систем, трёхмерной печати, интеллектуальной робототехники, облачных сервисов и др.) заставляют компании активно реформировать свой бизнес, внедрять и развивать новые подходы и технологии его ведения, обеспечивая высокое конкурентное качество продукции и высокую производительность.

В этих условиях стала очевидна необходимость рассматривать изделие как некий информационный объект, содержащий все необходимые данные об изделии на каждом этапе его существования – от идеи создания до утилизации, то есть на протяжении всего «Жизненного Цикла Изделия» (сокр. *ЖЦИ*).



Рисунок 85 – Этапы жизненного цикла изделия

3.1 Коммуникационная роль трёхмерной модели изделия

ИПИ-технологии (сокр. от *Информационная Поддержка жизненного цикла Изделия*) подразумевают использование трёхмерных геометрических компьютерных моделей изделия как базового элемента ЖЦИ (рис. 89). Построение пространственной геометрической модели изделия в настоящее время является ключевой задачей компьютерного проектирования. Именно эта модель используется для решения задач формирования чертежно-конструкторской документации, проектирования средств технологического оснащения и разработки управляющих программ для станков с ЧПУ и координатноизмерительных машин (сокр. *КИМ*).

По компьютерной модели с помощью методов и средств быстрого прототипирования может быть получен физический образец изделия. Трёхмерная модель может быть не только построена средствами определенной CAD-системы, но и принята из другой CAD-системы через один из согласованных интерфейсов (при их наличии для этой пары систем) или сформирована по результатам трёхмерного сканирования физического изделия-прототипа с использованием соответствующего оборудования.

В CAD-системах применяют поверхностное (каркасно-поверхностное), твердотельное и смешанное (гибридное) моделирование. При поверхностном моделировании сначала строится каркас – пространственная конструкция, состоящая из отрезков прямых, дуг окружностей и сплайнов. Каркас играет вспомогательную роль и служит основой для последующего построения поверхностей, которые «натягиваются» на элементы каркаса.

Хотя поверхности и определяют границы тела, но самого понятия «тело» в режиме поверхностного моделирования не существует, даже если поверхности ограничивают замкнутый объем. Это наиболее важное отличие поверхностного моделирования от твердотельного.

Другая особенность состоит в том, что элементы каркасно-поверхностной модели никак не связаны друг с другом. Изменение одного из элементов не влечёт за собой автоматического изменения других. Это даёт большую свободу при моделировании изделий свободной формы, но одновременно значительно усложняет работу с регулярной геометрией в модели.

С другой стороны, твердотельная модель представляет собой целостный объект, занимающий замкнутую часть пространства. Данный объект строится с использованием параметров модели и соотношений между ними. Параметризация позволяет за короткое время «проиграть» (с помощью изменения параметров или геометрических соотношений) различные конструктивные схемы и избежать принципиальных ошибок. Благодаря этому всегда можно точно сказать, находится ли точка внутри твёрдого тела, на его поверхности или вне тела. При изменении в модели любого элемента будут изменяться все другие элементы, которые связаны с ним, и полная форма твёрдого тела, но целостность нарушена не будет.

Элементами, из которых строится твёрдое тело, могут быть:

- примитивы (элементы, соответствующие распространённым геометрическим фигурам, таким как сферы, цилиндры, конусы, кубы и т. п.);
- элементы вытягивания (полученные вытягиванием плоского контура перпендикулярно его плоскости);

- элементы вращения (полученные вращением плоского контура вокруг заданной оси);
- фаски;
- скругления;
- оболочки;
- рёбра жесткости.

Обычно твердотельный объект строится путем последовательного «добавления» или «вычитания» элементов. Так, если к уже имеющейся твердотельной модели «добавить» элемент вытягивания, то этот элемент образует на модели выступ, а при «вычитании» элемента на модели образуется углубление. Если при построениях доступны одновременно несколько твердотельных объектов, то над любыми двумя твердотельными объектами, пересекающимися в пространстве, можно выполнять булевы операции объединения, вычитания и пересечения.

При использовании операции пересечения двух объектов формируется новый объект, который состоит только из их общей части (на рис. 90 иллюстрируется выполнение булевых операций: А – элемент типа «куб», В – элемент типа «сфера»).

Твердотельное моделирование предполагает возможность установки параметрических зависимостей между элементами твёрдого тела или нескольких тел. При этом изменение одного из параметров (например, длины элемента) приводит к соответствующей перестройке всех параметрически связанных элементов конструкции.

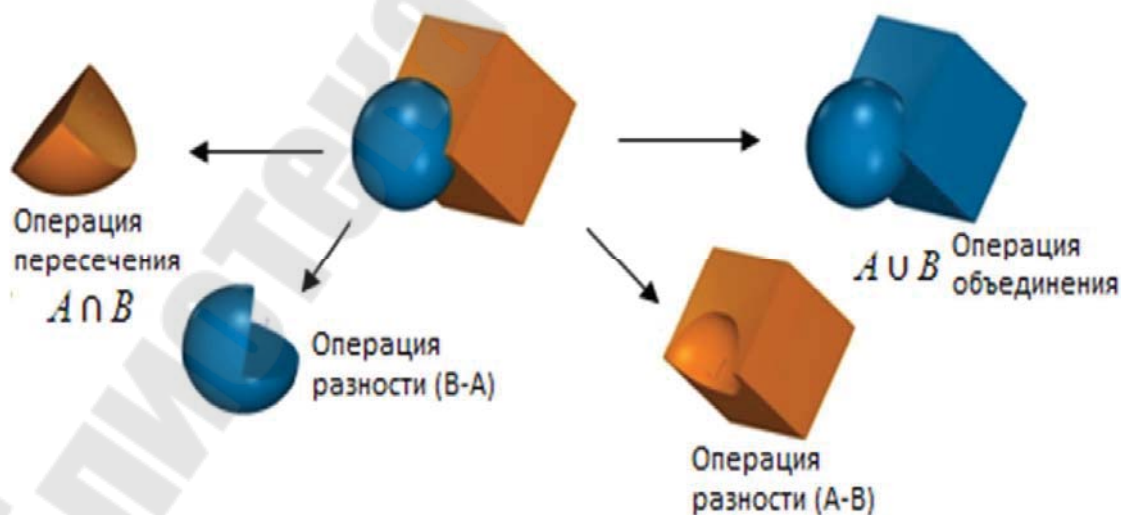


Рисунок 86 – Построение модели с использованием примитивов и различных булевых операций элементов

Такое моделирование, называемое параметрическим, даёт конструктору дополнительные удобства. Так, можно установить параметрические зависимости между элементами твердотельной сборки и, тем самым, автоматизировать контроль собираемости изделия.

Твердотельное моделирование позволяет быстро создавать модели изделий относительно простых форм (под простотой здесь понимается отсутствие сложных поверхностей). К таким изделиям можно отнести внутренние детали машин и механизмов, металлические корпусные детали и др. (рис. 91).

При гибридном моделировании обеспечивается возможность одновременной работы с твердотельными объектами и с поверхностями. При этом можно «отрезать» поверхность частью твёрдого тела, превращать замкнутый поверхностями объём в твёрдое тело и т. п. Гибридное моделирование позволяет сочетать все удобства твердотельного моделирования с возможностью построения объектов сколь угодно сложной геометрической формы.

Гибридное моделирование, в частности, характерно при построении моделей пластмассовых изделий сложной пространственной формы, таких как различные детали автомобилей, самолетов, бытовых приборов и др. (рис. 92).

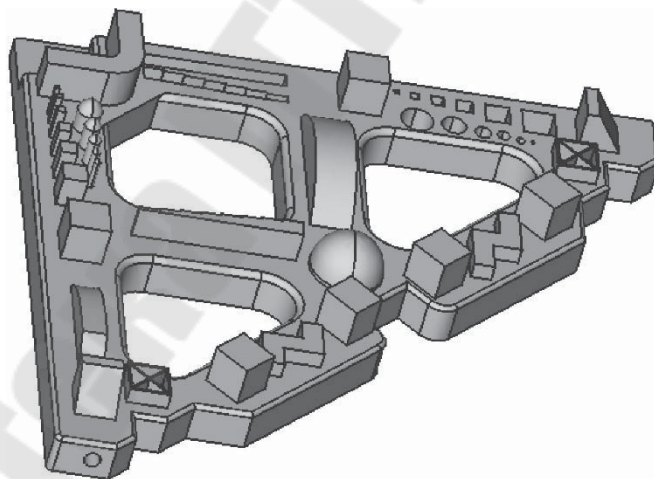


Рисунок 87 – Модель детали, построенная с помощью операций твердотельного моделирования

Способность эффективно хранить и предоставлять информацию об изделии на основе трёхмерной модели напрямую зависит от парадигмы моделирования, которая закладывается в CAD-систему. Особенности представления данных связываются с определённым форматом модели, который обычно уникален для каждой CAD-системы и в большинстве случаев является закрытым для редактирования или

анализа. Таким образом, передача модели от системы к системе является нетривиальной задачей, сопряжённой с множеством сложностей. Использование единой структуры трёхмерной модели упрощает не только получение данных, но и работу с моделью изделия на всех этапах ЖЦИ.

Современных стандартов описания трёхмерных моделей имеется достаточно много. При этом в популярных конверторах, которые преобразуют данные между различными видами моделей, насчитывается более 100 типов форматов, хотя они и не отражают специализированные варианты, применяемые внутри различных систем трёхмерного моделирования.

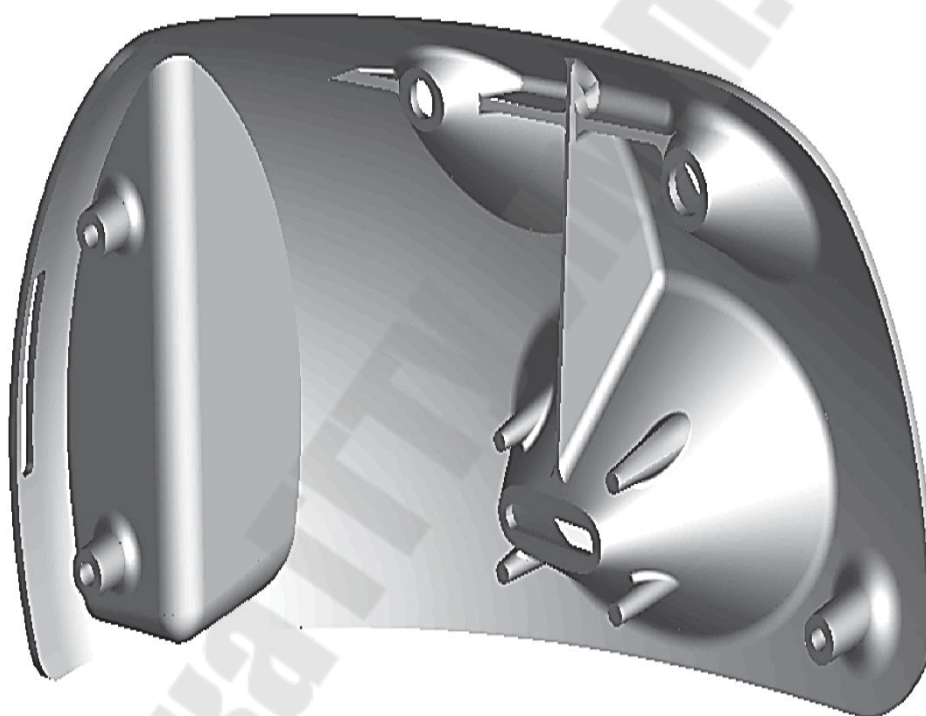


Рисунок 88 – Модель отражателя фары автомобиля, построенная с помощью операций гибридного моделирования

Рассмотрение даже такого количества моделей, ограниченного в соответствии с частотой использования, нецелесообразно. Поэтому выделим несколько форматов, которые являются наглядными представителями своих классов и позволяют отразить все особенности трёхмерного моделирования. К ним отнесём следующие форматы: 3ds, stl, ascii, max, sat/sab, step, iges. Отдельно выделяются форматы CAD-систем, связанные с особенностями определённого ядра такие, как CATPart и 3dxml в CATIA, prt в Creo.

Все эти стандарты можно разделить на несколько типов и подтипов. Учитывая контекст их использования, деление будем

проводить с точки зрения закладываемых в тот или иной формат возможностей для использования в технологической подготовке производства. Так, 3ds является одним из широко распространённых форматов, но его использование в сфере CAD/CAM/CAE крайне ограничено из-за специализации данного формата, связанной с трёхмерной анимацией.

Аналогичная ситуация с другими подобными форматами трёхмерной графики, такими как max. Ко второму типу отнесём такие форматы как STL, ASCII и т.п. Эти форматы могут использоваться как в компьютерной графике, так и для производственных задач.

Простота внутренней структуры и ограничения, накладываемые на содержание данных форматов, привели к широкому распространению их в качестве трансляторов для использования при решении определённого класса задач, таких как трёхмерное сканирование изделий или изготовление на установках быстрого прототипирования. Использование этих форматов в других сферах производства проблематично, так как их структура состоит из наборов координат, которые не могут быть представлены в виде примитивов без дополнительной трудоёмкой компьютерной обработки.

Совокупность различных форматов данных, используемых в CAD-системах, можно разбить на два подтипа. Первый подтип – внутренние стандарты, которые открываются либо только определённой системой моделирования, либо несколькими системами, работающими на едином графическом ядре.

Некоторые из этих форматов могут восприниматься и сторонними программами-конвертерами, но качество такой обработки обычно оставляет желать лучшего. Конвертирование внутри одного формата, но для разных версий CAD-системы, вызывает нарушения структуры модели и ошибки в отображении.

Второй подтип – трёхмерные модели, которые формируются одной из систем, но становятся доступными для отображения в различных программах-просмотрщиках (англ. viewers), которые обычно распространяются бесплатно. Такие программы могут отображать различную информацию (зачастую специализированную), но при этом внесение изменений или извлечение данных становится либо невозможным, либо крайне проблематичным. К таким стандартам можно отнести, например, стандарт 3DXML, активно продвигаемый компанией Dassault Systemes, но обладающий перечисленными выше ограничениями.

Третьим типом являются форматы-интерфейсы. Эти форматы специально разработаны для передачи данных от системы к системе, и в случае постоянной поддержки и обновлений позволяют на высоком

уровне представлять информацию о модели с включением разных типов данных.

Наиболее распространены форматы SAT/SAB (ACIS-ядро), STEP и IGES. При этом формат SAT/SAB применяется в специализированных задачах и передаёт в основном трёхмерную геометрию с упором на обработку примитивов, что часто используется в таких системах контроля как координатноизмерительные машины (например, CarlZeiss DuraMax).

С другой стороны, IGES и STEP являются форматами-контейнерами с широкими возможностями внутреннего наполнения. Сама трёхмерная модель в таком случае может состоять либо из примитивов, либо иметь представление в виде точек (аналогично ASCII или STL). Формат IGES длительное время использовался для передачи данных (в первую очередь чертёжных) между системами. При этом зачастую передаваемая информация отображалась в целевой системе некорректно. Также имелись существенные ошибки в отображении трёхмерных моделей изделий.

Учитывая такие особенности, был начат проект STEP, предназначенный для замены формата IGES. После первого релиза STEP в 1994 г., интерес к дальнейшей разработке IGES угас, и версия 5.3 (1996) была последним выпущенным стандартом. Формат IGES обошли стороной многие тенденции развития трёхмерной графики, но он все-таки часто используется для передачи геометрии со структурой низкой сложности.

3.2 Использование трехмерных моделей на различных этапах жизненного цикла изделия

Проектирование. Этот этап обычно разделяют на концептуальное (предварительное) проектирование и рабочее (более детализированное) проектирование. На этапе концептуального проектирования формируются и уточняются технические требования к изделию, осуществляется поиск и выбор принципиальных решений, обеспечивающих требуемую функциональность. Трёхмерные модели могут использоваться для представления концептуальных решений (например, принципа функционирования механического устройства), их анализа и последующего отбора.

На этапе рабочего проектирования концептуальные решения, выбранные ранее конкретизируются: определяется состав узлов и деталей, точные геометрические размеры изделия, используемые материалы. В результате рабочего проектирования формируется конструкторская документация. При этом 3D модели служат основной формой представления геометрической информации об изделии,

позволяют проводить компьютерные инженерные расчёты, анализировать собираемость деталей и узлов, производить прототипы (функциональные, тестовые, рабочие), получать чертёжно-конструкторскую документацию.

Подготовка производства. На этапе подготовки производства, который является одним из самых длительных и сложных, выделим подэтап технологическая подготовка производства (сокр. *ТПП*). До появления средств трёхмерного компьютерного моделирования исходной информацией для этапа ТПП служила чертёжно-конструкторская документация.

В настоящее время трёхмерные модели рассматриваются не только как составная часть конструкторской документации на изделие, но и как полная замена описания изделий в виде чертежей. При этом часть задач ТПП уже не может быть в принципе решена без трёхмерной модели. К таковым можно отнести задачи многокоординатной обработки, требующие сложных математических вычислений, которые не возможно провести вручную, либо задачи применения аддитивных технологий, базирующейся только на использовании трёхмерной модели.

Производство. На этапе производства трёхмерные модели используются для анализа и оптимизации производственных процессов. Например, в роботизированной линии по сборке сложного изделия трёхмерные модели технологического оборудования совместно со специализированным программным обеспечением для виртуального моделирования производственных процессов позволяют не только контролировать столкновения, но и обеспечивать синхронизацию действий отдельных роботов и людей по времени.

Реализация, эксплуатация, ремонт и утилизация. Этапы реализации, эксплуатации, ремонта и утилизации современных изделий невозможен без информационной поддержки (в коммерческих предложениях, для рекламных целей или в качестве элементов и составных частей документации по эксплуатации и ремонту).

Например, слайды, анимационные фильмы и другие подобные данные, могут выгодно представить созданное изделие и пояснить принципы его работы. Такая поддержка организуется на базе трёхмерных моделей. В целом количество способов применения трёхмерных моделей для решения задач информационной поддержки этапов ЖЦИ достаточно обширно.

4 ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОТОТИПЫ

4.1 Трёхмерное сканирование

Задачи модификации технологического процесса на основании анализа изготовленного изделия, изучения собираемости деталей, высокоточного контроля непосредственно на рабочем месте или проведения виртуальных испытаний на основе трёхмерных моделей выявили необходимость создания нового класса оборудования, получившего название «трёхмерный сканер».

В данный класс оборудования входят различные устройства, метод работы которых зачастую коренным образом отличается друг от друга, но все они позволяют формировать трёхмерную модель на основе физического объекта. Методов контроля изделия или формирования трёхмерной модели существует много, в том числе электромагнитные и ультразвуковые измерения, томография поверхности, но наиболее часто используемые можно разделить на три группы:

- точечная триангуляция;
- линейная триангуляция;
- интерференционное проецирование.

Точечная триангуляция. При использовании точечной триангуляции с помощью щупа в один момент времени получают координаты одной точки. Схема действия представлена на рис. 93.

Для получения всей модели изделия производится обход по характерным точкам. Если объект измерения представляет собой сложную модель, тогда количество измерений приходится увеличивать пропорционально сложности. Поверхность между ближайшими измеренными точками выстраивается по математическим алгоритмам, тем самым вносится погрешность в построение модели.

На рис. 94 представлена схема возникновения погрешности. Для уменьшения ошибки по хорде приходится вводить промежуточные измерения, тем самым, увеличивая в несколько раз время сканирования. Если визуально сложно определить специфические особенности модели, и в техническом задании на сканирование эти особенности не указываются, тогда они не будут отражены в компьютерной модели.

На рис. 95 приведена увеличенная фотография модели, полученной методом точечной триангуляции. Метод точечной триангуляции обеспечивает высокую точность передачи конкретных параметров модели. Такая точность реализуется благодаря фиксированному положению объекта на протяжении всего процесса измерения.

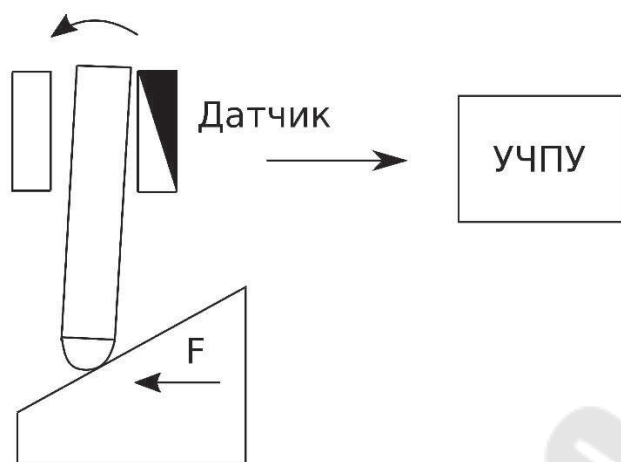


Рисунок 89 – Схема действия систем сканирования, основанных на методе точечной триангуляции

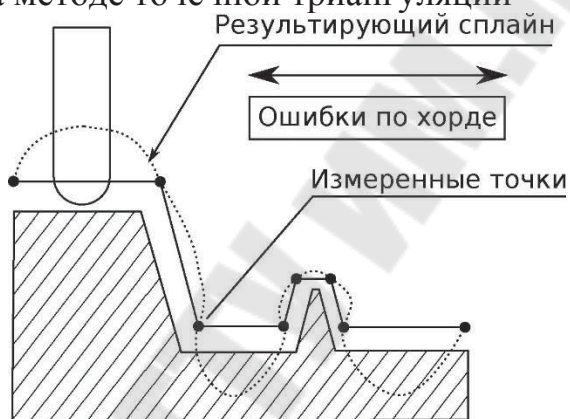


Рисунок 90 – Схема действия систем сканирования, основанных на методе точечной триангуляции

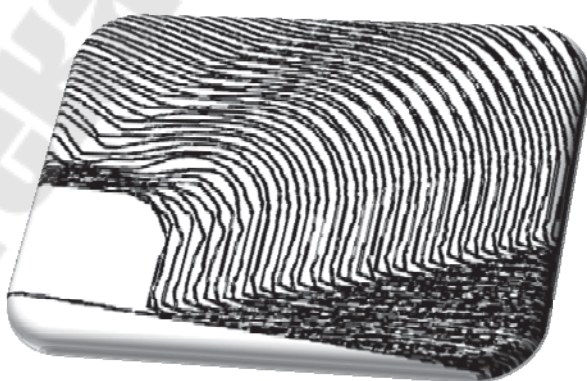


Рисунок 91 – Фотография погрешностей поверхности, возникших из-за ошибки по хорде

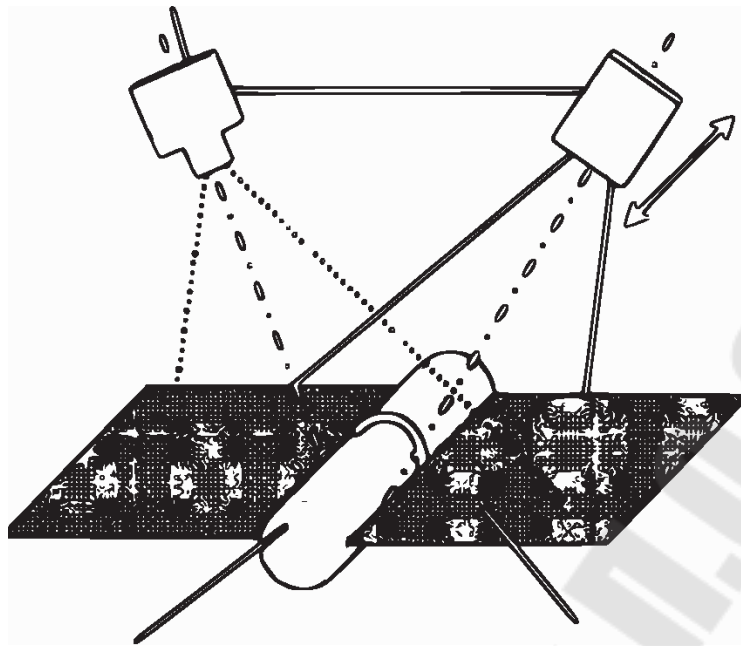


Рисунок 92 – Схематическое изображение метода линейной триангуляции

Линейная триангуляция. При линейной триангуляции с помощью луча лазера или источника света проецируется полоса, которая считывается цифровой камерой. Схема действия систем, основанных на данном методе, приведена на рис. 96.

Последовательно проецируя полосу на все поверхности, объект охватывается полностью. Считанные полосы преобразуются в координаты составляющих их точек. На рис. 98 изображена схема получения координат точек поверхности.

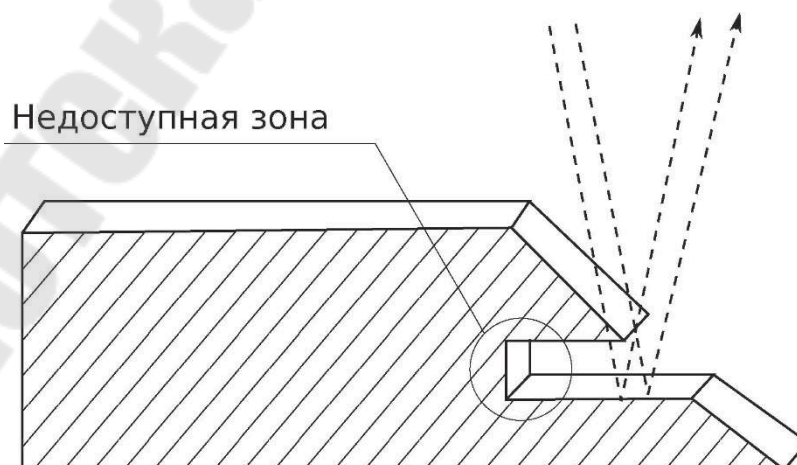


Рисунок 93 – Схема, демонстрирующая причину появления недоступной зоны для систем, основанных на методе линейной триангуляции

В связи с особенностями проецирования полосы, возникают ограничения по возможности сканирования объектов. На рис. 97 изображена зона на поверхности изделия, недоступная для лазерных сканеров.

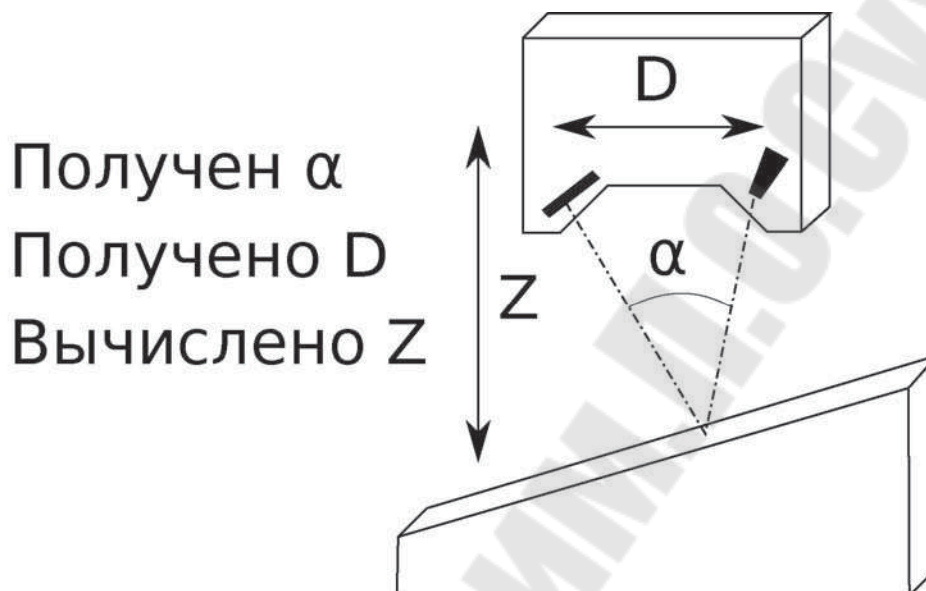


Рисунок 97 – Схема получения координат точек на поверхности объекта

Интерференционное проецирование Интерференционные трёхмерные сканеры основаны на проецировании белого света поверх считываемого цифровыми камерами участка поверхности. Схема работы систем, основанных на данном методе, приведена на рис. 99. Цифровой камерой считывается положение точек объекта сразу со всей измерительной площади, за счёт проецирования множества линий на участок поверхности. На рис. 100 изображена деталь, на которую спроецированы интерференционные линии.

Система сканирования производит автоматический сдвиг линии и получает координаты точек со всего участка поверхности изделия. Для получения полной модели изделие сканируется с разных сторон.

За одно измерение проецируется несколько интерференционных картин, покрывающих всю исследуемую область. Используя снимки с камер и учитывая постоянство угла между камерами, программным обеспечением системы определяются координаты точек на поверхности объекта.

На рис. 100 изображен метод получения координат точек с поверхности и метод проецирования интерференционных полос.

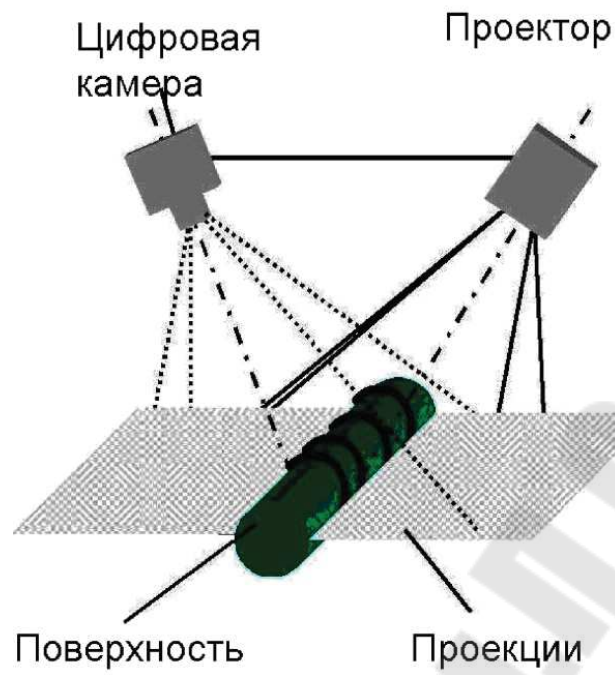


Рисунок 94 – Схематическое изображение метода интерференционного проецирования

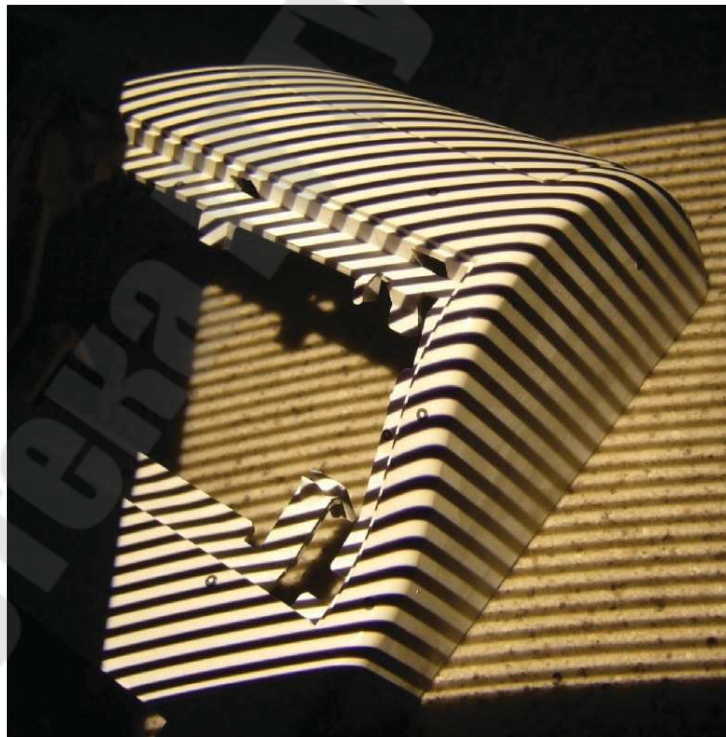


Рисунок 95 – Проецирование множества интерференционных полос на поверхность изделия

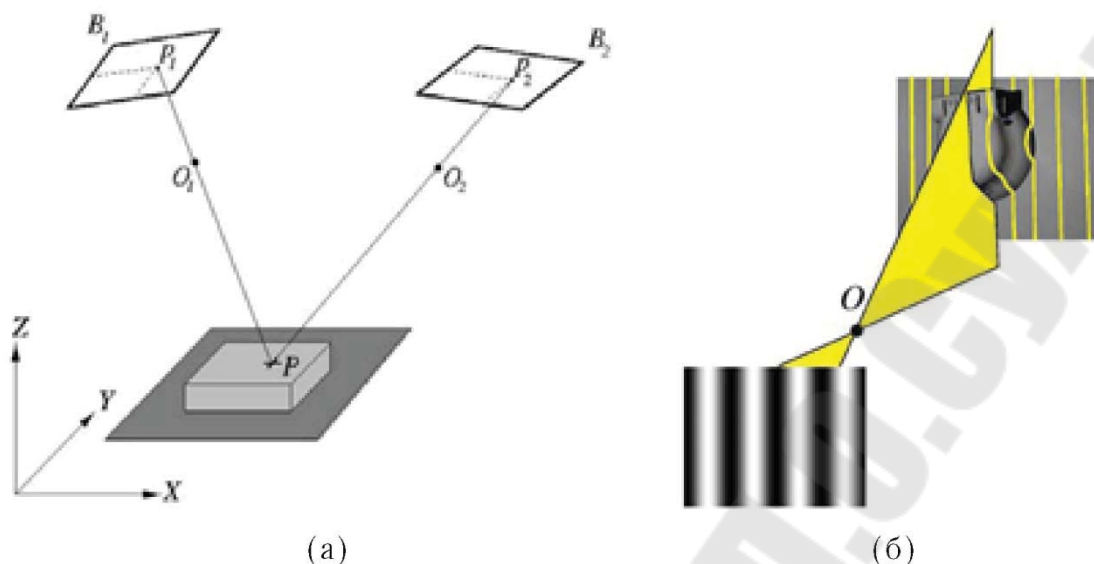


Рисунок 96 – Метод получения координат точек с поверхности *a* и проецирования интерференционных полос *б*

Метод точечной триангуляции предоставляет повышенную точность сканирования по сравнению с другими за счёт определения положения точек поверхности контактным способом. Для достижения высокой точности измерений требуется, чтобы система сканирования находилась в строго фиксированном положении, поэтому установки, основанные на методе точечной триангуляции, являются не мобильными или ограниченно мобильными.

Метод линейной триангуляции уступает по точности всем представленным методам сканирования. Большинство систем, основанных на данном методе, являются мобильными. Скорость работы при линейной триангуляции намного больше, чем у точечной триангуляции, но ниже чем у интерференционного проецирования.

Метод интерференционного проецирования уступает по точности методу точечной триангуляции. Скорость оцифровки выше, чем у других методов. Точность передачи сложной геометрии сравнима с точностью у метода линейной триангуляции.

На методе интерференционного проецирования основан ряд мобильных систем (рис. 102). Таким образом, в зависимости от требований имеется возможность выбрать метод, позволяющий получить оптимальные характеристики для конкретной задачи.



Рисунок 97 – Мобильный трёхмерный сканнер ATOS

4.2 Построение моделей изделий на основе трёхмерного сканирования (реверс-инжиниринг)

Реверс-инжиниринг – изучение технологических принципов приборов, изделий или систем путем анализа его структуры, функций и выполняемых действий. Реверс-инжиниринг применяется во многих областях и является одним из ключевых способов анализа, позволяющего создавать изделия, устройства и системы без наличия документации, но с доступом к объекту исследования. Для производства изделий такая задача особенно актуальна в связи с переходом от бумажных технологий к цифровым данным, что в свою очередь приводит к отсутствию большого количества данных требуемых для производства в цифровой форме.

Ряд производственных задач (например, быстрое прототипирование или работа с некоторыми САМ-системами) не требует твердотельной геометрии, а позволяет оперировать напрямую с

трёхмерным сканом (облаком точек) изделия, но число таких задач значительно меньше по сравнению с теми, которые требуют твердотельных или поверхностных моделей. Реверс-инжиниринг геометрии изделий подразумевает построение твердотельных моделей на основе трёхмерного скана изделия.

В связи с тем, что большинство систем трёхмерного моделирования не поддерживают формирования твердотельной модели на основе триангулярной поверхности, то возникла потребность создания специализированных средств для преобразования сканированных данных в поверхности, с которыми могут работать САД-системы.

В таких известных системах моделирования как Cimatron и CATIA были созданы специальные модули для работы сканированными поверхностями. Также имеются специализированные системы для осуществления реверс-инжиниринга трёхмерной геометрии. При этом в зависимости от сложности изделия могут применяться три подхода к реверс-инжинирингу:

- а) Использование трёхмерного скана как каркаса для поэтапного выстраивания геометрии.
- б) Трёхмерное моделирование на основе набора примитивов.
- в) Построения твердотельной геометрии из отдельных «патчей», покрывающих трёхмерный скан.

Первый подход обычно не требует дополнительных модулей, что позволяет ограничиться функционалом САД-систем. Применяется для изделий высокой точности с элементами криволинейной формы. В данном подходе трёхмерный скан используется в качестве основы для создания ориентиров (точки, линии, плоскости), построения базовой системы координат и измерения размеров. Затем трёхмерный скан используется только для сравнения с построенной моделью и визуального контроля. Характерным примером использования такого подхода является турбинная лопатка (рис. 103, а), которая строится на основе набора сечений (рис. 103, б).

Второй подход применяется для большинства изделий и в зависимости от сложности изделия может быть использован для построения полной модели или только набора ключевых элементов, которые позже объединяются с поверхностями свободной формы.

Примитивы могут быть созданы как в специализированном программном обеспечении для реверс-инжиниринга, что позволит провести эту процедуру в максимально автоматизированном режиме, так и могут быть измерены в программном обеспечении, которое взаимодействует с трёхмерным сканером с последующим построением в САД-системе. Последний вариант наиболее универсален и не требует

дополнительных капиталовложений (рис. 104).

Примитивы могут быть переданы в CAD систему через стандартные интерфейсы (например, IGES), либо измерены для последующего построения. После импорта в CAD-систему выполняется поэтапное восстановление трехмерной модели и её улучшение (рис. 105).

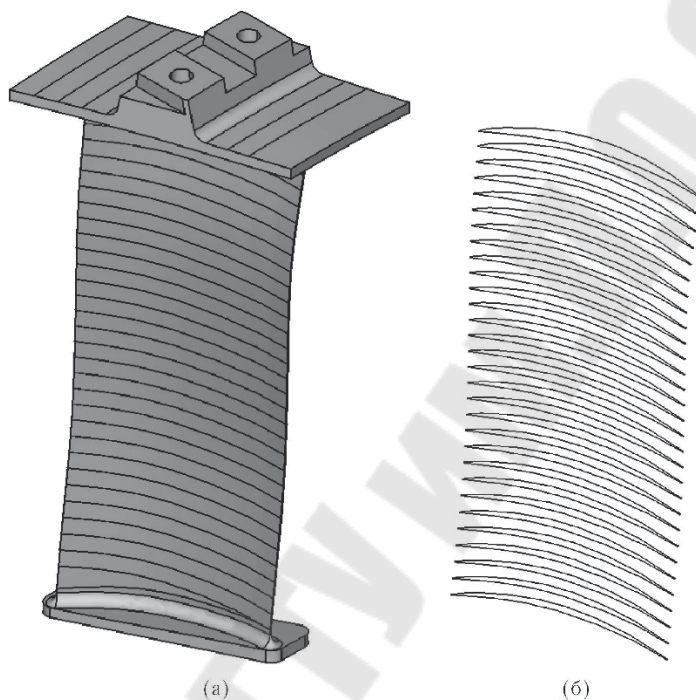


Рисунок 98 – Турбинная лопатка *a*, построенная на основе набора сечений *б*

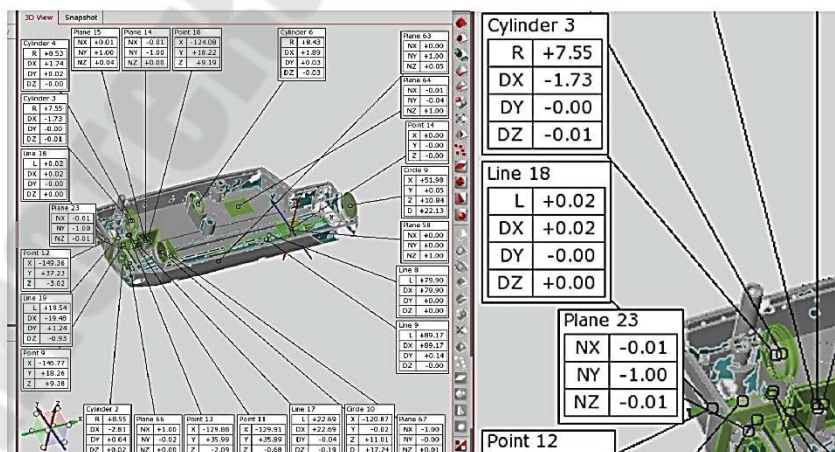


Рисунок 99 – Корпус с выделенными на нём примитивами

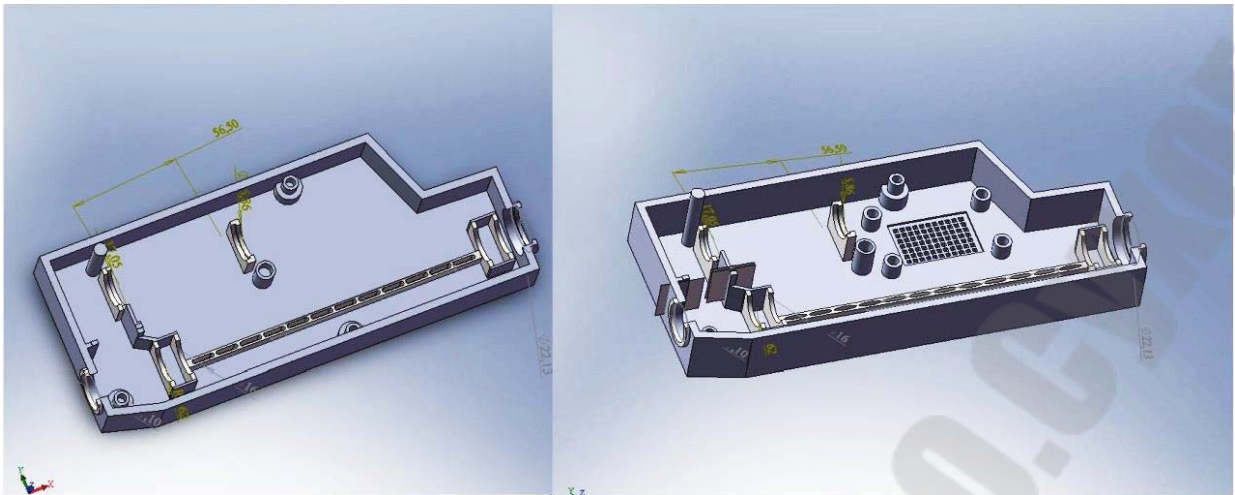


Рисунок 100 – Поэтапное восстановление трёхмерной модели

Третий подход применяется для построения моделей свободной формы. При этом точность получаемой модели получается ниже, чем для представленных выше подходов, но и скорость построения значительно выше, а в некоторых случаях и процесс построения может быть полностью автоматизирован.

Основная проблема при таком преобразовании в том, что триангулированная модель состоит из треугольников, не лежащих в одной плоскости, поэтому для формирования единой поверхности требуется «сшить» между собой все части.

Так как количество полигонов характеризует детализацию модели, то для получения точной поверхности требуется объединить десятки, сотни тысяч или, в некоторых случаях, миллионы треугольников. Поверхность, состоящая из такого количества частей, будет обрабатываться большое количество времени даже на высокопроизводительных компьютерах, что потребует оптимизировать данный процесс.

В связи с необходимостью создания поверхностей, в которых сотни тысяч треугольников заменяются десятками частей, системой Geomagic Wrap или её аналогами используется специальный алгоритм преобразования, который позволяет при формировании поверхности из нескольких частей сохранить высокую точность. Такой механизм положен в основу инструментария, который может быть настроен и использован как в ручном, так и в автоматизированном режиме.

В случае выбора ручного метода построения поверхности, вначале требуется создать контуры модели, на основе которых будет строиться сетка. Контурные требуются для создания границ, которые разделяют области с различной кривизной. На рис. 106 представлена модель с определенными границами. Если границ, полученных при автоматическом определении недостаточно, то дополнительные границы можно добавить вручную. Для этого используется инструмент «кисть».

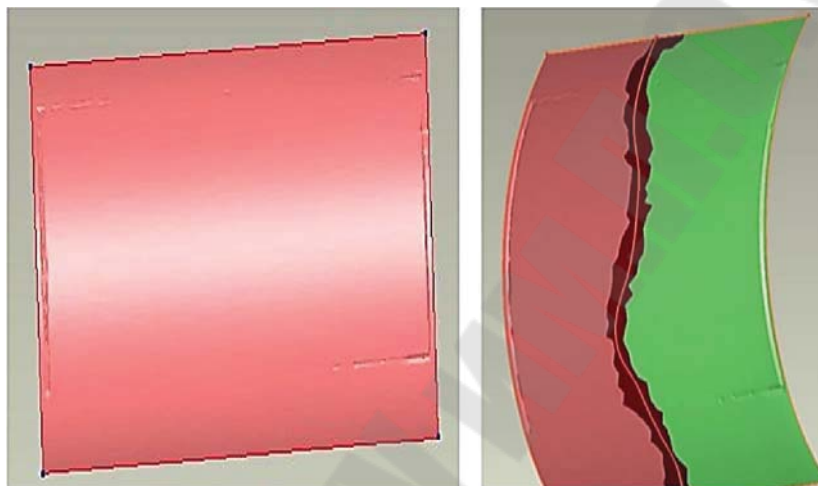


Рисунок 101 – Внешний вид модели с выделенными границами и пример создания новой границы

На основе созданных границ формируются патчи. Размеры ячейки сетки задают участки, в рамках которых будет формироваться отдельная часть поверхности. Их количество задаётся в зависимости от необходимой точности (рис. 107).

На основе патчей создается сетка, представляющая собой небольшие ячейки, между которыми происходит сглаживание для формирования объединенной поверхности.

Далее система по сформированной сетке «натягивает» CAD-поверхность, которая впоследствии может быть экспортирована в STEP или IGES-формате. При автоматическом построении моделей применяются различные принципы в зависимости от используемых систем. Так, система Geomagic Wrap при построении в автоматическом режиме проходит те же этапы, что и в ручном, но со сниженной точностью, что позволяет получить корректную поверхность достаточно быстро. CAD-система с открытым исходным кодом FreeCAD использует схожий принцип «натягивания» поверхности, но в качестве основы используются отдельные треугольники.

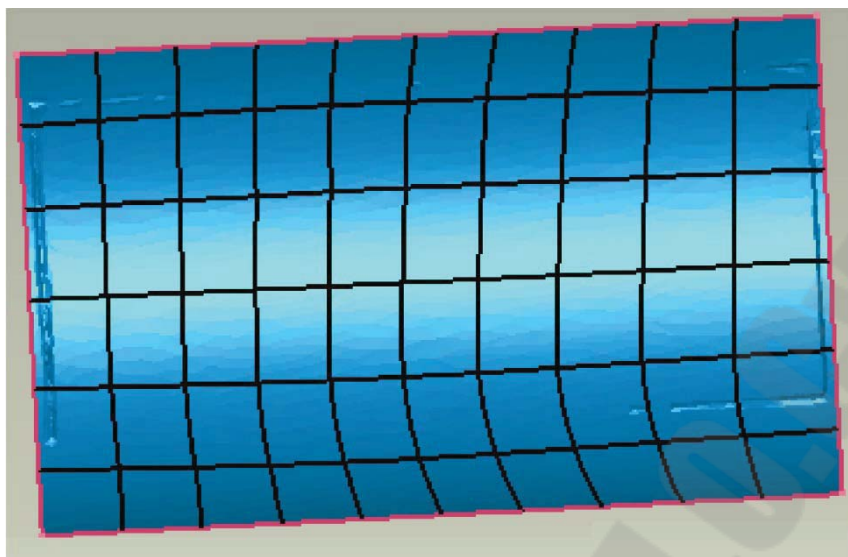


Рисунок 107 – Построенные на основе отсканированной модели патчи

5 КООРДИНАТНОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ МАШИНЫ

Обеспечение высокого качества выпускаемой продукции является основой её конкурентоспособности. Показатели качества изделий тесно связаны с точностью обработки. Полученные при обработке размер, форма и расположение элементарных поверхностей определяют технические параметры продукции, влияющие на её качество, надёжность и экономические показатели производства и эксплуатации.

Одним из универсальных средств контроля изделий является координатно-измерительная машина (сокр. *КИМ*). На КИМ возможен контроль геометрии отдельных элементов, проверка их взаимного расположения, контроль точности изготовления заданной формы поверхности и т. д. При этом контролироваться могут как простые изделия, так и изделия со сложной пространственной геометрией.

Измерительные машины любого типа (портальные, многоосевые, измерительные руки, оптические) являются сложными устройствами, требующими как навыков обращения с ними, так и корректно выстроенного алгоритма использования, зафиксированного в виде стандартов и регламентов. В КИМ портального типа (рис. 108) используется координатный метод измерения, сводящийся к последовательному нахождению координат ряда точек изделия и последующему расчёту размеров с учётом отклонений размера, формы и расположения в соответствующих системах координат.



Рисунок 102 – КИМ фирмы DEА и измерительная головка

Традиционные порталные КИМ обычно применяются в тех случаях, когда точность измерения является наиболее критичным параметром. Самая высокая точность порталной КИМ возможна лишь в условиях регулируемой температуры и влажности. При любых отклонениях точность будет нарушаться.

Современные КИМ используют специализированное программное обеспечение как для контроля, так и для обработки результатов. Часть программных систем позволяет даже проводить контроль поверхностей свободной формы и их сравнение с САД-моделями. В процессе работы на экран монитора выводится САД-модель, положение щупа в реальный момент времени, расположение измеряемых точек и величина их отклонения. Это упрощает и ускоряет процесс контроля.

С помощью КИМ можно не только контролировать детали поточечным ощупыванием, но и с использованием сканирующего ощупывания. Возможность сканирования помогает решать некоторые проблемы при измерении, например, определение формы или положения. Чтобы измерить форму детали необходимо задать большое количество расположенных на ней точек. Без сканирования этот процесс занимает достаточно много времени, при этом плотность точек достаточно низкая, а используя сканирование можно измерить огромное количество точек на любой указанной траектории, что помогает достаточно точно определить форму детали (рис.109).

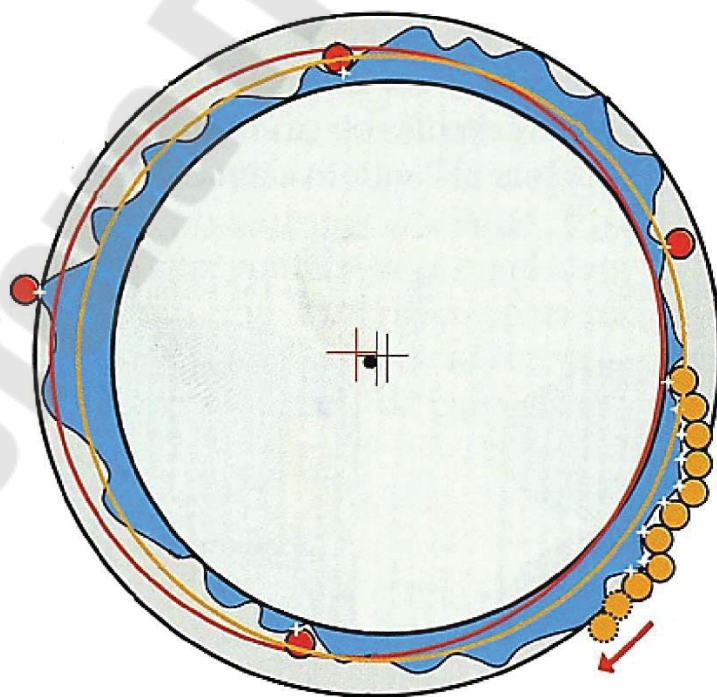


Рисунок 103 – Диаграммы, отражающие отличия методов точечного и сканирующего контроля на реальной детали

Перед началом каких-либо действий оператор КИМ получает задание на проведение требуемых работ. В задании обычно присутствует наименование детали, её описание, предыдущие данные её контроля (если таковой проводился) и контролируемые параметры. Дополнительно к заданию должны прилагаться трёхмерная модель детали, и чертежи (либо только САД-модель с трёхмерными аннотациями), где указаны все контролируемые параметры и их допуска.

Для начала работы необходимо определить состав видов конструкторско-технологических элементов (сокр. *КТЭ*), которые включает в себя контролируемая деталь. Как правило, даже в самой простой детали может содержаться множество *КТЭ*, и правильное их определение будет влиять на всю дальнейшую работу оператора.

При этом у отдельного элемента детали могут контролироваться различные параметры, которые измеряются отличным друг от друга способом. Такие элементы разделяются на несколько отдельных *КТЭ*. Например, измерение диаметра отверстия и его же соосности относительно какой-либо базы. Эти характеристики не могут быть внесены в один *КТЭ*, так как принципы их измерения отличаются сразу по нескольким параметрам:

- для измерения диаметра отверстия требуется всего 4–8 точек, а при измерении отклонения от соосности для более корректного измерения требуется ощупать уже 16 или более точек;
- при измерении диаметра используется всего один элемент детали, так как диаметр не зависит от каких-либо других элементов или их расположения, а для измерения соосности *КТЭ* должен включать в себя два элемента: сам измеряемый элемент и базовый элемент или ось, относительно которой рассматривается измеряемый параметр.

Программы измерения должны учитывать такую многовариантность, то есть иметь несколько сценариев (условий проверки).

5.1 Выбор методики обмера элементов детали

Для обмера изделий с использованием координатно-измерительных машин используется специализированный термин «ощупывание», определяющий касание поверхности для получения точек и проведения последующих измерений.

Существует несколько основных правил по методике ощупывания элементов детали на КИМ. Большинство поверхностей детали можно разбить на простейшие геометрические элементы: конус, цилиндр, плоскость и сфера. Каждый из этих элементов имеет свою методику ощупывания. Конус и цилиндр ощупывается как две окружности в

верхней и нижней части элемента. Особенность работы с цилиндром заключается в том, что при его очень малой высоте для контроля диаметра используется только одна окружность, то есть цилиндр становится вырожденным. При тех же условиях измерение конуса оказывается невозможно.

Обмер цилиндра. Для измерения цилиндра сначала нужно выделить контролируемые параметры. Они влияют на количество точек, которыми будет определен элемент. Далее нужно оценить высоту цилиндра, если она меньше или равна 5 мм, то считается, что на таком цилиндре невозможно ощупать две окружности (рисунок 110).

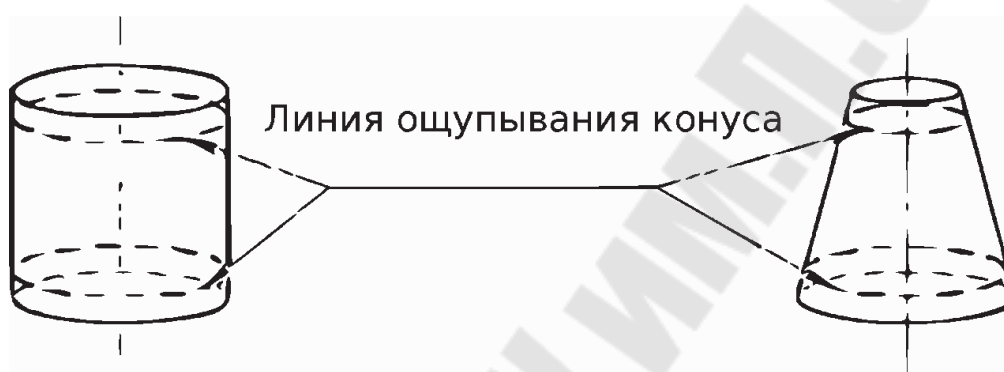


Рисунок 104 – Ощупывание цилиндра и конуса

Ключевые причины: не существует настолько малого диаметра шарика щупа, а также человек не сможет подвести щуп точно к предполагаемым измеряемым точкам, не используя дополнительное увеличительное оборудование.

Ещё одним фактором, влияющим на выбор методики обмера, является отношение величины диаметра к высоте цилиндра: при большом диаметре и малой высоте ось элемента определяется с большой погрешностью, поэтому чаще всего программа автоматически определяет такой элемент как окружность. В данном случае рассматривается типовая КИМ высокой точности (типа DEA Global Performance). Для прецизионных КИМ с точностью в десятки-сотни нанометров учитываются другие масштабы измерения, но общая методика остаётся неизменной.

Обмер конуса. Для конуса действуют все те же правила, что и для цилиндра, но считается, что измеряемый конус по высоте всегда превышает 5 мм. В противном случае этот элемент измерить на КИМ невозможно.

Обмер плоскости. При выборе методики ощупывания плоскости, требуется знать, нужен ли контроль её формы или положения. Для

определения плоскости требуется ощупать минимум три точки, желательно максимально удаленных друг от друга. Так как плоскость не может быть абсолютно идеальной, то для исключения погрешности формы рекомендуется ощупывать не 3, а 4 точки. Если же плоскость очень большая, то также рекомендуется взять несколько точек в её средней части.

Если же для плоскости требуется выполнить контроль формы или положения её относительно какого-либо другого элемента, то рекомендуется использовать большое количество определяющих её точек. Конкретное число точек определяется лишь величиной плоскости. Для более точного контроля рекомендуется применять сканирование. Существует несколько видов траектории движения щупа при сканировании:

а) *Сканирование сеткой.* Это самый распространённый способ сканирования плоскости. Траектория щупа имеет вид змейки с контролируемым шагом и шириной. Данный вид сканирования подходит не для каждой плоскости, так как чаще всего они имеют отверстия или различные выступающие элементы, так как в данном виде щуп обходить эти препятствия не будет.

б) *Сканирование по окружности.* Данный способ подходит для сканирования плоскости вокруг какого-либо отверстия или круглого выступающего элемента, например, для определения торцевого биения.

В общем случае для ощупывания элемента типа:

- прямая требует задания 2 точек;
- окружность – 3 точек;
- плоскость – 3 точек (желательно 4 максимально удаленных друг от друга);
- цилиндр – 5 точек (желательно 6: по 3 в различных сечениях, максимально отдалённых друг от друга);
- конус – 6 точек, по 3 в различных сечениях, максимально отдалённых друг от друга;
- сфера – как минимум 4 точки, 2 у полюса; 2 вдоль экватора.

Для различных случаев существуют следующие методики ощупывания:

Форма или положение элемента не измеряются, высота элемента < 5 мм. При ощупывании такого элемента достаточно ощупать всего 3 точки. Для исключения погрешности формы, рекомендуется ощупать 4 точки. Измерение следует производить на одной высоте цилиндра, поэтому элемент будет принят за окружность. Если же в качестве метода обмера использовать сканирование, то добавляется погрешность определения размера. Она может появиться из-за плохой очистки детали или попадания пыли в зону сканирования, а также на измерение

начинает оказывать влияние микрогеометрия. Конус при таких условиях проконтролировать нельзя (рис. 111).

Измеряются форма или положение элемента, высота элемента < 5 мм. Из-за малой высоты цилиндра нельзя точно определить его ось, то есть необходимо работать с усреднённым центром цилиндра. Это создаёт некоторую дополнительную погрешность, но при такой малой высоте она оказывается незначительной. Количество контролируемых точек напрямую влияет на точность определения положения усредненного центра: чем больше точек ошупано, тем меньше погрешность.

Для определения позиции центра измеряемой окружности цилиндра или её формы рекомендуется ошупать не менее 8 точек. Для более точного определения искомого центра или формы рекомендуется использовать сканирование. При сканировании щуп не отрывается от детали, что позволяет ошупать большое число точек за сравнительно небольшой промежуток времени. Конус при таких условиях проконтролировать нельзя.

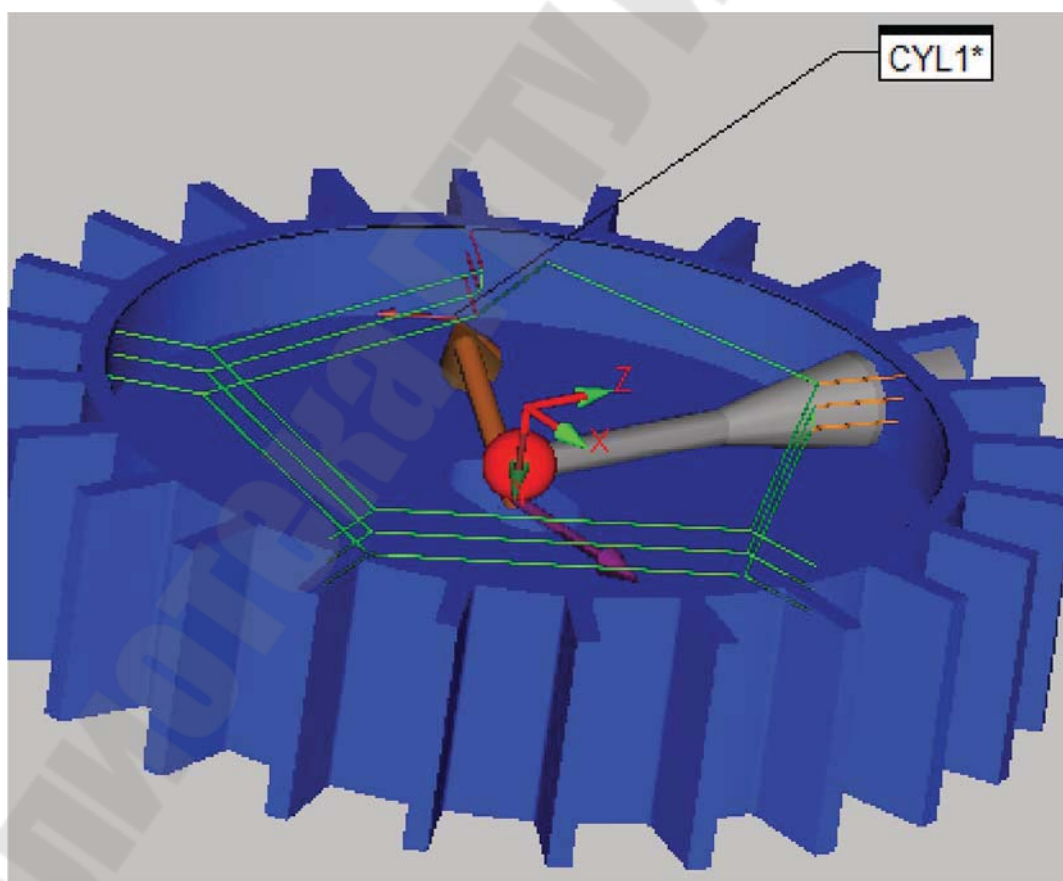


Рисунок 105 – Пример ошупывания поверхности высотой < 5 мм

Форма или положение элемента не измеряются, высота элемента > 5 мм. Для контроля размеров такого цилиндра достаточно ощупать всего 5 точек, но, как было сказано выше, для исключения погрешности формы, лучше использовать 8 точек: 4 в верхней части цилиндра и 4 в нижней. Для более точного измерения рекомендуется также ощупать 4 точки в центральной части цилиндра, так как он может иметь бочкообразную или вогнутую форму. Для конуса достаточно ощупать 8 точек: 4 в верхней части конуса и 4 в нижней.

Измеряются форма или положение элемента, высота элемента > 5 мм. Для контроля формы или положения такого цилиндра минимальное количество ощупываемых точек – 16: 8 в верхней части цилиндра и 8 в нижней. Для более точного измерения формы или положения рекомендуется использовать сканирование, а также ощупывать точки в центральной части цилиндра, так как он может иметь бочкообразную или вогнутую форму. Для конуса достаточно ощупать 16 точек: 8 в верхней части конуса и 8 в нижней.

Также можно выделить следующие общие методы контроля:

- *Ощупать* точки элементов на двух высотах, не менее 8 точек на каждой (или использовать сканирование).
- *Ощупать* точки элемента на двух высотах, не менее 4 точек на каждой.
- *Ощупать* точки элемента на одной высоте, не менее 8 точек (или использовать сканирование).
- *Ощупать* 4 точки по окружности на одной высоте.
- *Ощупать* элемент сканированием (вид сканирования: сетка).
- *Ощупать* 4 точки, максимально удалённые друг от друга.

В итоге приведённый подход позволяет для выбранного типа деталей простыми методами определить наборы имеющихся КТЭ, которые обеспечат создание последовательности контроля и конкретной схемы построения. При этом учитываются:

- геометрические особенности конкретной детали;
- состав контролируемых параметров;
- влияние значения параметров на конкретный метод обмера; возможности КИМ.

Для контроля изделия необходимо сформировать комбинации примитивов и построить связывающие их элементы, которые непосредственно будут определять тот или иной контролируемый параметр. Таким образом, непосредственно оператором с использованием КИМ выполняется сбор точек, которые образуют элементы.

Далее все расчёты производятся в программном обеспечении путем формирования вспомогательных примитивов или связей между

ними. Далее для контроля партии изделий достаточно установить одну деталь из партии, определить её расположение в системе и провести контроль по заранее сформированной программе.

При закреплении детали на столе КИМ необходимо учитывать, что контроль заданных размеров должен быть произведён с минимальным количеством перезакреплений, а также должен быть обеспечен беспрепятственный подход щупа к контролируемым элементам и использование оснастки, обеспечивающей минимальную трудоемкость измерений.

Деталь должна иметь жёсткую фиксацию, исключаящую её перемещение, нельзя допустить повреждение детали или её деформацию. Если создается ситуация, когда щуп машины не может подойти к измеряемой поверхности, либо касание происходит с нарушением методики измерения, деталь необходимо перезакрепить. При этом появляются дополнительные погрешности, которые необходимо учитывать при расчёте суммарной погрешности измерения.

Процедуры измерения элементов можно отнести к трем типам:

- а) измерение контролируемых элементов;
- б) измерение вспомогательных элементов;
- в) измерение элементов для базирования.

Базирование имеет большую важность, так как является основой автоматизации измерения. Обычно используют стандартную схему базирования «3 – 2 – 1», широко распространенной разновидностью которой является вариация «плоскость – линия – точка».

Как было описано ранее, для контроля изделия оно разбивается на отдельные элементы, именуемые конструкторско-технологическими элементами (сокр. *КТЭ*). Такие элементы соответствуют определённому типу геометрии с набором параметров, которые нужно проконтролировать. Способ их измерения и последующего контроля не меняется от детали к детали, поэтому может быть зафиксирован.

В результате каждую новую деталь можно разбивать на *КТЭ* и строить программу контроля по уже имеющимся программам для деталей со схожим конструктивом. При наличии средств компьютерного анализа геометрии изделия такие элементы могут выделяться автоматически, что позволит создавать программу с минимальным участием оператора.

5.2 Основные этапы создания программы измерения

Создание программы измерения включает ряд действий по работе с КИМ и программного обеспечения КИМ. Основные этапы создания программы измерения (сокр. *ПИ*).

Выбор щуповой системы. В зависимости от сложности детали,

числа измеряемых параметров и размеров геометрических элементов необходимо выбрать конфигурацию щуповой системы. При этом могут варьироваться: число щупов в щуповой системе, их взаимное расположение, положение щупа в пространстве, размеры щупа.

Щуповую систему можно выбрать в ПО КИМ из списка уже имеющихся, если же требуемый вариант отсутствует, то его можно создать. Принципы, по которым выбирается щуповая система:

- *упрощение калибровки*, например, если щуповая система содержит только один щуп, то необходимо откалибровать лишь его, а не пять как у «звезды», что значительно сокращает время работы и увеличивает точность измерений;

- *удобство работы* – одним щупом проще работать, так как в процессе подхода к детали не мешают боковые щупы;

- *удобство работы* – упрощённое задание плоскости безопасности.

Калибровка КИМ. Если на предыдущем этапе инженер-метролог решил создать новую щуповую систему, то перед началом работы с КИМ её необходимо откалибровать. Калибровка производится по специализированной калибровочной сфере особой точности.

Обмер/ощупывание базовых элементов детали. Переопределять базовое выравнивание нужно лишь тогда, когда устанавливается новая деталь или заново закрепляется старая. После выбора щуповой системы, нужно задать базу детали, то есть её положение в пространстве. Базовое выравнивание необходимо для определения расположения детали в рабочем пространстве КИМ.

Стандартная система координат у КИМ состоит из трёх элементов, ограничивающих деталь в пространстве, лишая её всех 6 степеней свободы (при необходимости). КИМ и её ПО работают с точками или их множеством. Каждая точка задается 6 параметрами – это 3 координаты, определяющие расположение точки в пространстве системы координат машины и 3 вектора, которые определяют, как направление касания щупа, так и кривизну поверхности детали.

Достаточно ощупать несколько базовых геометрических элементов, так как остальные элементы ПО КИМ определит по 3D-модели детали и их останется только извлечь. В качестве базовых необходимо выбирать наиболее крупные или протяженные элементы.

Выравнивание. Выравнивание позволяет позиционировать детали в координатном пространстве КИМ. В общем случае деталь может быть развернута относительно этих координат. Чтобы КИМ смогла в ходе автоматического прогона ощупать деталь и точно определить её положение на рабочем столе, перед началом измерений необходимо определить (рассчитать) её положение относительно осей КИМ.

Именно это выполняется во время расчётного выравнивания: система координат детали наклоняется и разворачивается при помощи вычислений до тех пор, пока базовые геометрические элементы детали не совпадут с осями системы координат детали. Для определения полного положения детали в рабочем пространстве необходимо ограничить её по всем шести степеням свободы (три вращательные, и три поступательные).

Обмер/ощупывание контролируемых элементов. Для того чтобы измерить элементы нужно указать ПО КИМ сами элементы и способ их ощупывания. В зависимости от вида элементов, их размеров и набора контролируемых параметров методы их ощупывания могут быть различными.

При наличии САД-модели и выполненном позиционировании (базирование путём выравнивания) КИМ автоматически определяет положение всех элементов, поэтому достаточно задать лишь методику ощупывания. В случае отсутствия САД- модели придётся ощупывать на КИМ каждый измеряемый элемент, чтобы определить его позицию относительно системы координат детали.

Для измерения контролируемых параметров можно использовать как реальные элементы детали, так и создавать мнимые, такие как пересечения или проекции. Также можно задавать мнимые элементы из нескольких уже имеющихся, например создание линии проходящей через центры двух окружностей.

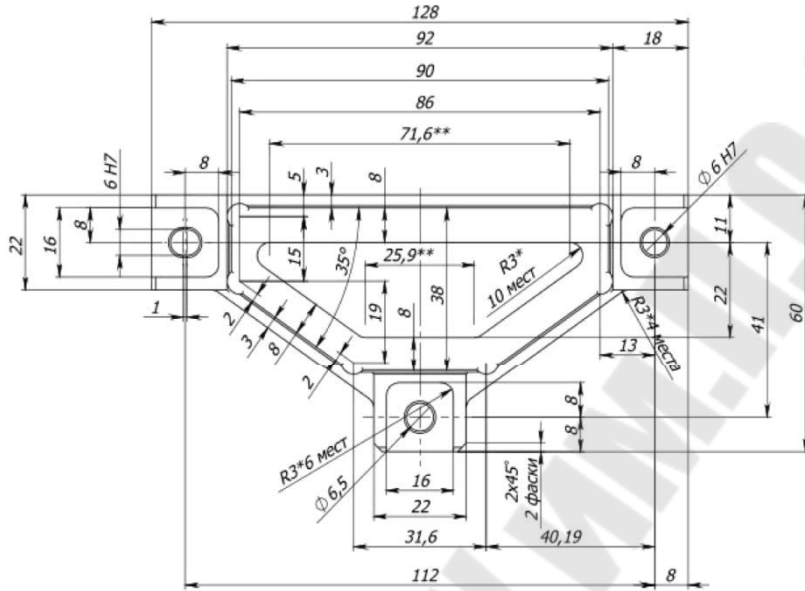
Задание плоскостей безопасности. Для предотвращения столкновения щупа с деталью или с используемой оснасткой задаются плоскости безопасности. Плоскости безопасности представляют собой поверхности виртуального параллелепипеда внутри которого находится деталь вместе со средствами закрепления, за пределы которого в обязательном порядке отходит щуп после измерения каждого элемента детали.

Плоскости безопасности создаются либо заданием их координат вручную, либо снятием виртуальных точек в двух противоположных концах параллелепипеда.

Измерение детали. Данный блок работ включает непосредственно обмер детали и контроль её параметров.

Формирование отчета об измерении. Структура и содержание отчёта (рис.112) задаются в ПО КИМ в зависимости от потребности и пожеланий инженера-метролога.

Результат измерений						
Заказчик:			Номер партии:			
Заказчик			<Part Number>			
Проверка выполнена в:			Имя партии:			
Лаборатория КИМ			инвар_005_все разм			
Комментарий:			Версия программы:			
<Комментарий>			1			
№	Описание	+Верх. доп.	- Ниж. доп.	Измерено	В доп.	Вне доп.



21	128.000 (РАЗМ27-М)	0.000	0.400	127.882	✓	
22	90.000 (РАЗМ29-М)	0.350	0.000	90.046	✓	
23	60.000 (РАЗМ3-М)	0.000	0.300	59.869	✓	
24	38.000 (РАЗМ9-М)	0.250	0.000	38.082	✓	
25	16.000 (РАЗМ12-М)	0.180	0.000	16.127	✓	
26	22.000 (РАЗМ16-М)	0.000	0.210	21.890	✓	
27	16.000 (РАЗМ22-М)	0.180	0.000	16.120	✓	
28	22.000 (РАЗМ19-М)	0.010	0.210	21.911	✓	

Подпись: _____ Проверил: _____ Дата: _____

Рисунок 106 – Отчёт по результатам контроля на КИМ

6 АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И БИОДИЗАЙН

Развитие компьютерного инжиниринга и аддитивных технологий позволило реализовать принципиально новый подход к проектированию и созданию «best-in-class» оптимизированных конструкций – бионическому дизайну – (Simulation & Optimization) – Driven Bionic Design.

Бионический дизайн – это проектирование и производство глобально конкурентоспособной и кастомизированной продукции нового поколения на основе применения технологий компьютерного инжиниринга, оптимизации и передовых производственных технологий, в первую очередь аддитивных технологий, когда получаемые оптимальные «best-in-class» инженерные решения (детали, изделия, конструкции и т. д.) напоминают структуры, встречающиеся в живой природе.

Применение и эффективное сочетание программных систем оптимизации (Computer-Aided Optimization, CAO) и передовых технологий аддитивного производства сделали возможным создание сложных инженерных конструкций и технических систем за время, в миллионы раз меньшее по сравнению с эволюцией или онтогенезом.

Аддитивные технологии, представляющие реальную альтернативу традиционным методам изготовления, позволяют изготавливать конструкции со сверхсложной контурной геометрией и топологией и обеспечивают предсказуемые и повторяемые результаты по размеру, морфологии и распределению пустот.

Изначально технологии 3D-печати были ориентированы на создание пластиковых прототипов для тестирования. На сегодняшний день аддитивное производство – это полноценное производство готовых продуктов, в том числе из металлических, керамических и композиционных материалов.

В промышленности используют стохастические и упорядоченные полые структуры, имеющие малый вес, высокую прочность и термостойкость, большую удельную поверхность и эластичность, низкую плотность. Несмотря на выгодное сочетание разных свойств полых структур производство их традиционными способами – спеканием порошков, литьём в песчаные формы и по полимерным моделям, диффузионной сваркой, гофрированием, штамповкой, гибкой и др. – имеет целый ряд существенных недостатков:

- традиционные методы производства не позволяют сочетать макро- и мезоструктуры, т. е. ячейки различных размеров и топологий;
- в ряде случаев отдельные производственные процессы

(различные виды литья) оказываются слишком затратными в финансовом отношении, а качество конечного продукта недостаточного уровня (большая пористость, низкая жёсткость);

- применительно к стохастическим полым структурам невозможно обеспечить предсказуемые и повторяемые результаты по размеру, морфологии и распределению пустот;
- по упорядоченным полым структурам существующие производственные процессы ограничивают инженеров, поскольку они вынуждены иметь дело лишь с заранее предопределёнными мезоструктурой, материалами и макроструктурой, в результате чего невозможно создать дизайн, максимально адекватный нескольким целям.

Изготовление полых структур с помощью аддитивных технологий позволяет снизить вес конечных изделий и сохранить или получить более высокие показатели механических свойств.

6.1 Подходы к оптимальному проектированию конструкций

Теория оптимального проектирования зародилась ещё в древности, когда наши предки опытным путём находили оптимальные характеристики оружия. В средние века решалась т.н. задача Галилея, где рассматривалось проектирование равнопрочных конструкций. Однако, как самостоятельная научная область, теория оптимального проектирования сформировалась во второй половине XX века. Пик работ по оптимальному проектированию приходится на 70–80-е годы XX века.

В литературе также представлены работы по оптимальному проектированию конструкций в конкретных промышленных областях. Например, работы по оптимальному проектированию конструкций летальных аппаратов, работы по проектированию судовых конструкций (метод суперэлементов). Стоит отметить, что подходы, могут быть обобщены и на задачи оптимизации конструкций из других отраслей.

Сегодня оптимальное проектирование развивается в двух направлениях. С одной стороны, благодаря развитию численных методов решения задач механики сплошной среды, при оптимизации конструкций активно стали использовать такие методы, как топологическая оптимизация, топографическая оптимизация и др. С другой стороны, когда мы говорим об оптимальном проектировании современных промышленных изделий, представляющих собой сложные сборки и подверженных одновременному (или поочерёднему) действию нагрузок различной природы, то на первый план выходят численные

методы компьютерного моделирования и оптимизации, реализованные в компьютерных инженерных системах.

В первую очередь это CAD (Computer-Aided Design), CAE (Computer – Aided Engineering), CAO (Computer-Aided Optimization) системы, а также CAM (Computer-Aided Manufacturing) системы. CAD системы позволяют построить пространственную геометрическую модель объекта практически любой сложности. CAE системы позволяют смоделировать поведение конструкции при воздействии статических и динамических нагрузок различной природы, и во многих случаях, отказаться от использования упрощённых инженерных методик. CAO системы, использующие лучшие достижения в области методов оптимизации, позволяют подобрать оптимальные параметры конструкций для улучшения их эксплуатационных характеристик. CAM системы позволяют смоделировать процесс изготовления изделия и оптимизировать этот процесс. Поэтому, и оптимальное проектирование сложных конструкций сегодня невозможно без использования перечисленных систем. В этом контексте важнейшую роль начинает играть не наличие на предприятии программных средств, реализующих те или иные оптимизационные алгоритмы, а, в первую очередь, организация процесса проектирования, включающая методические и программные средства, позволяющие выстроить процесс проектирования с помощью CAD/CAE/CAO систем наилучшим образом с точки зрения целей предприятия.

Сегодня, использование CAD/CAE/CAO систем на предприятии, как правило, происходит в рамках подхода, который, условно, можно назвать «традиционным» (рисунок 113).



Рисунок 107 – Традиционный подход к проектированию конструкций

В традиционном подходе к разработке конструкции, инженер-конструктор, исходя из своего многолетнего опыта разработки и интуиции, исходя из эксплуатационных нагрузок и ограничений, придумывает концепцию будущей конструкции. Далее, с помощью оцифровки, эта конструкция превращается в CAD модель, по которой затем создаётся прототип изделия. Этот прототип подвергается натурным испытаниям. Параллельно создаётся расчётная CAE модель, которая верифицируется путём сравнения с результатами натурных испытаний, и, в дальнейшем, может использоваться для проверки тех случаев нагружения, которые нельзя воспроизвести в натурных

испытаниях. В случае неудовлетворения каким-либо ограничениям, в том числе, и технологическим, модель вместе с рекомендациями по модификации возвращается конструктору.

Очевидно, что в традиционном подходе основную роль играют опыт и интуиция специалистов конструкторского профиля. Альтернативным подходом к проектированию является проектирование на основе математического моделирования и оптимизации конструкций (Simulation & Optimization Driven Design), которое предполагает существенно более широкое использование вычислительных средств (рис. 114).



Рисунок 108 – Подход к проектированию на основе оптимизации

Данный подход предполагает, что на входе инженер работает только с компоновочным объёмом и требуемыми к изделию характеристиками (для конкретных эксплуатационных режимов) и далее, с помощью применения компьютерных технологий (CAD/CAE/CAO), получает компьютерную модель изделия, удовлетворяющую всем заданным эксплуатационным и технологическим ограничениям. При этом используются как инженерные расчёты (CAE), так и оптимизационные расчёты (CAO). Для получения концепции изделия уже используется не опыт инженера-конструктора, а оптимизационные технологии, в частности, топологическая оптимизация. Нужно отметить, что решение, полученное с помощью оптимизационных технологий, часто оказывается существенно отличающимся от той концепции, которую мог бы предложить инженер-конструктор исходя из своего опыта. Далее, создаётся виртуальный прототип изделия, позволяющий проверить удовлетворение изделия всем эксплуатационным и технологическим ограничениям (в последнем случае могут использоваться САМ технологии). Уже после того, как с помощью вычислительных экспериментов установлено, что изделие удовлетворяет всем заданным ограничениям, создаётся прототип изделия, и проводятся натурные испытания. В случае удовлетворения требованиям натурных испытаний, изделие попадает в производство.

Современные научные работы, посвящённые методологии

оптимального проектирования, также ориентированы на использование современных средств математического моделирования. Так в профильном научном журнале «Онтология проектирования», представлен ряд статей, релевантных по отношению к теме данной работы. В частности, в выпуске 2011 года представлена статья Д.И. Конотопа, где рассматривается онтологический подход к оптимальному проектированию сложных технических объектов (СТО). Данная работа сосредоточена на автоматизации процесса проектирования сложных технических объектов, с применением принципов декомпозиции и синтеза критериев качества объектов, представленных в виде CAD, CAE и CAM – моделей.

В журнале также присутствуют работы, либо целиком посвящённые теоретическим аспектам топологической оптимизации, либо, напротив, общим принципам построения процесса проектирования на основе топологической оптимизации и обучения процессу проектирования.

Сегодня задачу организации проектирования призваны решить PDM (Product Data Management) системы, однако их использование, как на отечественных предприятиях, так и за рубежом, как правило, ограничено хранением и обновлением CAD моделей и сопутствующей им документации.

На сегодняшний день, при разработке конструкций, используются методы структурной и параметрической оптимизации. К структурной оптимизации относятся топологическая оптимизация, оптимизация формы, топографическая оптимизация, оптимизация пластин переменной толщины, оптимизация стрессневых структур и др.

Топологическая оптимизация – это оптимизация, позволяющая оптимальным с точки зрения ресурса, жёсткости и других физико-механических параметров тела образом удалить из тела «лишний» материал (Рисунок 115).

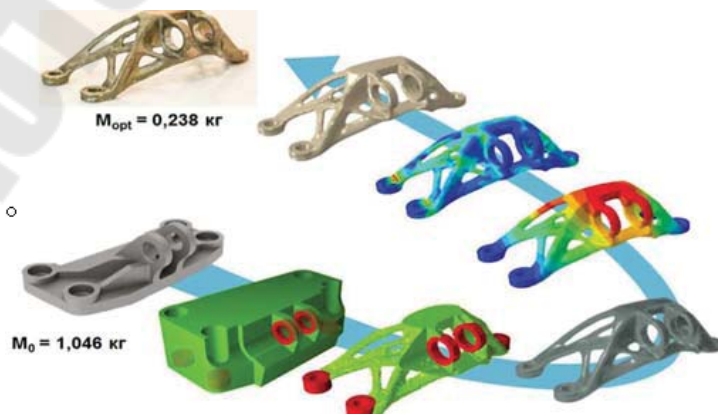


Рисунок 115 – Топологическая оптимизация кронштейна

Оптимизация формы позволяет с помощью варьирования поверхности тела, снизить концентрацию напряжений, возникающих вследствие начальной кривизны поверхности (рис. 116).

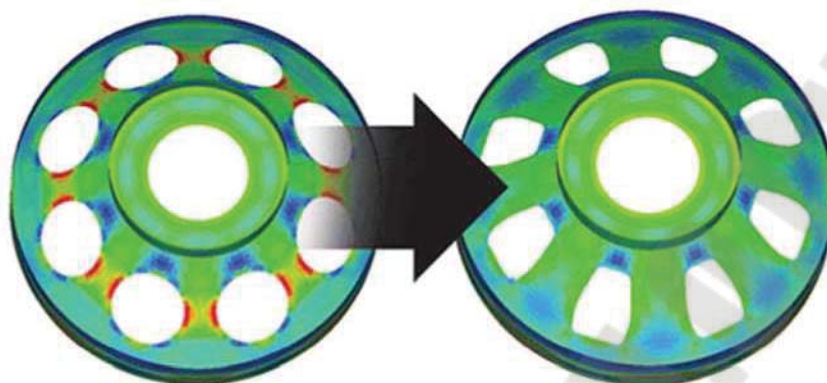


Рисунок 110 – Оптимизация формы

Топографическая оптимизация (рис. 17) – позволяет оптимизировать жёсткость оболочечных структур через оптимальное изменение «рельефа поверхности».

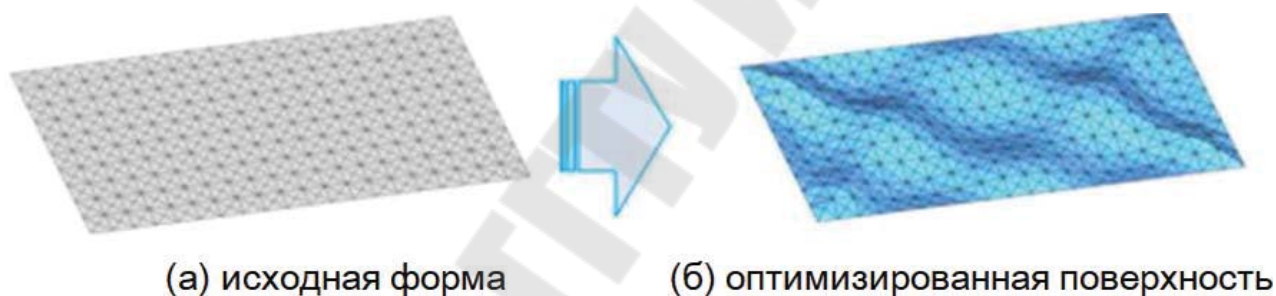


Рисунок 111 – Топографическая оптимизация

Оптимизация пластин переменной толщины (рис. 118), упомянутая в предыдущем параграфе, позволяет найти оптимальное с точки зрения жёсткости распределение толщины пластины.

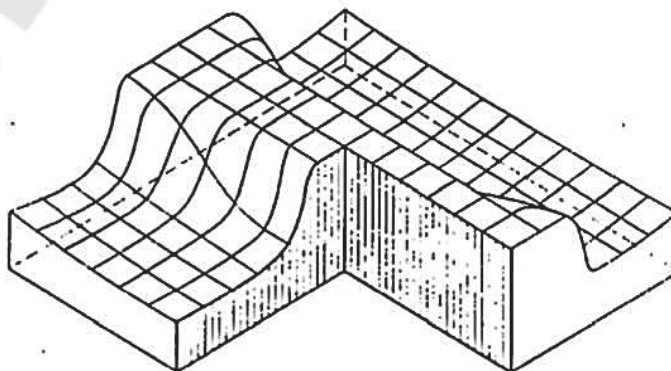


Рисунок 112 – Оптимизация пластин переменной толщины

Оптимизация стержневых структур (truss structures) (рис. 119) также была упомянута в предыдущем параграфе, и позволяет при заданных кинематических и статических граничных условиях, найти оптимальную конфигурацию стержней в заданной области.

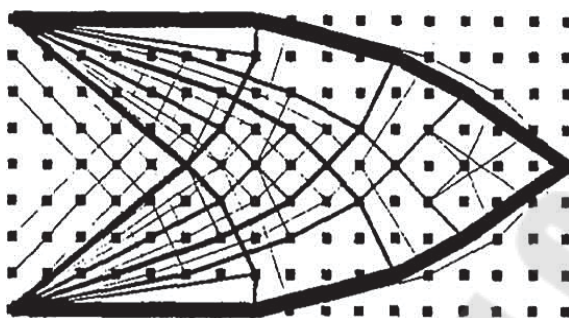


Рисунок 113 – Оптимизация стержневых структур

Параметрическая оптимизация предполагает изменение параметров объекта, и нахождение экстремума целевой функции, зависящей от этих параметров, при заданных ограничениях.

Классификация методов параметрической оптимизации очень обширна. В первую очередь, различают аналитические и численные алгоритмы. Поскольку оптимизацию сложных промышленных конструкций чаще всего невозможно выполнить аналитически, то в данной работе будут в основном рассмотрены численные методы. Причём именно те методы, которые работают с системой как с чёрным ящиком – ничего не зная о системе, по набору входных и выходных параметров, они шаг за шагом двигаются к нахождению оптимального решения. Методы параметрической оптимизации делятся на аналитические (такие, как метод множителей Лагранжа) и численные. Численные методы параметрической оптимизации делятся на случайные, детерминированные и смешанные (такие как Response Surface Methods, RSM), однокритериальные и многокритериальные, требующие вычисления только значения целевой функции и требующие вычисления производных целевой функции по переменным проектирования и т. д. Подробный обзор методов параметрической оптимизации приведён в следующем параграфе.

Все перечисленные методы структурной оптимизации основаны на методе конечных элементов. Параметрическая мультидисциплинарная оптимизация конструкций, где значения целевой функции извлекаются из расчётов в CAE системах, также невозможна без использования метода конечных элементов.

Метод конечных элементов – наиболее распространённый численный метод решения задач механики деформируемого твёрдого тела, реализованный в таких известных системах инженерного анализа

(САЕ системах), как ANSYS, ABAQUS, LS-DYNA, NASTRAN и др.

Метод конечных элементов состоит в дискретизации области определения искомых функций (перемещений, температуры и т. д.) и аппроксимации искомых функций базисными, кусочно-непрерывными функциями. Значения искомых функций в узлах конечных элементов находятся с помощью подстановки аппроксимирующих функций в соответствующий функционал (например, функционал потенциальной энергии системы) и решении СЛАУ, возникающей в результате применения условия экстремальности записанного функционала.

Метод конечных элементов, реализованный в САЕ системах, позволяет находить решение задач механики деформируемого твёрдого тела для составных конструкций сложной геометрической формы, подтверждённых одновременному действию механических, тепловых, электромагнитных и других нагрузок.

В настоящей работе метод конечных элементов выбран в качестве базового, для решения задач механики деформированного твёрдого тела, а также для использования его при структурной и параметрической оптимизации конструкций.

6.2 Методы топологической оптимизации

6.2.1 Постановка задачи топологической оптимизации

Задача топологической оптимизации, в классической постановке – задача нахождения оптимального, с точки зрения жесткости, распределения материала в заданной области при заданных нагрузках (рисунок 150). При этом область может быть разделена на пространство оптимизации и на неизменяемые (фиксированные) подобласти, которые оптимизация затронуть не должна.

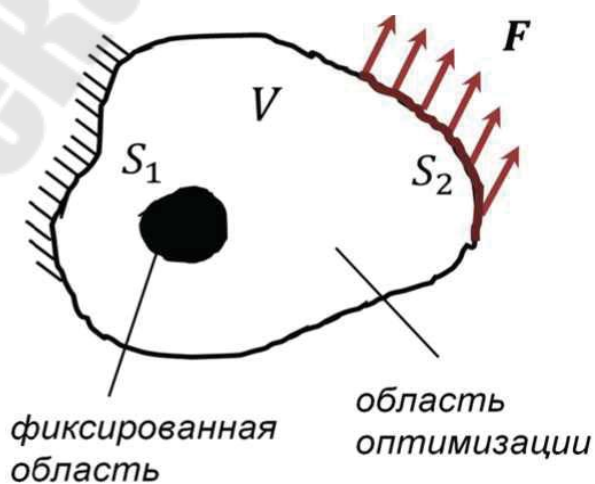


Рисунок 114 – Постановка задачи топологической оптимизации.

Для упругого деформируемого тела, подверженного действию кинематических и статических граничных условий (рисунок 8), можно ввести понятие работы внешних сил:

$$A^{ex}(\mathbf{u}) = \int_V \rho \mathbf{K} \cdot \mathbf{u} dV + \int_{S_2} \mathbf{F} \cdot \mathbf{u} dS$$

Здесь \mathbf{K} – вектор объёмных сил, \mathbf{F} – вектор силы, распределённой по поверхности S_2 , и \mathbf{u} – вектор перемещений точек тела. Для рассматриваемого тела можно ввести понятие потенциальной энергии деформации

$$\rho_\tau \psi(\boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{u})) = \frac{1}{2} \boldsymbol{\sigma} \cdot \boldsymbol{\varepsilon} = \frac{1}{2} ({}^4\mathbf{C} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}) \cdot \boldsymbol{\varepsilon}$$

Здесь ψ – свободная энергия, $\boldsymbol{\sigma}$ – тензор напряжений, $\boldsymbol{\varepsilon}$ – тензор деформаций, ${}^4\mathbf{C}$ – тензор упругости (тензор четвёртого ранга), ρ_τ – плотность тела в окрестности рассматриваемой материальной точки распределённой по поверхности S_2 , и \mathbf{u} – вектор перемещений точек тела.

Условие равновесия тела будет эквивалентно условию равенства работы внешних сил на элементарных кинематически допустимых перемещениях и элементарному приращению потенциальной энергии деформации вследствие этой работы:

$$A^{ex}(\delta \mathbf{u}) = \delta(\rho_\tau \psi(\boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{u})))$$

Максимизация жёсткости тела в смысле наилучшей отработки заданных на тело воздействий эквивалентна минимизации работы внешних сил:

$$\min_{\mathbf{u} \in U, E} A^{ex}(\mathbf{u})$$

при ограничениях:

$$A^{ex}(\delta \mathbf{u}) = \delta(\rho_\tau \psi(\boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{u}))), \forall \delta \mathbf{u} \in U$$

$$V \leq \alpha V_0, 0 < \alpha < 1$$

Здесь к условию равновесия добавилось условие на результирующий объём тела. Данное ограничение обусловлено одной из целей топологической оптимизации: нахождение максимальной жёсткости системы при заданном материальном ресурсе.

Для нахождения перемещений тела при заданных нагрузках и удовлетворению уравнению равновесия применяется метод конечных элементов. Поэтому требуется переформулировать постановку задачи оптимизации в терминах метода конечных элементов:

$$\min_{\mathbf{u} \in U, E_e} \mathbf{f}^T \mathbf{u}$$

при ограничениях:

$$K(E_e)\mathbf{u} = \mathbf{f}, E_e \in E_{\text{доп}},$$

$$K = \sum_{e=1}^N K_e(E_e), \sum_{e=1}^{N_e} v_e = V = \alpha V_0, 0 < \alpha < 1$$

6.2.2 Определение переменных проектирования

В результате проведения топологической оптимизации, для каждой точки тела должно быть определено, есть ли в ней материал или нет. При наличии материала модуль упругости в точке равен $E = E_0$, при отсутствии материала – $E = 0$. Таким образом, переменные проектирования – упругие свойства материала в каждой точке, их бесконечно много, и изменяются они дискретно. Конечно-элементная постановка позволяет свести бесконечное количество переменных проектирования к конечному числу. Далее, для применения методов математического программирования, требуется преобразование дискретного варьирования свойств материала в каждом конечном элементе к непрерывному варьированию. В процессе развития методов топологической оптимизации предлагались различные решения параметризации свойств материала, такие как наличие в каждой точке композиционной структуры или перфорированной структуры (рисунок 121).

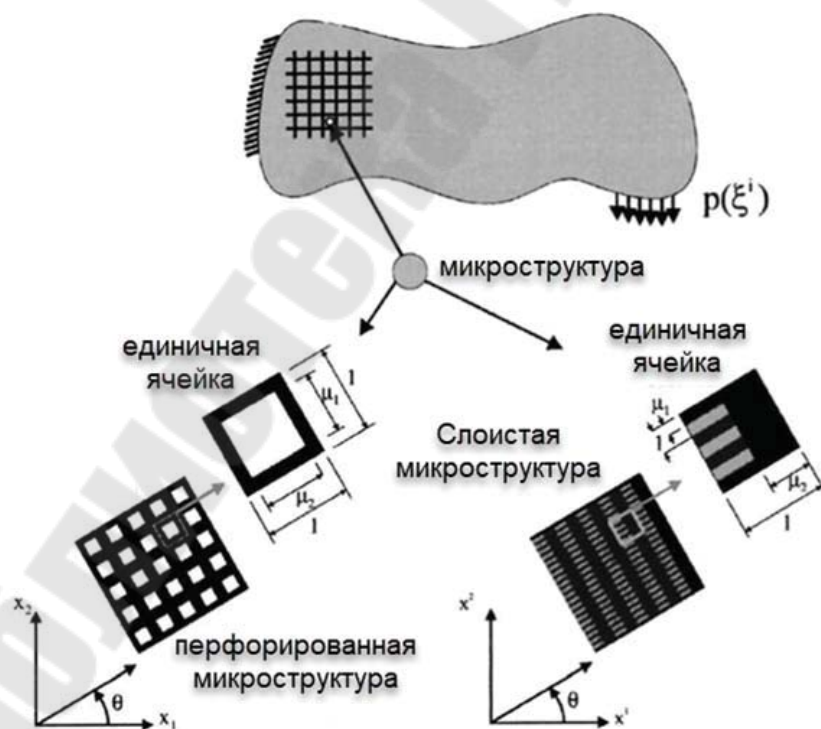


Рисунок 115 –
Параметризация
материала
с помощью
перфорированной
и композитной
структуры

В случае использования композитной структуры, варьирование упругих свойств достигается за счёт изменения соотношения мягкой и твёрдой фаз в композиционном материале. В случае использования перфорированной структуры – за счёт изменения размеров отверстия в перфорированной ячейке. При использовании обоих методов в результате оптимизации в каждой точке становятся возможными не только состояния “есть материал”/ “нет материала”, но также и промежуточные состояния, имеющие ясную физическую интерпретацию. При этом от угла ориентации ячейки зависит направление осей анизотропии в каждой точке тела. Однако, появление промежуточных состояний, хотя и подкрепляется ясной физической интерпретацией, для двух описанных способов параметризации вносит дополнительную трудность – крайнюю сложность изготовления получаемой конструкции. В большей степени это касается многоуровневых слоистых структур, но и изготовление меняющихся от точки к точке по ориентации и по размерам ячеек также не представляется целесообразным.

6.2.3 Метод выполнения критерия оптимальности

Одним из широко используемых алгоритмов топологической оптимизации является метод выполнения критерия оптимальности (Optimality Criteria).

В левой части данного выражения стоит взвешенная с коэффициентом потенциальная энергия деформации, которая, исходя из полученного условия, должна быть одинакова в каждой точке оптимального решения. В этом и состоит критерий оптимальности, который должен выполняться для каждой точки (отсюда и название метода). Предположим, что на первом шаге мы удовлетворили ограничению на объём, уменьшив фиктивную плотность в каждом конечном элементе в соответствии с заданной объёмной долей. Тогда, решив задачу теории упругости и посчитав взвешенную энергию в каждой точке тела, мы получим, что, в каких-то точках взвешенная энергия больше, а в каких-то меньше (рис. 122):

Поскольку, руководствуясь соображениями из теории упругости, мы полагаем, что в точках с высокой энергией деформации – недостаточная жёсткость, а в точках с низкой энергии, напротив, – избыточная жёсткость, мы применяем следующий алгоритм для изменения плотности в этих точках:

$$\rho_{K+1} = \begin{cases} \max\{(1 - \xi)\rho_K, \rho_{min}\} & \text{если } \rho_K B_K^\eta \leq \max\{(1 - \xi)\rho_K, \rho_{min}\}, \\ \min\{(1 - \xi)\rho_K, 1\} & \text{если } \min\{(1 - \xi)\rho_K, 1\} \leq \rho_K B_K^\eta \\ \rho_K B_K^\eta & \text{в других случаях} \end{cases}$$

Здесь ρ_k обозначает значение плотности на шаге итерации k , и B_k задаётся выражением:

$$B_k = \Lambda_k^{-1} p \rho(x)^{p-1} E_{ijkl}^0 \varepsilon_{ij}(u_k) \varepsilon_{kl}(u_k)$$

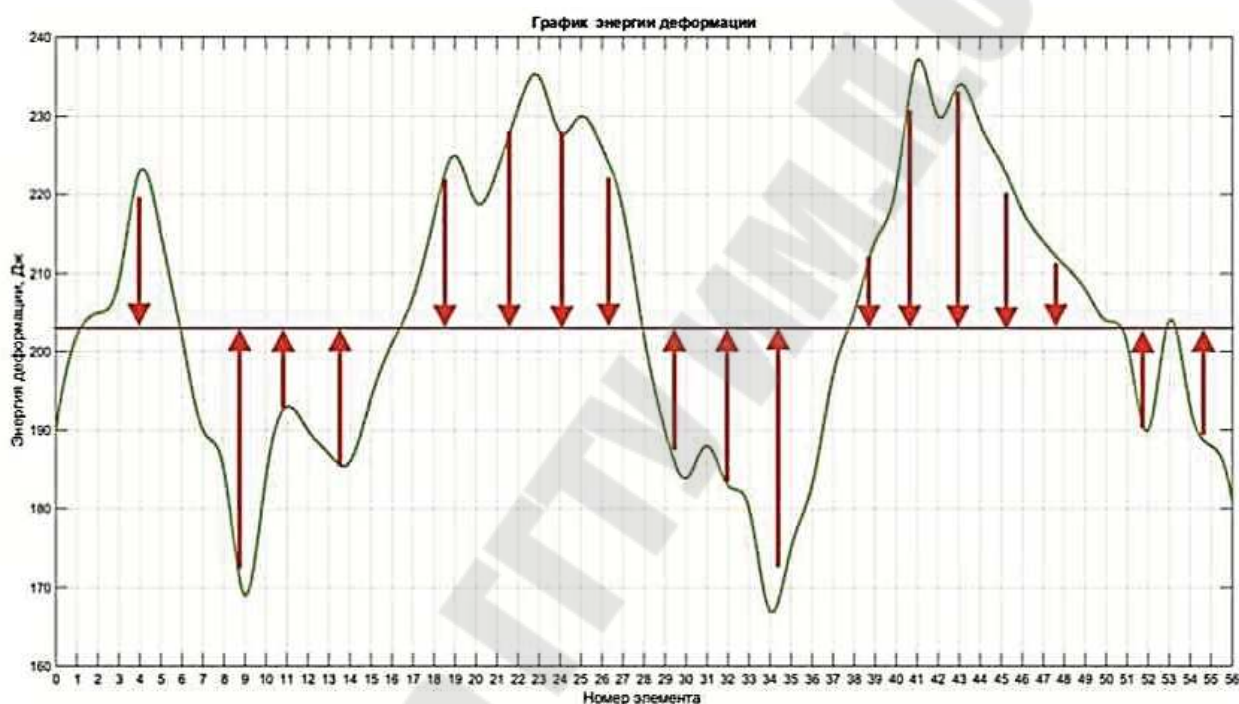


Рисунок 116 – Распределение величины взвешенной энергии деформации в объёме тела (для наглядности представлен одномерный случай)

где u_k это поле перемещений на шаге итерации k , которое определяется из уравнения равновесия с помощью метода конечных элементов и зависит от ρ_k . Приведённая схема работает на интуитивно понятном уровне и добавляет материал, в области со взвешенной энергии деформации, большей, чем Λ (то есть, когда $B_k > 1$), и удаляет его, если энергия ниже этого значения. Добавление и удаление материала происходит в рамках границ, определённых для плотности p . Таким образом, материал добавляется в более мягких областях и удаляется в более жёстких. Естественно, после изменения значения плотности, картина распределения внутренней энергии меняется – следовательно, процесс добавления и удаления материала является итерационным.

Параметры η и ξ контролируют изменения, которые могут произойти на каждом шаге итерации могут быть регулируемыми для эффективности метода. Значение плотности на следующем шаге ρ_{k+1} зависит от текущего значения множителя λ_k Лагранжа, который, в свою очередь, определяется из условия удовлетворения ограничению на объём. Объём V на шаге $k + 1$ определяется через сумму всех плотностей, и является монотонной невозрастающей функцией от λ_k . Следовательно, нахождение λ_k , удовлетворяющему ограничению на объём, легко может быть осуществлено с помощью численной процедуры, в частности, с помощью метода бисекций. Значения η и ξ выбираются экспериментально, для того, чтобы получить быструю и стабильную сходимость итерационной схемы. Для коэффициентов η и ξ это, как правило, 0.5 и 0.2, соответственно.

Метод "оптимального критерия" очень похож на концепцию «полностью нагруженной конструкции» (Fully Stress Design, FSD), где для стержневой структуры критерием оптимальности при минимизации массы является достижение предела текучести в каждом стержне. Тем не менее, важно отметить, что в методе Optimality Criteria удельная энергия деформации постоянна в районах с промежуточной плотностью, в то время как она отличается в элементах с плотностью $\rho = \rho_{\min}$ и $\rho = 1$.

Построенный алгоритм хоть и является эвристическим, тем не менее, даёт хорошие практические результаты, и поэтому используется в некоторых коммерческих системах. Однако он не применим, если в качестве целевой функции и ограничений рассматриваются другие физические величины: перемещения, напряжения и т. д. Также метод не работает с технологическими ограничениями, такими как ограничения на максимальный размер элемента. Для учёта этих ограничений требуется применение более общих методов из области нелинейного программирования. Одним из таких методов является метод скользящих асимптот.

6.2.4 Эволюционные алгоритмы: ESO, AESO, BESO

Метод эволюционной структурной оптимизации (Evolutionary Structural Optimization, ESO) был предложен в 1992 г., 1993 г. Основная идея этого метода основана на простой эвристической концепции – материальное тело в процессе оптимизации может приобрести оптимальную форму за счёт постепенного удаления элементов с наименьшими напряжениями (Hard Kill). Развитие этой идеи состоит в определении значения энергии деформации в каждой точке, и удаления элементов с наименьшей энергией деформации.

Метод аддитивной эволюционной структурной оптимизации

(Additive Evolutionary Structural Optimization, AESO), напротив, добавляет элементы в наиболее нагруженные области, т. е. те области, где энергия деформации – максимальна. После того, как элемент добавлен, он уже не может быть удалён. В отличие от метода ESO, в котором из полноценной структуры мы постепенно удаляем материал, для AESO, наоборот, точкой отсчёта является полностью отсутствующая структура.

Двунаправленная эволюционная структурная оптимизация (Bi-directional evolutionary structural optimization, BESO) – была предложена в 1998 году, и представляет собой объединение ESO и AESO. Как следует из названия, в BESO не только удаляются «ненагруженные» элементы, но также, и появляются новые элементы там, где энергия деформации максимальна.

Изначально предложенные эволюционные алгоритмы в явном виде не содержали в себе полноценной формулировки задачи оптимизации, включающей определение целевой функции и ограничений. Современная формулировка BESO, предложенная в 2009 году, уже не содержит этих недостатков. Все три метода предполагает использование метода SIMP для параметризации свойств материала. С учётом использования метода SIMP, в BESO задача формулируется следующим образом:

$$\min \frac{1}{2} \mathbf{u}^T \mathbf{K} \mathbf{u}$$

$$\sum_{e=1}^{N_e} \rho_e v_e = V = \alpha V_0, 0 < \alpha < 1, \rho_e = \rho_{min} \text{ или } \rho_e = 1$$

Отметим, что, если в исходном BESO алгоритме речь идёт о полном удалении элементов, то последняя формулировка предполагает, что удаление элемента происходит за счёт задания в этом элементе пренебрежимо малых упругих свойств, соответствующих $\rho_e = \rho_{min}$ (Soft Kill).

При решении сформулированной задачи BESO работает в том же ключе, что и алгоритм Optimality Criteria, с той разницей, что BESO оперирует дискретными значениями плотности. Соответственно, взвешенная энергия деформации в конечном элементе w_e может принимать только два значения:

$$w_e = \begin{cases} \frac{1}{2} \mathbf{u}_e^T \mathbf{K}_e^0 \mathbf{u}_e, \rho_e = 1 \\ \frac{\rho_{min}^{p-1}}{2} \mathbf{u}_e^T \mathbf{K}_e^0 \mathbf{u}_e, \rho_e = \rho_{min} \end{cases}$$

Алгоритм строится таким образом, чтобы для элементов с меньшей энергией деформации менять значение плотности с 1 до ρ_{mj} , n , а для элементов с большей энергией деформации, наоборот, с ρ_{mj} до 1. Какое количество элементов должно быть изменено определяется, как и в методе Optimality Criteria, через удовлетворение ограничения на объём.

Данные алгоритмы были использованы в промышленных задачах Японии и Катара, и в целом, показывают результаты, сравнимые с методом Optimality Criteria и ММА. Однако, данные методы, как и Optimality Criteria – работают с ограниченным количеством целевых функций и ограничений, и нуждаются в дальнейшей доработки с точки зрения стабильности в получаемых результатах, поскольку являются эвристическими.

6.2.5 Оптимизация формы

Для оптимального проектирования конструкций недостаточно только топологической оптимизации. Как правило, после проведения топологической оптимизации мы имеем дело не с окончательным видом конструкции, а с качественным распределением материала в заданном пространстве. Это распределение должно быть обработано в специализированных программных средствах для получения конструкции с конкретными геометрическими размерами, и корректно сопрягающейся с прилегающими к оптимизируемому элементу конструкции прилегающими деталями. После этих операций полученная конструкция локально может не удовлетворять заложенным при топологической оптимизации ограничениями, в частности, в конструкции могут появиться зоны концентрации напряжений. Оптимизация формы – это оптимизация, позволяющая снизить концентрацию напряжений в заданных областях.

Постановка задачи оптимизации формы приведена на рис. 123. Цель оптимизации – минимизация напряжений в области Ω (вблизи границы, ограниченной точками А и В, кривизна которой и обуславливает возникшие напряжения). На рисунке Γ – варьируемая граница, Ω – область варьирования границы Γ . Γ^* – искомая оптимальная граница, Ω^* – та её часть, которая лежит внутри области варьирования, Γ_s – та часть, которая лежит на границе области варьирования. В ведённых обозначениях, постановка задачи оптимизации выглядит следующим образом:

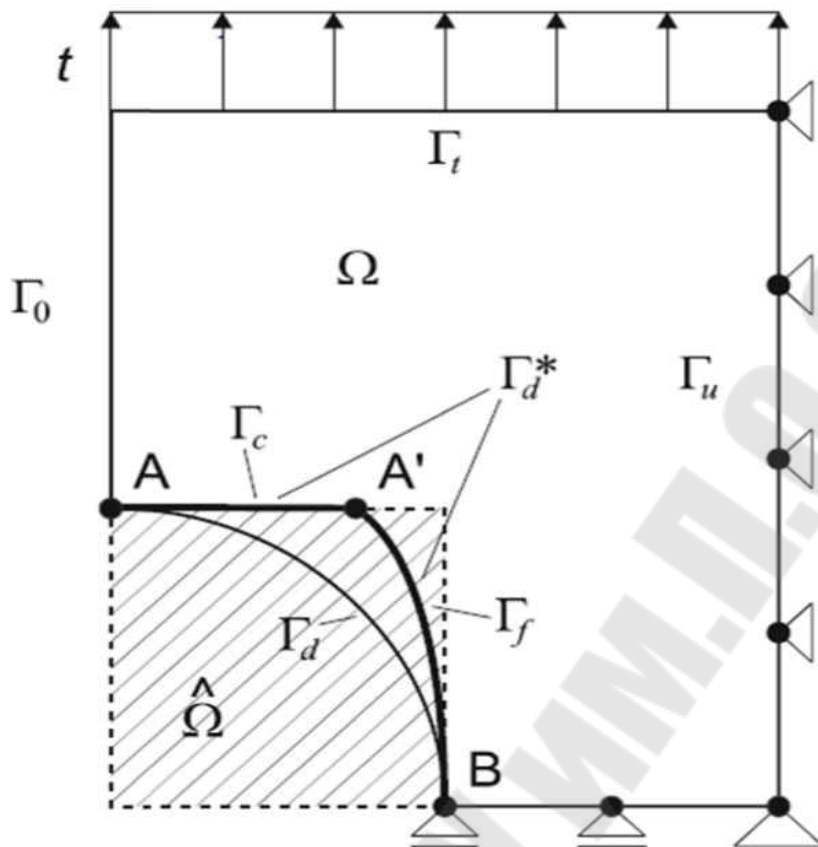


Рисунок 117 – Постановка задачи оптимизации формы

$$\min \max_{\Gamma_d} \|\underline{\tau}\|$$

при условиях: $\Gamma^* \in \hat{\Omega}$

$$\text{и } \int d\Omega - V_0 = 0$$

где $\|\underline{\tau}\|$ – норма тензора напряжений (как правило, используется норма Мизеса).

Существует несколько подходов к решению данной задачи. Первый состоит в параметризации геометрических размеров оптимизируемой конструкции. Например, если модель строится в САД-системе и, если в качестве оптимизируемой конструкции выступает нагруженная пластина с эллиптическим отверстием (рис. 124), то параметрами могут выступать полуоси эллипса а и б. На каждой итерации будут выбираться различные значения а и б, геометрия будет перестраиваться в САД системе, далее, в автоматическом режиме будет строиться конечно-элементная модель, решаться конечноэлементная задача и вычисляться максимальное напряжение на границы.

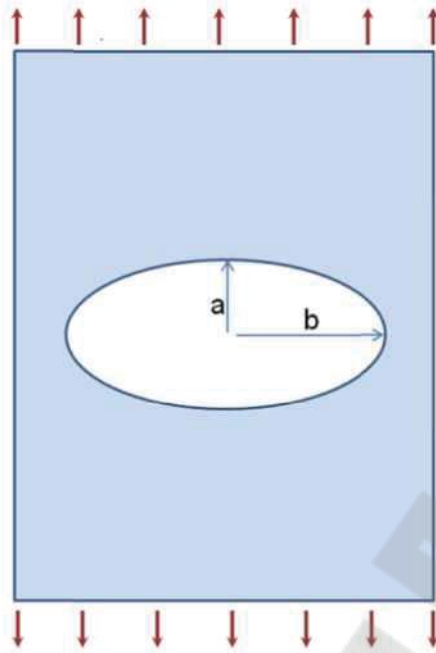


Рисунок 118 – Варьирование геометрических размеров нагруженной пластины

Оптимальные значения a и b в этом случае будут находиться с помощью методов параметрической оптимизации, описываемых в следующем разделе. Параметризация геометрических размеров предполагает использование в качестве методов оптимизации случайные или эволюционные алгоритмы, методы, работающие с поверхностью отклика, методы математического программирования (использующие значения производных).

Очевидным недостатком параметризации геометрических характеристик является неприменимость данного метода к сложным конструкциям. Кроме того, необходимость автоматического создания конечно-элементной модели также не позволяет рассматривать в качестве объекта оптимизации сложные конструкции. Автоматическое создание конечно-элементной модели, к тому же, предполагает использование тетраэдральной конечно-элементной сетки, что может приводить к неточности при вычислении напряжений.

Параметризация геометрии в сложном случае, как это обычно бывает, если геометрия создана на основе топологической оптимизации, может быть выполнена с помощью использования сплайнов, в частности – базисных сплайнов (B-сплайнов). Переменными проектирования в этом случае выступают контрольные точки сплайнов, смещение которых также должно приводить к изменению конечно-элементной сетки.

Также существует метод параметризации геометрии с помощью разложения по базисным формам. В качестве базисных форм могут

использоваться как формы, полученные из деформированного состояния тела под действием характерных нагрузок, так и собственные формы конструкции. Тогда, варьирование поверхности будет осуществляться через изменение координат узлов конечно-элементной сетки в соответствии с комбинацией базисных форм.

Все описанные методы являются, как уже было сказано, методами параметрической оптимизации, которые работают с рассматриваемой конструкцией, в некотором смысле, как с чёрным ящиком. Это означает, что, например, при использовании методов математического программирования, все производные целевой функции должны быть вычислены с помощью разностных схем, на основании нескольких значений целевой функции, и не могут быть получены из математических соотношений, описывающих целевую функцию.

Поэтому данные методы оказываются неэффективными для большого количества параметров и для конечно-элементных моделей большой размерности.

Наибольшими возможностями по изменению локальной кривизны поверхности при использовании достаточно точной конечно-элементной сетки обладает способ непосредственного изменения координат узлов конечных элементов. Подходы, которые координату каждого узла рассматривают в качестве параметров, оказываются в данном случае неэффективными, т. к. предполагают использование, опять же, методов параметрической оптимизации, которые существенно ограничивают количество варьируемых параметров.

Практической ценностью, в конечном счёте, обладают те подходы, которые позволяют независимо и одновременно варьировать координаты узлов конечно-элементной сетки. Один из таких методов был предложен в 1990 году, и был основан на наблюдениях за ростом деревьев – утолщение в стволе и в ветках дерева происходит в зонах повышенных напряжений. Однако предложенный алгоритм, получивший название CAO, оказался неэффективным из-за необходимости решения связанной термонапряжённой задачи и использования полученных перемещений для изменения формы варьируемой поверхности. Кроме того, данный алгоритм исключает возможность учёта технологических ограничений.

На сегодняшний день одним из наиболее распространённых методов при оптимизации формы, является метод, основанный на выполнении некоторого критерия оптимальности (как это было в методе Optimality Criteria при решении задачи топологической оптимизации).

Данный метод позволяет одновременно и независимо варьировать положение узлов конечно-элементной сетки, и именно он успешно используется в составе таких коммерческих систем оптимизации, как,

например, DS Simulia Tosca Structure.

6.3 Методы параметрической оптимизации при заданном в явном виде функционале

Задача параметрической оптимизации – задача нахождения экстремума функции одной или нескольких переменных при заданных или отсутствующих ограничениях.

$$\min_{x \in R^n} f_0(x)$$

$$\text{при ограничениях: } f_i(x) \leq \hat{f}_i, i = \overline{1, \dots, m}$$

$$\underline{x}_j \leq x_j \leq \bar{x}_j, j = \overline{1, \dots, n}$$

Варьируемые параметры X_j называются переменными проектирования. Строго говоря, топологическая оптимизация также является параметрической оптимизацией, где в качестве переменных проектирования выступают, например, (при использовании SIMP модели материала), значения фиктивных плотностей в каждом конечном элементе. Однако, в случае топологической оптимизации, таких переменных проектирования может быть порядка нескольких миллионов (в зависимости от размерности КЭ модели), и ключевым фактором для решения этой задачи с, помощью, например, метода скользящих асимптот является возможность вычисления всех частных производных целевой функции по переменным проектирования на основании только одного конечно-элементного расчёта.

Однако, зачастую, про оптимизируемую функцию ничего заранее сказать нельзя. Можно взять конкретный набор параметров, и вычислить значение целевой функции для данного набора параметров. Тогда, например, оценка частных производных целевой функции по переменным проектирования, потребует проведения большого количества дополнительных расчётов, сопоставимым с количеством переменных проектирования. Так работают внешние системы параметрической оптимизации: на вход программной системе подаются значения параметров, далее на основании этих параметров, аналитически или численно вычисляется значение целевой функции (например, с помощью решения задачи теории упругости методом конечных элементов), и программная система уже работает только с результатом вычисления. На основании проведённых вычислений, система оптимизации должна сделать выбор о том, какие значения параметров использовать на следующих шагах, чтобы в итоге, найти точку экстремума функции.

Именно такие задачи мы будем относить к задачам параметрической оптимизации. Методы решения таких задач можно

разделить на несколько основных групп: градиентные методы, неградиентные методы и генетические методы.

6.4 Градиентные методы

Градиентные методы – методы, при которых следующая точка при поиске экстремума вычисляется на основании информации о частных производных функции по переменным проектирования в текущей точке. Вычисление частных производных по переменным проектирования, как правило, происходит на основе вычисления значения целевой функции в начальной точке и точке, выбранной с небольшим приращением по выбранной переменной проектирования. Поэтому, при большом количестве переменных проектирования, для нахождения всех частных производных (например, при использовании метода наискорейшего спуска), может потребоваться большое количество вычислений. Особенно критичным это становится в тот момент, когда вычисление функции подразумевает решение ресурсоёмкой конечно-элементной задачи.

К градиентным методам относятся такие известные алгоритмы, как метод наискорейшего спуска (Gradient Descend), метод Ньютона, метод последовательного квадратичного программирования (SQP), метод скользящих асимптот (ММА, был рассмотрен в предыдущей главе) и др.

В методе наискорейшего спуска на каждой итерации через разностные соотношения вычисляются частные производные функции по переменным проектирования:

$$\frac{\partial f}{\partial x_i} \approx \frac{f(x_1, \dots, x_i + \Delta x_i, \dots, x_n) - f(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n)}{\Delta x_i}$$

Далее в направлении, противоположном направлению градиента функции, проводится одномерный поиск:

$$f(\alpha) = f(x_0) - \alpha \cdot \nabla f \cdot \Delta x$$

Для решения задачи одномерного поиска могут быть использован метод золотого сечения. В некоторых случаях, из-за особенностей поведения целевой функции (например, когда поверхность целевой функции вытянута в одном из направлений вблизи точки экстремума), метод наискорейшего спуска может оказаться неэффективным. В этом случае более эффективным оказывается метод сопряжённых градиентов (рис. 126) (или, метод сопряжённых направлений), который позволяет корректировать направление поиска в зависимости от соотношения норм градиентов на предыдущем и текущем шаге (рис. 125).

Иллюстрация работы метода показана на рис. 125:

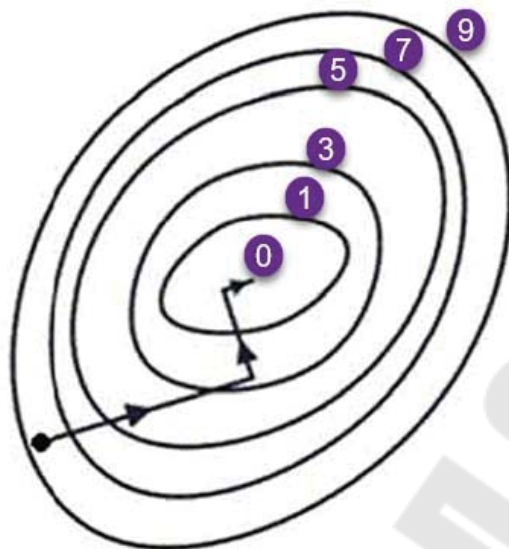


Рисунок 119 – Иллюстрация работы метода наискорейшего спуска

Одним из таких методов является метод последовательного квадратичного программирования (Sequential Quadratic Programming, SQP).

Отметим, что градиентные методы часто позволяют найти локальный минимум, в то время как для много экстремальных задач нужны методы, позволяющие избежать попадания в локальный минимум. К таким методам относятся, в частности, генетические алгоритмы параметрической оптимизации.

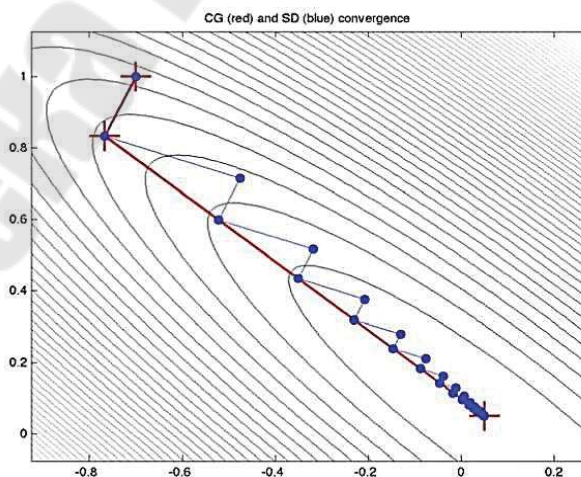


Рисунок 120 – Иллюстрация работы метода сопряженных градиентов (красная линия) в сравнении с методом наискорейшего спуска (синяя линия)

Отдельный класс методов, использующих информацию о производных, составляют методы нелинейного программирования

6.5 Негradientные методы

К неgradientным методам относятся методы, алгоритм которых, с одной стороны, не основан на случайном выборе (за исключением, разве что, начального приближения), и с другой стороны – не основан на вычислении производных. К таким методам относится метод перебора, метод покоординатного спуска, симплексные методы (в частности, метод Нелдера–Мида).

Метод перебора (поиск путём перебора по сетке) – наиболее простой метод оптимизации, предполагающий дискретизацию области варьирования параметров, например, с помощью равномерной сетки. В этом случае, поиск оптимального решения сведётся к перебору всех возможных вариантов, и нахождению минимального значения, удовлетворяющего всем ограничениям. К сожалению, очевидным недостатком этого метода является его неэффективность при работе с ресурсоёмкими задачами, характеризующимися, как правило, большим количеством переменных проектирования, большой длительностью расчёта одной реализации, достаточно мелкой сеткой.

В методе покоординатного спуска (рис. 127) решение многомерной задачи оптимизации сводится к последовательному решению нескольких одномерных задач оптимизации. Каждая одномерная задача представляет собой поиск экстремума функции в направлении одной из координатных осей. Найденная точка экстремума является отправной точкой для поиска в другом координатном направлении.

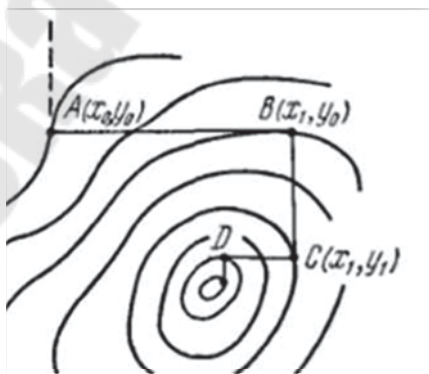


Рисунок 121 – Иллюстрация работы метода покоординатного спуска

Алгоритм Нелдера–Мида состоит в построении многогранника в пространстве переменных проектирования, с числом вершин, на единицу большим, чем количество переменных проектирования. Значение целевой функции вычисляется для каждой вершины, после чего из найденных значений выбирается наибольшее (в случае поиска

максимума функции – наименьшее). Точка, в которой достигается наименьшее значение – исключается из рассмотрения, а следующая точка выбирается с помощью заранее определённых процедур: отражения, растяжения и сжатия (рис. 128).

Преимуществом алгоритма Нелдера-Мида является то, что, в отличие от градиентных алгоритмов, он может использоваться, в том числе, в случае негладких функций и зашумлённых функций. Нужно отметить, что представленный алгоритм разработан для нахождения безусловного экстремума. Для решения задачи с ограничениями используется модификация алгоритма Нелдера-Мида. Например, в коммерческой системе параметрической оптимизации Esteco modeFrontier, модифицированный для учёта ограничений алгоритм Нелдера-Мида носит название SIMPLEX.

Алгоритм Нелдера-Мида является обобщением симплексного алгоритма Спендли, Хекста и Химсворта, в котором используется только регулярные симплексы. Регулярным симплексом называется в данном случае множество $n+1$ равноудалённых точек в n -мерном пространстве.

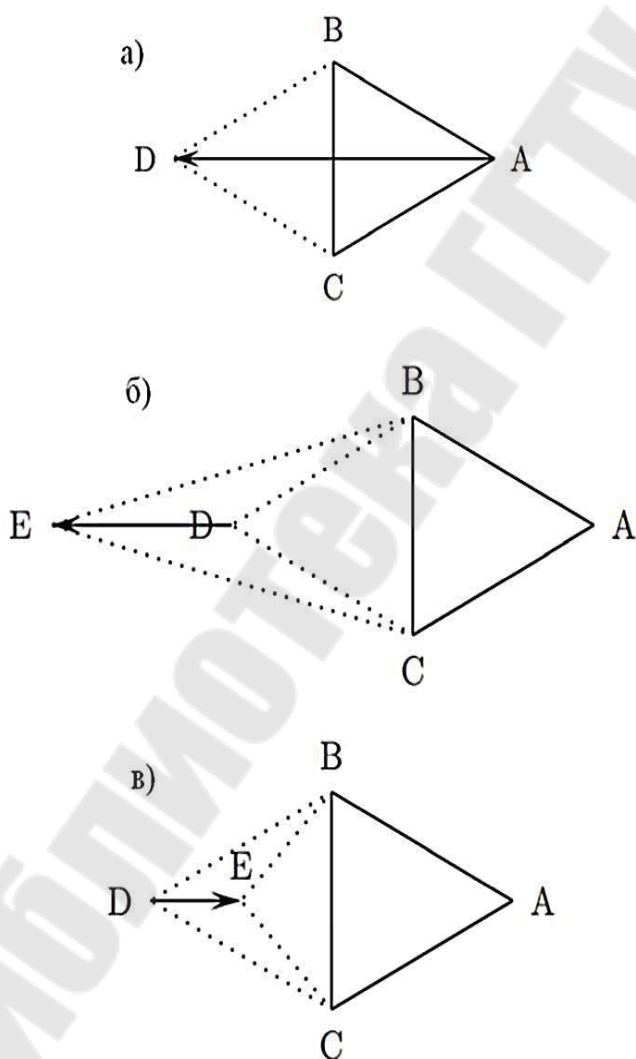


Рисунок 122 –
Иллюстрация операций
алгоритма Н. – М.:
a – отражения; *б* – растяжения;
в – сжатия

6.6. Генетические алгоритмы параметрической оптимизации

Генетические алгоритмы параметрической оптимизации – это стохастические алгоритмы, основные принципы которых заимствованы из теории естественного отбора. Данные алгоритмы, как правило, содержат следующие операции: генерация популяции, скрещивание, мутация, отбор.

Генерация популяции состоит в нахождении значения целевой функции в p случайных точках пространства переменных проектирования. Далее происходит мутация: например, выбираются три точки, и новая точка получается прибавлением к одной разности координат двух других. Далее происходит скрещивание новообразованной точки и исходной точки: создаётся новая точка в пространстве переменных проектирования, у которой, например, часть координат совпадает с координатами исходной точки, а часть – с координатами мутировавшей точки. Далее происходит отбор – если потомок, к примеру, оказывается лучше родителя, то родитель исключается из рассмотрения, и в следующей популяции его заменяет дочерняя точка.

Различные генетические алгоритмы оптимизации, как правило, отличаются друг от друга правилами и последовательностью операций создания популяции, скрещивания, мутации и отбора.

Одним из таких алгоритмов является генетический алгоритм многокритериальной оптимизации MOGA (Multi Objective Genetic Algorithm), различные модификации которого представлены в системе modeFrontier. Многокритериальность означает наличие нескольких целевых функций $f_i (i = 1 \dots \eta_i)$, и решение такой задачи ищется в виде т. н. множества Парето. Множество Парето определяющегося следующим образом: решение задачи многокритериальной оптимизации называется оптимальным (для определённости, максимальным) по Парето, если не существует другого x , такого что $f_i(x) > f_i(x^*)$ для всех $i = 1 \dots t$ и $f_j(x'') > f_j(x^*)$ хотя бы для одного индекса j .

Модификация алгоритма MOGA, реализованная в modeFrontier – MOGA II включает следующие шаги:

На первом шаге MOGA-II выбирается начальная популяция P размерности N . Множество оптимальных решений (элита) E не содержит ни одного элемента ($E=0$). На каждой итерации вычисляется $P' = P \cup E$. Если мощность множества P' больше мощности множества P , из множества P' случайным образом удаляется необходимое для равенства мощностей количество точек. Вычисляется эволюция множества $P' - P''$, с помощью применения всех операторов оригинального алгоритма MOGA. Определяется «приспособленность»

элементов множества P'' , т. е. определяются те точки, значения целевой функции в которых лучше, чем значения точек множества P' . Все претендующие на оптимальность по Парето точки P'' копируются во множество E . Из E удаляются все повторяющиеся и заведомо не оптимальные по Парето точки. Если размер E больше чем N , из E случайным образом удаляется необходимое количество точек. Процедура повторяется, начиная с шага 2, при этом P'' рассматривается в качестве нового P . Данный метод применим как к задачам многокритериальной оптимизации, так и к задачам однокритериальной оптимизации.

6.7. Обзор современных программных систем проектирования, компьютерного инжиниринга и оптимизации в контексте их применения к оптимальному проектированию

6.7.1 Обзор CAD систем

Основное назначение CAD (Computer Aided Design) систем, или, по-другому, САПР систем состоит в создании двумерных и трёхмерных моделей (представлений) элементов конструкций и конструкционных сборок. На сегодняшний день, наиболее востребованные мировые CAD системы – это Siemens NX, DS SolidWorks, PTC Creo, др.

В целом все эти системы похожи между собой, и позволяют шаг за шагом, через моделирование простых объектов и их сопряжение – создавать сложные сборки. Некоторые перечисленные системы содержат в себе программные модули, предназначенные для конечно-элементного расчёта проектируемых конструкций, имеющие, как правило, ограниченные функциональные возможности. Данные системы сами по себе не могут обеспечить проверку выполнения целевых показателей системы при воздействии различных эксплуатационных нагрузок, за исключением узкого круга характеристик. Однако именно CAD модели вместе с конструкторской документацией обеспечивают наиболее наглядное 2D и 3D представление сложной конструкции

6.7.2 Обзор CAE систем

Назначение CAE (Computer Aided Engineering) систем – расчёт физикомеханического поведения конструкций под действием различных нагрузок.

Системы ANSYS, DS Simulia Abaqus, LS-Dyna, MSC Nastran, Siemens NX Nastran в основном предназначены для решения задач механики деформируемых твёрдых тел с помощью метода конечных элементов. Ключевые возможности этих систем – создание конечно-элементных моделей (дискретизация 2D и 3D областей), задание нагрузок, задание материалов, проведение расчётов, и анализ полученных результатов.

Некоторые системы, такие как MSC Adams, позволяют моделировать поведение твердотельных систем, движение которых описывается в рамках уравнений динамики движения твёрдого тела.

Отдельные модули упомянутых CAE-систем позволяют решать задачи из смежных с механикой деформируемого твёрдого тела дисциплин. Например, программный модуль ANSYS CFX предназначен для решения задач гидроаэродинамики с помощью метода конечных объёмов. LS-DYNA предусматривает возможность решения задач движения частиц с помощью SPH метода.

CAE-системы являются необходимым звеном при оптимальном проектировании, поскольку позволяют смоделировать поведение проектируемой конструкции практически для любых условий нагружения, и определить, выполнены или нет требуемые целевые показатели и эксплуатационные ограничения.

6.7.3 Обзор CAO систем

CAO (Computer aided optimization) системы предназначены для проведения оптимизационных расчётов. Системы могут быть как внешними и подключаться к сторонним CAE системам, так и содержать свой собственный модуль для расчёта конструкции, которая подвергается оптимизации.

CAO системы делятся на системы параметрической оптимизации, такие как, Esteco modeFrontier, Noesis Optimus, Datadvance pSeven, Altair HyperStudy, и на системы структурной оптимизации, Altair Optistruct, DS Simulia Tosca. Структурная оптимизация подразделяется на топологическую оптимизацию, топографическую оптимизацию и оптимизацию формы.

Системы параметрической оптимизации работают с расчётным объектом, в определённом смысле, как с чёрным ящиком, выдавая на вход в CAE систему значения параметров и получая на выходе из CAE системы значения целевых функций и ограничений. Поэтому параметрическая оптимизация в таких системах возможна для относительно небольшого количества варьируемых параметров (не более 30).

Системы структурной оптимизации позволяют одновременно изменять свойства всех представленных в модели конечных элементов и узлов (их количество может варьироваться от нескольких тысяч до нескольких миллионов) за счёт того, что необходимую информацию о целевых функциях и ограничениях система оптимизации узнает из физического смысла задачи.

Внешняя система топологической оптимизации DS Simulia Tosca Structure совместима с системами ANSYS, ABAQUS, MSC NASTRAN и в этом смысле более универсальна, чем Altair Optistruct. Однако Altair

Optistruct обладает существенно более высоким уровнем быстродействия за счёт упрощённой процедуры обмена данными между системой оптимизации и CAE – системой.

CAO системы, в особенности системы топологической оптимизации, являются мощным и незаменимым инструментом для достижения заданных целевых показателей, как для отдельных элементов конструкций, так и для небольших конструктивных сборок. Системы топологической оптимизации на начальном этапе подсказывают наиболее рациональное распределение материала для сложныхборок, исходя из удовлетворения интегральным целевым показателям (весу, жёсткости, собственным частотам и т. д.).

6.7.4 Обзор PDM систем

PDM (Product Data Management) системы предназначены для организованного хранения и управлением всей информации о разрабатываемом изделии. К наиболее известным мировым PDM системам можно отнести TeamCenter (Siemens), Enovia (Dassault Systems), Windchill (PTC).

Как правило, эти системы совмещены с каталогизированным в соответствующей CAD системе представлением разрабатываемых конструкций. Для каждой конструкции и для каждого отдельного элемента конструкции хранится информация о последней версии изделия, различные документы с техническими требованиями и результатами натурных испытаний.

Данные системы настраиваются под специфику работы конкретного предприятия, и сотрудники имеют сетевой доступ ко всей конструкторской документации и трёхмерным моделям. Как правило, данные системы используются конструкторами для документооборота и отслеживания версий разрабатываемых конструкций. В контексте оптимального проектирования данные системы полезны, прежде всего, с точки зрения командной работы конструкторов, инженеров и технологов при проектировании сложных конструктивныхборок.

6.8. Построение математической модели и определение переменных проектирования

Для построения конечно-элементной модели используется встроенный в ANSYS генератор конечных элементов. Однако, для решения задачи топологической оптимизации (в конечно-элементной постановке) необходимо, чтобы в каждом конечном элементе свойства материала зависели от параметра «фиктивной плотности». Для этого каждому конечному элементу присваивается свой собственный материал, и структура становится гетерогенной (рис. 129)

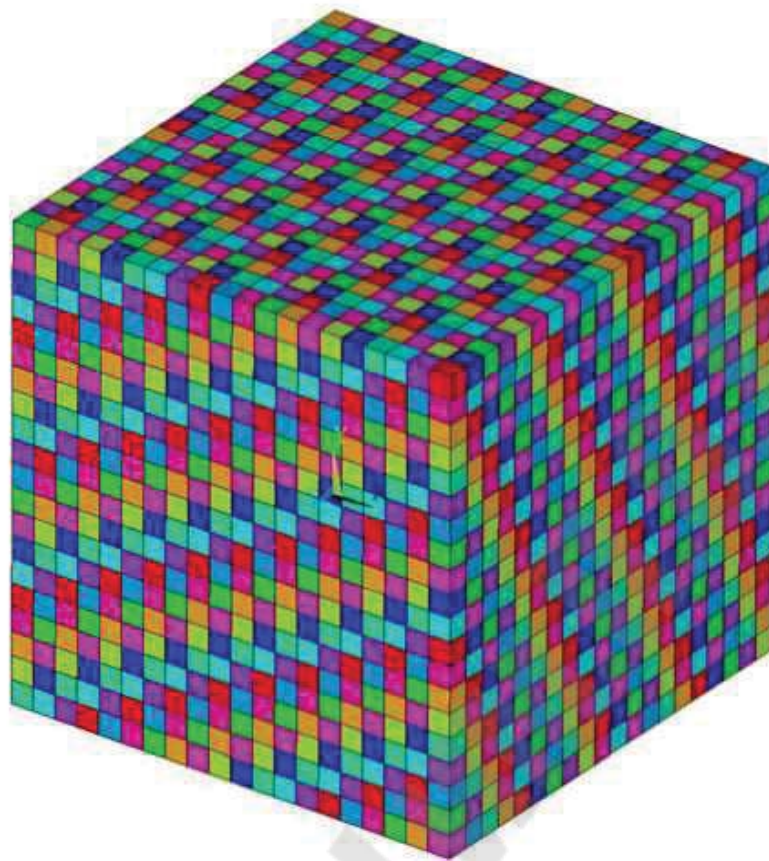


Рисунок 123 – Различие материалов для отдельных конечных элементов

Далее, значение фиктивной плотности в каждом элементе (а следовательно, и модуля Юнга каждого материала) варьируется независимо, в соответствии с методом скользящих асимптот

Метод скользящих асимптот в приложении к задаче топологической оптимизации

Задача нахождения максимальной жёсткости системы (минимизации податливости) сводится к задаче минимизации функционала работы внешних сил. В качестве ограничений выступают условие равновесия системы под действием внешних нагрузок и условие условия ограничения на объём (ресурс). С учётом применения метода параметризации SIMP задача оптимизации формулируется следующим образом:

Для решения поставленной задачи с помощью метода скользящих асимптот, необходимо построение аппроксимирующих функций, которое подразумевает определение частных производных целевой функции по переменным проектирования. В случае минимизации податливости системы при ограничении на объём, эти производные связаны с потенциальной энергией деформации в каждой точке.

6.8.1 Вопросы постобработки результатов оптимизации

В полученном в результате оптимизации решении каждый

конечный элемент имеет своё значение плотности. Следующий шаг – преобразование изначальной конечно-элементной модели с разными значениями плотностей – в оптимизированную модель, с которой может работать конструктор. Первый шаг – исключение конечных элементов, имеющих значение параметра плотности меньше, чем заданный порог. В результате этого шага мы получаем оптимизированную форму, границы которой имеют выраженный негладкий рельеф, соответствующий форме конечных элементов. Для обеспечения возможности работы конструктора с полученной ступенчатой формой, к результатам оптимизации применяется алгоритм Laplacian Smoothing, предназначенный для сглаживания полигональной сетки. Автором работы данный алгоритм был реализован в несколько шагов:

- построению поверхностной конечно-элементной сетки, покрывающей объёмную сетку, оставшуюся в результате исключения элементов с низкими областями
- триангуляцию полученной поверхности через деление прямоугольных поверхностных элементов на треугольные конечные элементы
- итерационного процесса смещения узлов в соответствии с алгоритмом Laplacian Smoothing

В исходном алгоритме Laplacian Smoothing, на каждой итерации алгоритма каждый узел поверхности смещается в направлении осреднённого положения смежных узлов

Пример работы алгоритма для постобработки результатов топологической оптимизации кронштейна приведён на рис. 130.

Таким образом, сначала строится конечно-элементная модель элемента конструкции, затем каждому конечному элементу присваивается собственный материал, выполняется конечно-элементный расчёт, находятся значения производных, которые затем фильтруются, после чего находится следующее значение фиктивных плотностей с учётом выполнения условия ограничения на объём. Процесс повторяется до достижения сходимости результатов, после чего производится обработка результатов алгоритмом Laplacian Smoothing.

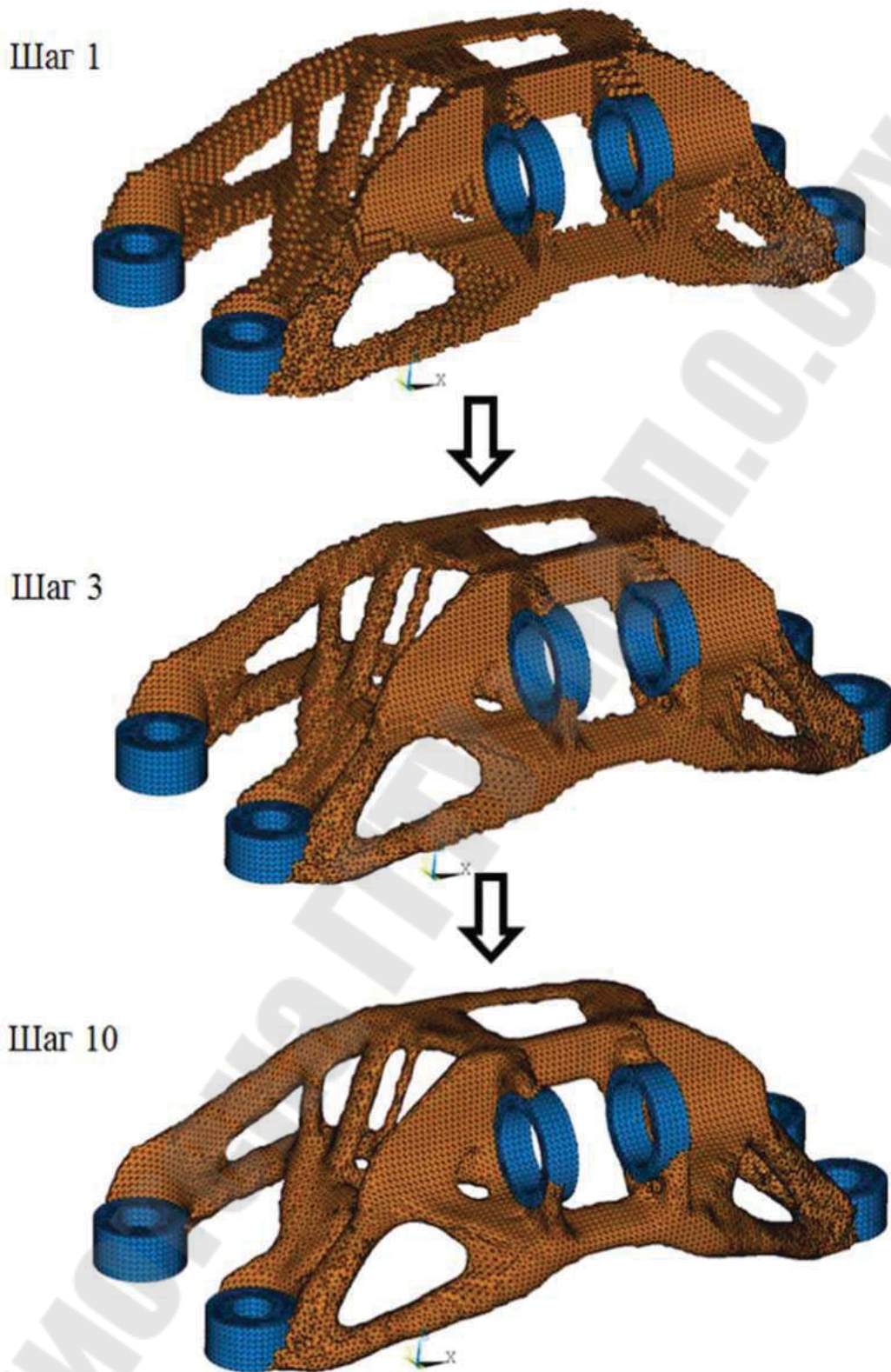


Рисунок 124 – Применение алгоритма Laplacian Smoothing



Рисунок 125 – Алгоритм решения задачи топологической оптимизации

В рамках традиционного подхода к проектированию, конструктором сначала строится САД модель конструкции, затем расчётчик создаёт САЕ модель (для подтверждения натурных испытаний и для учёта тех случаев нагружения, которые нельзя воспроизвести в натурных испытаниях). САО системы в этой схеме играют вспомогательную роль, как правило, позволяя незначительно модифицировать элементы конструкции в рамках параметрической оптимизации. Например, локально увеличить толщины балочных элементов для снижения напряжений в них.

Однако для оптимального проектирования конструкций порядок

использования этих систем должен быть реорганизован и в основу разработки конструкции должны быть положены методы топологической и параметрической оптимизации и, соответственно, САО системы. Общая концепция методики оптимального проектирования конструкций приведена на рисунке 132.

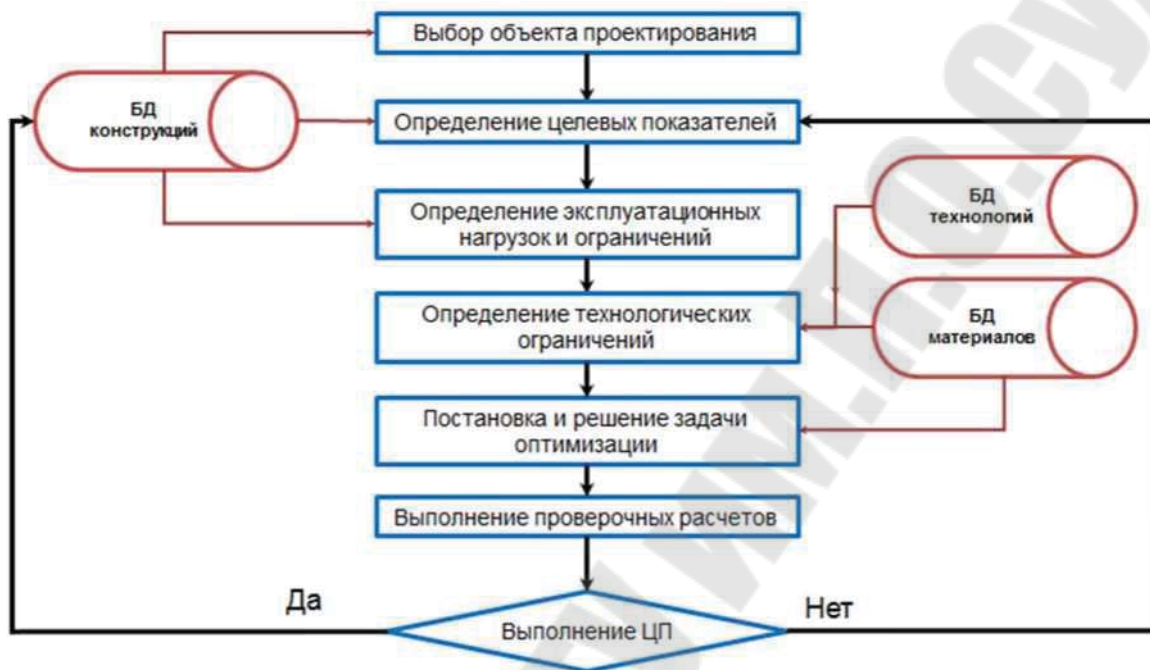


Рисунок 126 – Методика оптимального проектирования конструкций

Приведённая схема отражает следующие основные шаги методики оптимального проектирования конструкций

Выбор объекта проектирования. На первом этапе выбирается объект проектирования. Это может быть как отдельный элемент конструкции, так и сложная сборка, вплоть до рассмотрения конечного изделия целиком. Уже на этом этапе появляется необходимость каталогизированного представления всей конструкционной сборки. Таким образом, появляется необходимость наличия базы данных конструкций, из которой и осуществляется выбор объекта.

Определение целевых показателей. Оптимальное проектирование конструкций – это проектирование изделия под заданные характеристики (именно эти требуемые характеристики и принято называть целевыми показателями или критериями качества). На самом верхнем уровне, когда рассматривается изделие целиком – речь идёт, как правило, об интегральных характеристиках. Если проектируется изделие гражданского назначения, речь идёт о потребительских качествах (например, шумоизоляция автомобиля), если военного – о тактико-технических характеристиках (например, дальность полёта ракеты). Если же проектируется конкретная деталь в составе сложной

сборки, то для этой детали в качестве целевых показателей выступают её физикомеханические характеристики – масса, жёсткость, прочность, собственные частоты. Ясно, что интегральные характеристики составного изделия определяются физико-механическими характеристиками его частей. Поэтому целевые показатели всего изделия и целевые показатели его составных частей – оказываются зависящими друг от друга и при проектировании изделия не могут рассматриваться независимо. Для перехода от целевых показателей всей системы к целевым показателям отдельных частей системы, и обратно должны быть использованы принципы декомпозиции и агрегирования. Конкретная техническая реализация этих принципов индивидуальна для каждой конструкции, и часто эти принципы носят эвристический характер. Однако ясно, что расчёты всей сборки и расчёты отдельных деталей должны происходить в рамках иерархических связей, определённых в каталогизированной базе данных конструкций, и целевые показатели системы должны обновляться при изменении целевых показателей отдельных частей. Таким образом, одним из элементов предлагаемой методики является организация на основе математического моделирования связей между целевыми показателями системы и её частей в рамках каталогизированной базы данных конструкций

Определение эксплуатационных нагрузок и ограничений. Эксплуатационные нагрузки для изделия в целом, как правило, могут быть определены исходя из условий эксплуатации изделия и возможных происшествий. Для космического аппарата это перегрузки, действующие в различных направлениях при взлёте и посадке, а также ударные воздействия при падении на землю. Для автомобиля это, опять же, различные ударные нагрузки, описанные, например, в нормативных документах, предъявляющих требования к пассивной безопасности. При этом при расчётах и оптимизации отдельного элемента конструкционной сборки нагрузки на него будут складываться как из общих для всей системы нагрузок (например, инерционных), так и из интерфейсных нагрузок, приходящих на элемент конструкции со стороны прилегающих конструктивных элементов. Трудность заключается в том, что интерфейсные нагрузки зачастую являются неизвестными заранее и, в общем случае, могут зависеть в том числе и от конфигурации проектируемого элемента. Данные нагрузки в настоящей методике также предлагается определять с помощью математического моделирования в рамках каталогизированной базы данных конструкций.

Определение технологических ограничений. Для того чтобы обеспечить возможность производства проектируемой конструкции и

свести к минимуму итерационный процесс взаимодействия конструкторов и расчётчиков с технологами, при оптимизации конструкции и при внесении изменений в конструкцию вручную требуется учитывать ограничения, накладываемые предстоящим технологическим процессом. Различные программные системы оптимизации, в частности системы топологической оптимизации, позволяют учесть при оптимизации ряд стандартных ограничений, обусловленных параметрами технологического процесса. Например, задать максимальную допустимую толщину стенки оптимизируемого изделия. Однако, для того, чтобы задать адекватные технологическому процессу на предприятии ограничения, инженеру нужны данные о параметрах этих процессов. Соответствующие данные целесообразно структурировать в базу данных технологий и оборудования, использующихся на предприятии. В этой базе данных должны содержаться ограничения на технологический процесс, которые инженер может учесть в виде ограничений при оптимизации, если данные ограничения реализованы в использующихся САО системах. Помимо базы данных технологий, инженеру также необходима база данных материалов, использующихся на предприятии. В первую очередь, база данных необходима для использования свойств материалов при выполнении расчётов элементов конструкций, а также для накладывания ограничения на используемые материалы в зависимости от выбранной технологии изготовления.

Постановка и решение задачи оптимизации. На основе информации о целевых показателях, нагрузках и ограничениях на конструкционную сборку или отдельный элемент конструкции формулируется задача оптимизации. В зависимости от накладываемых технологических и эксплуатационных ограничений, а также от имеющихся в арсенале у предприятия программных систем, выбирается тип оптимизационного расчёта. Это может быть как структурная оптимизация (топологическая, топографическая, оптимизация формы), так и параметрическая оптимизация. Определяются целевые функции, ограничения и переменные проектирования. Далее решается математическая задача оптимизации (САО-расчёт), из которой определяется наиболее рациональное решение в рамках заданных ограничений.

Здесь нужно отметить, что при переходе от простого элемента конструкции к конструкционной сборке, постановка и решение задачи оптимизации одного из перечисленных типов может быть слишком ресурсоёмким в силу больших размерностей конечно-элементных моделей, и в силу большого числа переменных проектирования. В этом случае целесообразно применение многовариантной оптимизации,

когда целевые показатели всей сборки достигаются за счёт оптимизации её отдельных элементов. Оценка влияния оптимизированного элемента конструкции на целевые показатели всей конструкционной сборки в этом случае осуществляется с помощью математического моделирования (САЕ – расчёта)

Выполнение проверочных расчётов. В случае если решение, удовлетворяющее всем целевым показателям рассматриваемого элемента конструкции, найти удалось, необходимо осуществить (в случае топологической оптимизации) постобработку модели и окончательную проверку на предмет удовлетворения оптимизированного элемента конструкции всем наложенным ограничениям для всех случаев нагружения. При этом проверке должен быть подвергнут не только отдельный элемент конструкции, но и те элементы конструкции (вплоть до конструкционной сборки целиком), на которые могли повлиять изменения оптимизируемом элементе конструкции.

Если в результате оптимизации не удаётся найти решение, удовлетворяющее всем целевым показателям, необходимо либо использовать оптимизацию другого типа, либо изменить постановку задачи оптимизации, перейдя с уровня отдельного элемента конструкции на более высокий уровень.

Сформулированная методика является достаточно общей, и техническая реализация каждого пункта методики будет зависеть от отрасли, набора программного обеспечения и решаемой задачи. Количество целевых показателей для современной конструкционной сборки (например, для автомобиля) может достигать нескольких десятков тысяч. При этом в начале проектирования может быть известно не более 30 % целевых показателей, остальные же становятся известны в процессе проектирования.

Однако, несмотря на общность, данная методика позволяет выявить ключевые составляющие программного инструмента, который позволит реализовать данную методику и с помощью которого, может быть осуществлено проектирование конструкций под заданные целевые показатели. Программная система должна включать базу данных материалов, базу данных технологий, базу данных конструкций и привязанные к этой базе данных расчётные средства, включая инструменты решения задачи оптимизации. Программная система должна позволять отслеживать целевые показатели элементов конструкций. В основе программной системы должны быть параметрическая и структурная оптимизация. Частный случай структурной оптимизации – топологическая оптимизация, безусловно, должна быть основным инструментом при оптимальном

проектировании, поскольку позволяет предсказать, как качественно должен выглядеть (в смысле распределения жёсткости) элемент конструкции, для удовлетворения всем заданным ограничениям при воздействии известных эксплуатационных нагрузок.

7 ПРИМЕНЕНИЕ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ЛИТЬЕ МЕТАЛЛОВ

Одной из самых сложных в массовом производстве отливок является корпус блока цилиндров автомобиля (рис. 133). Для изготовления первого опытного образца традиционными методами требуется не менее 6-ти месяцев, причём основные временные затраты приходится на создание модельной оснастки для литья «в землю». Использование для этой цели технологии Quick-Cast (выращивание литейной модели из фотополимера на SLA-машине с последующим литьём по выжигаемой модели) сокращает срок получения первой отливки с полугода до двух недель (рис. 134).

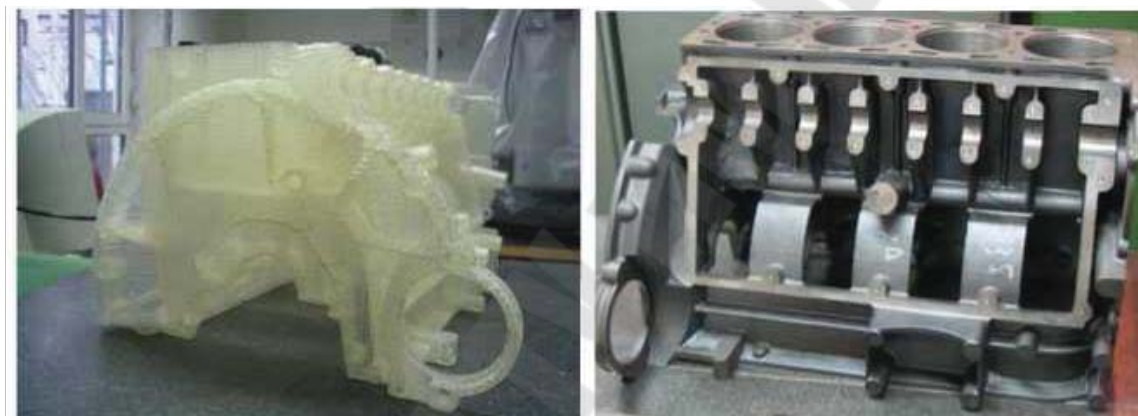


Рисунок 127 – Модель и отливка блока цилиндров из чугуна



Рисунок 128 – Фрагменты песчаной формы.

Эта же деталь может быть получена менее точной, но вполне пригодной для данных целей технологией – литьём в выращенные песчаные формы. Согласно этой технологии, в изготовлении литейной модели вообще нет необходимости: выращивается «негатив» детали – форма. Форма для литья такой крупной детали, как блок цилиндров,

выращивается фрагментами, затем собирается в опоке и производится заливка металла. Весь процесс занимает несколько дней. Значительная часть «обычных» литейных изделий, не имеющих специальных требований по точности литья или внутренней структуры, может быть получена в виде готовой продукции в течение нескольких дней: прямое выращивание восковой модели (1 день); формовка+сушка формы (1 день); прокалка формы и собственно литье (1 день); итого: 3–4 дня с учётом подготовительно-заключительного времени. Практически все автомобильные и авиастроительные компании промышленно развитых стран имеют в арсенале своего опытного производства десятки установок для аддитивного производства, обслуживающих задачи НИОКРа. Более того, эти машины начинают использоваться, как «обычное» технологическое оборудование в единой технологической цепи и для серийного производства.

7.1 Аддитивные технологии и быстрое прототипирование

Additive Fabrication (AF) или Additive Manufacturing (AM) – принятые в англоязычной технической лексике термины, обозначающие аддитивный, т. е. «добавлением», метод получения изделия (в противоположность традиционным методам механообработки путём «вычитания» (subtractive), материала из массива заготовки). Они употребляются наряду со словосочетанием Rapid Prototyping (или RP-технологии) – Быстрое Прототипирование, но имеют более общее значение, точнее отражающее современное положение. Можно сказать, что Rapid Prototyping в современном понимании является частью AF-технологий, «отвечающей» за собственно прототипирование методами послойного синтеза. AF- или AM – технологии охватывают все области синтеза изделий, будь то прототип, опытный образец или серийное изделие.

Суть AF-технологий, как и RP-технологий, состоит в послойном построении, послойном синтезе изделий – моделей, форм, мастер-моделей и т. д. путём фиксации слоёв модельного материала и их последовательного соединения между собой различными способами: спеканием, сплавлением, склеиванием, полимеризацией – в зависимости от нюансов конкретной технологии. Идеология аддитивных технологий базируется на цифровых технологиях, в основе которых лежит цифровое описание изделия, его компьютерная модель или т. н. САД-модель. При использовании AF-технологий все стадии реализации проекта от идеи до материализации (в любом виде – в промежуточном или в виде готовой продукции) находятся в «дружественной» технологической среде, в единой технологической цепи, где каждая технологическая операция также выполняется в цифровой

CAD/CAM/CAE-системе. Практически это означает реальный переход к «безбумажным» технологиям, когда для изготовления детали традиционной бумажной чертёжной документации в принципе не требуется.

В настоящее время на рынке существуют различные АФ-системы, производящие модели по различным технологиям и из различных материалов. Однако общим для них является послойный принцип построения модели. Особую роль АФ-технологии играют в модернизации литейного производства, они позволили решать ранее не решаемые задачи, «выращивать» литейные модели и формы, которые невозможно изготовить традиционными способами. Радикально сократились сроки изготовления модельной оснастки. Развитие технологий вакуумного формования и вакуумного литья по формам и моделям, полученным аддитивными технологиями, дало возможность сократить сроки изготовления пилотных, опытных образцов и в ряде случаев серийной продукции в разы и десятки раз. Последние достижения в области порошковой металлургии позволили существенно расширить возможности аддитивных технологий по непосредственному «выращиванию» функциональных деталей из металлов и получению новых конструкционных материалов с уникальными свойствами (технологии «spray forming» и др.).

АФ-технологии с полным основанием относят к технологиям XXI-го века. Кроме очевидных преимуществ в скорости и, зачастую, в стоимости изготовления изделий, эти технологии имеют важное достоинство с точки зрения охраны окружающей среды и, в частности, эмиссии парниковых газов и «теплого» загрязнения. Аддитивные технологии имеют огромный потенциал в деле снижения энергетических затрат на создание самых разнообразных видов продукции.

«Под давлением» глобального развития трёхмерных CAD/CAM/CAE-технологий современное литейное, и в первую очередь опытное, производство претерпевает существенную модернизацию, которая имеет целью создать условия для полноценной реализации принципа «безбумажных» технологий в течение всего процесса создания нового изделия – от проектирования и разработки САД-модели, до конечного продукта, быть неотрывной частью цикла проектирования и изготовления прототипов, опытных образцов и малых серий изделий различного назначения с широкой номенклатурой применяемых материалов. И для этой цели «литейщики» оснащаются совершенно новым для них оборудованием, дающим им новые возможности для удовлетворения «капризов» конструкторов, но одновременно требующим от них освоения новых знаний, заставляя и

технологов, и конструкторов говорить на одном 3D-языке, при этом, если не устраняя, то существенно ослабляя извечное противостояние технолога и конструктора.

Современные Центры Аддитивных Технологий часто в своём полном названии содержат (совершенно справедливо) слова «конструкторско-технологический», тем самым подчёркивается единство, а не борьба противоречий, между конструктором и технологом. Эти центры, конечно, в рамках финансовых ограничений, по возможности оснащаются комплексно для решения широкого круга задач. Учитывая специфику российской промышленности, где зачастую в рамках одного предприятия сосредоточено производство огромной номенклатуры изделий из различных материалов, где многие предприятия по разным причинам, но вынуждены содержать своё «натуральное хозяйство», такой подход является вполне рациональным. Опытное литейное производство для получения и металлических, и пластмассовых изделий имеют много общего, а с применением АФ-технологий становятся ещё более близкими и по применяемому оборудованию, и по технологическим приёмам, и по обучению и подготовке профессиональных кадров.

7.2 Аддитивные технологии и литейное производство

Как уже отмечалось, особое значение АФ-технологии имеют для ускоренного производства литейных деталей. АФ-машины используются для получения:

- 1) литейных моделей;
- 2) мастер-моделей;
- 3) литейных форм и литейной оснастки.

7.2.1. Изготовление литейных синтез-моделей

Литейные модели могут быть получены (выращены) из:

- 1) порошкового полистирола (для последующего литья по выжигаемым моделям);
- 2) фотополимерных композиций, в частности, по технологии Quick-cast для последующего литья по выжигаемым моделям или по технологии MJ (Multi Jet) для литья по выплавляемым моделям;

1. Синтез-модели из порошкового полистирола

Полистирол широко используется в качестве модельного материала для традиционного литья по выжигаемым моделям. Однако в связи с бурным развитием технологий послойного синтеза приобрёл особую популярность в области прототипирования, а также для промышленного изготовления штучной и малосерийной продукции. Полистирольные модели изготавливаются на АФ-машинах, работающих

по технологии SLS – Selective Laser Sintering – послойное спекание порошковых материалов (рис. 135). Эту технологию часто применяют тогда, когда необходимо быстро сделать одну или несколько отливок сложной формы относительно больших размеров с умеренными требованиями по точности. Суть технологии заключается в следующем.

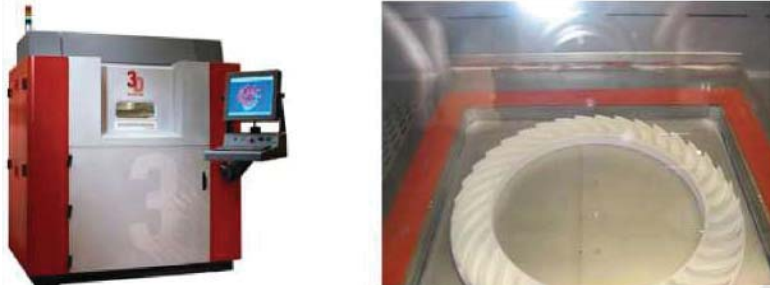


Рисунок 129 – SLS машина SinterStationPro и модель колеса турбины

Модельный материал – полистирольный порошок с размером частиц 50–150 мкм, накатывается специальным роликом на рабочую платформу, установленную в герметичной камере с атмосферой инертного газа (азот). Лазерный луч «пробегаёт» там, где компьютер «видит» в данном сечении САД-модели «тело», как бы заштриховывая сечение детали, как это делает конструктор карандашом на чертеже. Здесь лазерный луч является источником тепла, под воздействием которого происходит спекание частичек полистирола (рабочая температура около 120 °С). Затем платформа опускается на 0,1–0,2 мм и новая порция порошка накатывается поверх отверждённого, формируется новый слой, который также спекается с предыдущим. Процесс повторяется до полного построения модели, которая в конце процесса оказывается заключённой в массив неспекенного порошка. Модель извлекается из машины и очищается от порошка (рис. 136).



Рисунок 130 – Полистирольная модель и отливка головки цилиндра ДВС

Преимуществом данной технологии является отсутствие

поддержек – они не нужны, поскольку модель и все её строящиеся слои во время построения удерживаются массивом порошка.

Имеющиеся на рынке машины фирм 3D Systems и EOS позволяют строить достаточно крупные модели – размерами до 550x550x750 мм (это важно, это позволяет строить крупные модели зацело, без необходимости склейки отдельных фрагментов, что повышает точность отливки и надёжность, особенно вакуумного литья). Весьма высокая детализация построения моделей: могут быть построены поверхностные элементы (номера деталей, условные надписи и пр.) с толщиной фрагментов до 0,6 мм, гарантированная толщина стенки модели до 1,5 мм (рис. 137).

Принципиально технологии литья по восковым и по полистирольным моделям не отличаются (рис. 138). Используются те же формовочные материалы, то же литейное и вспомогательное оборудование. Разве что восковая модель – «выплавляемая», а полистирольная модель – «выжигаемая». Отличия лишь в нюансах формования и термообработки опок. Однако эти нюансы имеют значение. Работа с полистирольными моделями требует внимания при выжигании: выделяется достаточно много газов (горючих), которые требуют нейтрализации, материал частично выгорает в самой форме, есть опасность образования золы и засорения формы, нужно предусмотреть возможность стекания материала из застойных зон, безусловным требованием является использование прокаточных печей с программаторами, причём программа выжигания полистирола существенно отлична от программы вытапливания воска. Но в целом, при определённом навыке и опыте, литье по выжигаемым полистирольным моделям даёт очень хороший результат.



Рисунок 131 – Полистирольная модель (после выращивания и инфильтрации) и отливка, чугун

К недостаткам технологии нужно отнести следующее. Процесс спекания порошка – это тепловой процесс со всеми присущими ему недостатками: неравномерность распределения тепла по рабочей

камере, по массиву материала, коробление вследствие температурных деформаций. Второе. Порошок полистирола не сплавляется, как например, порошки полиамида или металла, о которых речь пойдёт ниже, а именно спекается – структура модели пористая, похожа на структуру пенопласта. Это делается специально для облегчения в дальнейшем удаления материала модели из формы с минимальными внутренними напряжениями при нагревании. Построенная модель, в отличие от, например, восковки, требует весьма аккуратного обращения и при очистке, и при дальнейшей работе в подготовке к формованию.



Рисунок 132 – Полистирольные модели и произведённые отливки

Для придания прочности и удобства работы с ней (сочленения с литниковой системой, формовки) модель пропитывают специальным составом на восковой основе – процесс называется инфильтрацией. Модель помещают в специальную печь и при температуре около 80 °С пропитывают указанным составом (на фотографии показаны инфильтрированные модели красного цвета, из машины же извлекаются полистирольные модели снежнобелого цвета). Это также несёт в себе опасность деформирования модели и требует определённых навыков персонала. Правда, в последнее время появились полистирольные модельные порошки, не требующие инфильтрации. Это ослабляет, но не устраняет полностью проблему. Кроме того, инфильтрат в виде воска далеко не всегда является вредной необходимостью. Он расплавляется в опоке при выжигании первым, раньше полистирола и когда последний приобретает текучесть, способствует его выносу из формы, тем самым уменьшая массу «выжигаемой» части полистирола и снижая вероятность образования золы.

Таким образом, когда мы говорим об «умеренных требованиях к точности» при использовании SLS-технологии, имеем в виду отмеченные объективные причины, по которым точность изделий, полученных SLS-технологий, не может быть выше, чем при использовании других технологий, не связанных с температурными деформациями. Таковой, например, является технология фотополимеризации.

Говоря об SLS-технологии, отметим ещё одно, не связанное с полистиролом, но «родственное» направление, иногда используемое в литейном деле.

Это SLS-модель распределительного вала и формовочный ящик для получения выращивание литейной формовочной оснастки из порошкового полиамида (рис. 139). Полиамид широко используется для функционального прототипирования, полиамидные модели достаточно прочные и во многих случаях позволяют воспроизвести прототип максимально близко к «боевому» изделию. В ряде случаев оказывается экономически целесообразным применять полиамидные модели в качестве альтернативы деревянным. Модель выращивают, так же, как и полистирольную. При этом по возможности делают её полой с минимально возможной толщиной стенок.



Рисунок 133 – Технологическая оснастка для формовки распределительного вала ДВС

Затем модель для придания прочности и жёсткости заполняют изнутри эпоксидной смолой. После этого закрепляют в обычном

формовочном ящике, красят и далее – по традиционной технологии формования. Пример такой «быстрой» технологической оснастки для формовки распределительного вала ДВС показан на рисунке. Ввиду большой длины модель выращена из двух частей, части склеены, заполнены эпоксидной смолой и закреплены в формовочном ящике; продолжительность операций 2 дня.

Синтез-модели из фотополимеров. Суть технологии в использовании специальных светочувствительных смол, которые отверждаются избирательно и послойно в точках или местах, куда по заданной программе подводится луч света. Способы засветки слоя различны (лазер, ультрафиолетовая лампа, видимый свет). Существует две основные технологии создания моделей из фотополимерных композиций: лазерная стереолитография или SLA-технология (от Stereolithography Laser Apparatus), или просто стереолитография – отверждение слоя посредством лазера, и «моментальная» засветка слоя – отверждение слоя фотополимера вспышкой ультрафиолетовой лампы или прожектора. Первый способ предполагает последовательное «пробегание» лазерного луча по всей поверхности формируемого слоя там, где в сечении «тело» модели. Согласно второму способу отверждение всего слоя происходит сразу же после или в процессе его формирования за счёт излучения от управляемого источника света – видимого или ультрафиолетового. Различие в способах формирования слоёв обуславливает и различие в скорости построения модели. Очевидно, что скорость выращивания вторым способом выше. Однако стереолитография была и остаётся самой точной технологией и применяется там, где требования к чистоте поверхности и точности построения модели являются основными и определяющими. Тем не менее, технологии «засветки» с заданной экспозицией, используемые, например, фирмами Objet Geometry и Envisiontec, во многих случаях успешно конкурируют со стереолитографией, оставляя за собой явное преимущество в скорости построения и стоимости моделей. Ряд производственных задач могут быть одинаково успешно решены с помощью AF-машин разного уровня. Таким образом, рациональный выбор технологии получения моделей и, следовательно, прототипирующего оборудования зачастую не является очевидным и должен проводиться с учётом конкретных производственных условий и реальных требований к моделям. В тех случаях, когда разнообразие решаемых задач является очевидным, целесообразно иметь две машины: одну для изготовления изделий с повышенными требованиями, вторую – для выполнения «рутинных» задач и тиражирования моделей.

Лазерная стереолитография

Фирма 3D Systems – пионер в области практического освоения технологий быстрого прототипирования. В 1986 г. ею впервые была представлена для коммерческого освоения стереолитографическая машина SLA-250 с размерами зоны построения 250x250x250 мм. Основой в SLA-процессе является ультрафиолетовый лазер (твердотельный или CO₂). Лазерный луч здесь является не источником тепла, как в SLS-технологии, а источником света. Луч «штрихует» текущее сечение CAD-модели и отверждает тонкий слой жидкого полимера в местах своего прохождения. Затем платформа, на которой производится построение, погружается в ванну с фотополимером на величину шага построения и новый жидкий слой наносится на затвердевший слой, и новый контур «обрабатывается» лазером. При выращивании модели, имеющей нависающие элементы, одновременно с основным телом модели (и из того же материала) строятся поддержки в виде тонких столбиков, на которые укладывается первый слой нависающего элемента, когда приходит черёд его построения. Процесс повторяется до завершения построения модели. Затем модель извлекается, остатки смолы смываются ацетоном или спиртом, поддержки удаляются. Качество поверхности стереолитографических моделей весьма высокое и часто модель не требует пост-обработки (рис. 140). При необходимости чистота поверхности может быть улучшена, «зафиксированный» фотополимер хорошо обрабатывается, и поверхность модели может быть доведена до зеркальной. В некоторых случаях, если угол между строящейся поверхностью модели и вертикалью меньше 30 градусов, модель может быть построена и без поддержек. И таким образом может быть построена модель, для которой не возникает проблемы удаления поддержек из внутренних полостей, что в свою очередь позволяет получать модели, которые в принципе нельзя изготовить никаким из традиционных методов (например, ювелирное изделие).

Стереолитография широко применяется для:

- 1) выращивания литейных моделей;
- 2) изготовления мастер-моделей (для последующего получения силиконовых форм, восковых моделей и отливок из полиуретановых смол);
- 3) создания дизайн-моделей, макетов и функциональных прототипов; изготовления полноразмерных и масштабных моделей для гидродинамических, аэродинамических, прочностных и др. видов исследований.



Рисунок 134 – SLA-модель и отливка изделия «шарик», серебро

Отметим, прежде всего, в контексте литейного производства, первые два направления, которые важны для непосредственного получения литейных деталей. Для целей литейного производства применяют так называемые Quick-Cast-модели, т. е. модели для «быстрого литья» (рис. 141).

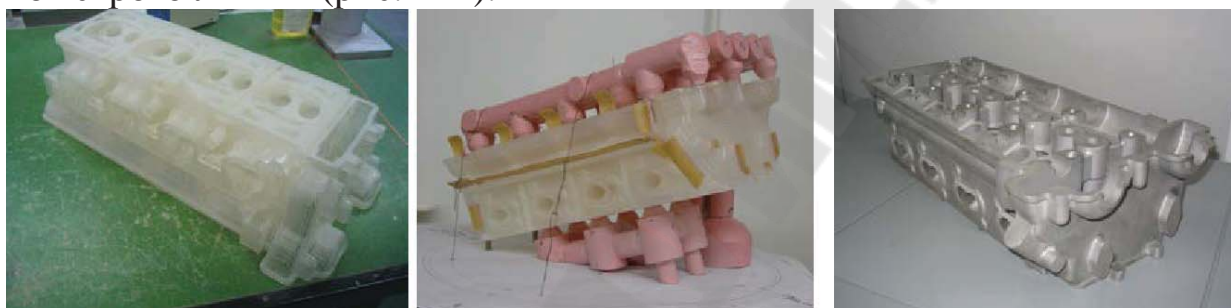


Рисунок 135 – Quick-cast модель, она же с литниковой системой и отливка головки цилиндров (Al)

Quick-cast модель, она же с литниковой системой и отливка головки цилиндров (Al).

Так называют модели, по которым по аналогии с восковыми моделями могут быть быстро получены металлические отливки. Иными словами, это модели для литья по тем же технологиям, что и восковые и полистирольные модели. Но есть важный нюанс. Модели Quick-Cast имеют сотовую структуру массива стенок: внешние и внутренние поверхности стенок выполняют сплошными, а само тело стенки формируют в виде набора сот. Это имеет большое преимущество: во-первых, существенно, на 70 % снижается общая масса модели, а, следовательно, меньше материала нужно будет выжигать при подготовке формы к заливке металлом. Во-вторых, в процессе выжигания любой модельный материал расширяется и оказывает давление на стенки формы, при этом форма с тонкостенными элементами может быть разрушена. Сотовая же структура позволяет модели при расширении «складываться» внутрь, не напрягая, и не деформируя в процессе стенки формы. Это важнейшее преимущество

Quick-Cast-технологии.

Здесь же отметим, что в отдельных случаях SLA-модели, так же, как и SLS – модели, могут быть использованы не как литейные модели, а в качестве оснастки, формовочной модели, для литья «в землю». В этом случае, конечно, в конструкции модели должны быть предусмотрены литейные уклоны и радиусы для выхода модели из формы без повреждений последней (рис. 142).

Однако этот способ формовки используется редко из-за недостаточной прочности SLA – модели.



Рисунок 136 – CAD-модель, SLA-модель и отливка передней крышки ДВС «в землю»

Само по себе получение точной качественной модели – дело дорогостоящее, потеря же и модели, и формы, и олишки становится и ещё более дорогостоящим, и драматичным, особенно когда дело касается ответственных, сложных деталей. Поэтому SLA-машины очень быстро нашли своё применение в тех узлах технологий, которые являлись критическими с точки зрения надёжного получения сложных литейных изделий, в первую очередь в авиационной, военной и космической отраслях, а также в автостроении (рис. 143).

Второе, не по значимости, а в порядке упоминания, преимущество – это точность построения модели. Построение модели происходит в обычных условиях при комнатной температуре. Отсутствуют упомянутые выше факторы термического напряжения и деформаций. Очень малый диаметр пятна лазерного луча, 0,1–0,05 мм позволяет чётко «прорабатывать» тонкие, филигранные фрагменты модели, что сделало стереолитографию весьма популярной технологией в ювелирной промышленности.

Имеется достаточно большой опыт применения технологии Quick-Cast в авиационной промышленности, в энергетическом машиностроении, некоторый опыт имеется и в научных организациях автомобильного профиля.



Рисунок 137 – SLA-модель и отливка рабочего колеса турбоагрегата

Однако для других отраслей эта технология остаётся практически неосвоенной.

Основным производителем SLA-машин является американская компания 3D Systems, которая выпускает широкую гамму машин с разными размерами зоны построения, от 250x250x250 мм до 1500x570x500 мм (рис. 144, табл. 19). С техническими характеристиками машин можно ознакомиться на сайте компании www.3dsystems.com.



Рисунок 138 – Машина iPro8000 и SLA-модели

Здесь приведены основные данные только по одной машине iPro 8000, которая достаточно активно используется в мировой промышленности для целей литейного производства.

Таблица 19

Основные параметры SLA – машины iPro 8000				
Размер рабочей зоны, мм	Шаг построения, мм	Мах. вес модели, кг	Габаритные размеры, мм	Вес, кг
650x750x550	0,05...0,15	75	2220x1260x2280	1590

Стоимость, как первоначальная, так и владения, пожалуй, единственный недостаток этой технологии. В связи с наличием лазера эти установки относительно дороги, требуют регулярного технического

обслуживания. Поэтому, особенно в последнее время, когда появилось множество 3D-принтеров, они используются для построения особо ответственных изделий с повышенными требованиями к точности и чистоте поверхности, в первую очередь для изготовления Quick-Cast- и мастер – моделей. А для других целей, например, дизайн-макетов используют более дешёвые технологии. Стоимость расходных материалов относительно высокая – 200...300 €, но сопоставима со стоимостью модельных материалов других фирм. Время построения модели зависит от загрузки рабочей платформы, а также от шага построения, но в среднем 4–7 мм в час по высоте модели. Машина может строить модели с толщиной стенки 0,1... 0,2 мм.

Технология DLP

Разработчиком данной технологии является международная компания Envisiontec, которую можно отнести к новичкам AF-рынка, свои первые машины она выпустила в 2003 г. В машинах Envisiontec семейства Perfactory применяется оригинальная технология DLP – Digital Light Procession. Суть её заключается в формировании так называемой «маски» каждого текущего сечения модели, проецируемой на рабочую платформу через специальную систему зеркал очень малого размера с помощью прожектора с высокой яркостью света. Формирование и засветка видимым светом каждого слоя происходит относительно быстро – 3...5 секунд. Таким образом, если в SLA-машинах применяется «точечный» принцип засветки, то в машинах Envisiontec – «поверхностный», т. е. осуществляется засветка всей поверхности слоя. Этим объясняется весьма высокая скорость построения моделей – в среднем 25 мм в час по высоте при толщине слоя построения 0,05 мм. Материал поддержек – тот же, что и основной материал – акриловый фотополимер.



Рисунок 139 – Модели Envisiontec и отливки деталей ДВС, алюминий

Модели Envisiontec_используются так же, как и SLA-модели – в качестве мастермоделей и выжигаемых литейных моделей. Качество моделей весьма высокое, однако уступает SLA-моделям по точности (рис. 145). В основном это связано с применением не малоусадочных эпоксидных фотополимеров, как у машин 3D Systems, а акриловых, имеющих существенно больший, почти на порядок – 0,6 %, коэффициент усадки при полимеризации. Тем не менее, преимуществом являются достаточно высокая точность и чистота поверхности, прочность, удобство в обращении при весьма умеренной (по сравнению со стереолитографией) стоимости. Несомненным преимуществом технологии Envisiontec является высокая скорость построения моделей и, следовательно, производительность RP-машины.

В последнее время были проведены эксперименты, которые показали в целом хорошую выжигаемость моделей, малую зольность. Были получены кондиционные отливки автомобильных деталей как вакуумным литьём алюминия в гипсовые формы, так и атмосферным литьём чугуна в маршалитовые формы. Есть все основания считать технологию DLP весьма перспективной и эффективной для целей литейного производства и не только для НИР и ОКР. Время (с учётом подготовительно-заключительных операций) построения деталей, приведённых на рисунке – впускной трубы высотой 32 мм и ресивера высотой 100 мм составляет 1,5 и 5 часов соответственно. Тогда как на сопоставимой по размерам SLA-машине Viper (3D Systems.) такие модели строились бы не менее 5,5 – ти и 16-ти часов.

Perfactory EXEDE

Для индустриального применения представляют интерес машины серий Extrim и EXEDE (рис. 146). Эти машины (табл.20) позиционируются, как AF-машины для промышленного серийного производства мастер-моделей и моделей для литья металла по выжигаемым моделям, а также как высокопроизводительные машины для сервис-бюро, специализирующихся на оказании услуг в области аддитивных технологий. Машина Extrim имеет один цифровой прожектор с разрешением 1400x1050 пикселей, EXEDE – два прожектора. Эффективная рабочая зона построения и толщина слоя построения регулируются сменой линз оптической системы.

Особенностью машин серий **Extrim** и **EXEDE** является то, что в отличие от других технологий, здесь используется не 11 дискретное, пошаговое, а непрерывное движение платформы вниз с малой скоростью. Поэтому на моделях нет ярко выраженных ступенек, характерных для других способов построения. Модели требуют пост-обработки – удаления поддержек и в ряде случаев, как и

стереолитография – дополимеризации.



Рисунок 140 – Машина серий и EXEDE

Таблица 20

Основные характеристики машин Envisiontec семейства Perfactory

	Размеры зоны построения, мм	Толщина слоя построения, мм	Габаритные Размеры, мм	Вес, кг
Standart	120x90x230	0,025...0,150	480x730x1350	70
Zoom	190x142x230			
Standart UV	175x131x230			
Extrim	320x240x430	0,025...0,150	810x730x2200	480
EXEDE	457x431x508	0,025...0,150	810x840x2200	520

Широкий выбор материалов для мастер-моделей, выжигаемых моделей, моделей для вакуум-формовки (выдерживающих до 150 °С), концептуального моделирования делает эти машины особенно привлекательной в тех случаях, когда требуется изготавливать большое количество и большую номенклатуру моделей в широком спектре назначения.

Технология MJM (Multi Jet Modeling) получения восковых синтез-моделей. Модели строятся на принтерах с использованием специального модельного материала, в состав которого входит светочувствительная смола – фотополимер на акриловой основе, и литейный воск (более 50 % по массе). Фотополимер является связующим элементом. Материал посредством многоструйной головки послойно наносится на рабочую платформу, отверждение каждого слоя производится за счёт облучения ультрафиолетовой лампой. Принтеры ProJet CP 3000 и ProJet CPX 3000 специально разработаны для

выращивания восковых моделей для точного литья металлов в гипсо-керамические и оболочковые формы (рис. 147). Принтеры имеют два режима построения модели – «стандартный» с разрешением (хуз) 328х328х700 точек на дюйм и размерами зоны построения 298х185х203 мм, и «высокоточный» Definition) с разрешением 656х656х1600 точек на дюйм на уменьшенной до 127х178х152 мм зоне построения.



Рисунок 141 – оборудование и модели технологии ProJet

Особенностью данной технологии является наличие так называемых поддерживающих структур – поддержек. Эти поддержки строятся для удержания нависающих элементов модели в процессе построения. В качестве материала для поддержек используется восковой полимер с низкой температурой плавления, который после построения модели удаляется струёй горячей воды. Модельный материал VisiJet® CPX200 и материал поддержек VisiJet® S200 содержится в виде баллонов-картриджей по 0,38 и 0,4 кг, соответственно. В принтер может быть установлено до 10 картриджей обоих видов.



Рисунок 142 – Оболочковая форма и отливка корпуса турбины (чугун), полученные по восковой синтез-модели

В «стандартном» режиме толщина слоя построения 36 мкм, «высокоточном» режиме – 16 мкм. Точность построения (в зависимости от конфигурации, ориентации и размеров модели) 0,025–0,05 мм на длине один дюйм. Принтер позволяет надёжно строить модели с толщиной стенок до 1 мм, в отдельных случаях до 0,8 мм. Крупные модели могут быть построены частями и затем склеены (рис. 148).

Недостатком технологии является относительно высокая стоимость расходных материалов – более 300 \$/кг. Тем не менее, эта технология имеет и неоспоримые преимущества – скорость получения модели и, не менее важное, высокое качество модельного материала с точки зрения собственно технологии литья по выплавляемым моделям (формовки, вытапливания модели).

7.3 От синтез-мастер-модели к отливке

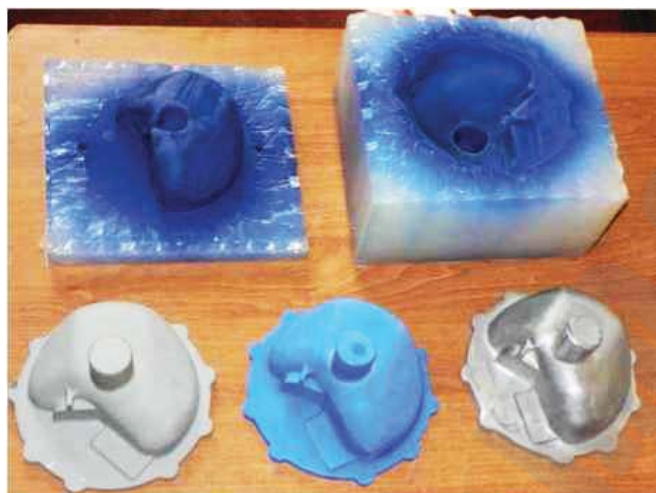
Литье полиуретановых смол в силиконовые формы

Второе интенсивно развивающееся направление использования фотополимеров в литейном деле – это изготовление высокоточных мастер-моделей, как для последующего получения через силиконовые формы восковых моделей, так и для литья полиуретанов. Использование силиконовых форм оказывается чрезвычайно эффективным при штучном и малосерийном производстве восковок. При этом достигается высокое качество восковок.

Мастер-модели (рис. 149) обычно выращивают на SLA- или DPL-установках, поскольку эти машины обеспечивают наилучшую чистоту поверхности и высокую точность построения модели. Достаточно высокое качество, чтобы быть использованными в качестве мастер-моделей, имеют и модели, полученные на 3D принтерах типа ProJet и Objet.

Мастер-модели используют для получения так называемых «быстрых форм», в частности, силиконовых форм, в которые затем производится литье полиуретановых смол или воска для последующего литья металлов. Технологии литья в эластичные формы получили широкое распространение в мировой практике. В качестве материала форм используют различные силиконы, как материал, обладающий малым коэффициентом усадки и относительно высокой прочностью и стойкостью. (Здесь «силикон» – это смесь двух исходно жидких компонентов А и В, которые при смешении в определённой пропорции полимеризуются и образуют однородную относительно твёрдую массу). Эластичные формы получают путём заливки мастер-модели силиконом в вакууме. Мастер – модель располагают в обычно деревянной опоке, опоку помещают в вакуумную литейную машину, где предварительно в специальной ёмкости производят смешение компонентов А и В, затем

СИЛИКОН ВЫЛИВАЮТ В ОПОКУ.



Силиконовая форма (вверху), мастер – модель (внизу слева), восковая модель (в середине), металлическая отливка (справа)

Рисунок 143 – Стадии изготовления мастер-модели

Вакуум применяют с целью удаления воздуха из жидких компонентов и обеспечения высокого качества формы и отливок. После заливки в течение 20–40 мин. силикон полимеризуется. В комплект поставки оборудования для вакуумного литья, как правило, входит собственно вакуумная машина (одно- или двухкамерная) и два термошкафа: один для хранения расходных материалов при температуре около 35 °С, второй, – для выдержки форм, в котором поддерживается температура около 70 °С; он используется для предварительной термоподготовки силиконовой формы и литейных материалов непосредственно перед заливкой. После заливки полиуретановой смолы форма возвращается в эту печь, где происходит полимеризация смолы в оптимальных условиях. Поэтому размер второго термошкафа должен соответствовать размерам вакуумной камеры машины. Используя специальные технологические приёмы, форму разрезают на две или несколько частей, в зависимости от конфигурации модели, затем модель извлекают из формы.

Обычно стойкости формы – 50–100 циклов, что вполне достаточно для изготовления отливок опытной серии деталей. Эти технологии оказались весьма эффективными для производства опытно-промышленных партий и малосерийной продукции, характерной для

авиационной, медицинской и приборостроительной отраслей. Широкий спектр как силиконов, так и полиуретановых смол позволяет изготавливать отливки с ударо- и термостойкими свойствами, различной жёсткости в разнообразной цветовой гамме. Современные предприятия, изготавливающие отливки по выплавляемым моделям, обычно имеет в составе технологического оборудования АФ-машину для выращивания мастер-моделей и машину для вакуумного литья в силиконовые формы (рис. 150 табл. 21).

Таблица 21

МТТ 4/04	
Габаритные размеры, мм	1930x1510x900
Макс, размеры формы, мм	750x900x750
Объем заливки, дм ³ / кг	2,2/2,0 или 5,5/6,0



Рисунок 144 – Литейная машина МТТ

Литье металлов

Для изготовления металлических отливок в условиях НИИ и опытного производства широкое применение имеют системы вакуумного литья цветных

Вакуумная машина МРА 1000 (МТТ Technologies) (рис. 151) с объёмом тигля 10 л для литья цветных металлов металлов. Ключевым звеном в таких системах, естественно, является литейная машина. Обычно, учитывая условия опытного производства, это компактные машины с объёмом тигля 3–20 л. Как правило, система вакуумного литья включает (рис. 152):

- 1) машину для вакуумного литья;
- 2) прокалочную печь для вытапливания восковых и выжигания полистирольных моделей и прокалки опок;
- 3) каталитический конвертер (для нейтрализации газов от прокалочных печей);
- 4) вакуумный миксер для приготовления и заливки формовочной смеси);
- 5) размывочную машину;

В литейных машинах используют графитовый или керамический тигель и обычно в них предусмотрен режим «поддавливания» металла аргонem после заливки (до 2 бар). Температура расплава до 1200 °С. Типовыми литейными цветными металлами являются: латуни, медь, бронзы, алюминиевые и бериллиевые сплавы, драгметаллы, в отдельных случаях магниевые сплавы. Заливка формовочной смеси и литье металлов производится в вакууме, что обеспечивает хорошее качество формовки, радикально снижает вероятность образования газовых пор и рыхлот в отливке.



Рисунок 145 – Вакуумная машина МРА 1000

При использовании соответствующих формовочных смесей и соблюдении технологических требований данное оборудование обеспечивает высокое качество поверхности отливок, на уровне Rz 20–40.



Рисунок 146 – Оборудование литейной технологии

В последние годы на рынке появились достаточно надёжные и качественные машины лабораторного типа для вакуумного литья сталей и титана (например, ALD, ProfiCast, TopCast) Ряд компаний (МК-Technology, МТТ-Technologies, ProfiCast и др.) традиционно работают в содружестве с фирмами-производителями АF – оборудования и в параметрах своей продукции учитывают соответствующие нюансы.

Оборудование, позволяет существенно повысить производительность и улучшить условия труда, при этом обеспечивая максимально эффективную работу с модельными материалами, используемыми в АF-технологиях.

В частности, фирма ProfiCast производит вакуумную машину SGA 3500 с индукционным нагревом для литья конструкционных и нержавеющей сталей. Машина выполнена по схеме с опрокидывающимся (поворотным) тиглем объёмом 3,5 л. Оборудована тактильным дисплеем, программатором, системой адаптации для точной установки параметров нагрева для плавки различных видов



Рисунок 147 – Машина SGA 3500

стали. Закладка брусков стали в тигель производится через открытую верхнюю крышку, а установка опоки с формой – через боковую дверцу вакуумной камеры, расположенной под тиглем. Высота опоки до 500 мм. Макс, температура заливки 1750 °С. Металл может быть слит в одну или поочерёдно в несколько форм.

Машина “Cyclon” фирмы МК-Technology. Предназначена для получения маршалитовых, электро-корундовых и т. д. форм, используемых при литье по выплавляемым моделям (рис. 154). Восковые или полистирольные модели окунают в формовочную суспензию, которая смачивает модель и формирует тонкий слой жидкости на поверхности модели. Затем модель обсыпают

порошкообразным термостойким материалом и просушивают. Процесс повторяется несколько раз и, в конечном счёте, модель оказывается заключённой в огнеупорном «коконе» – оболочке, которую затем устанавливают в прокалочную печь и из которой вытапливают или

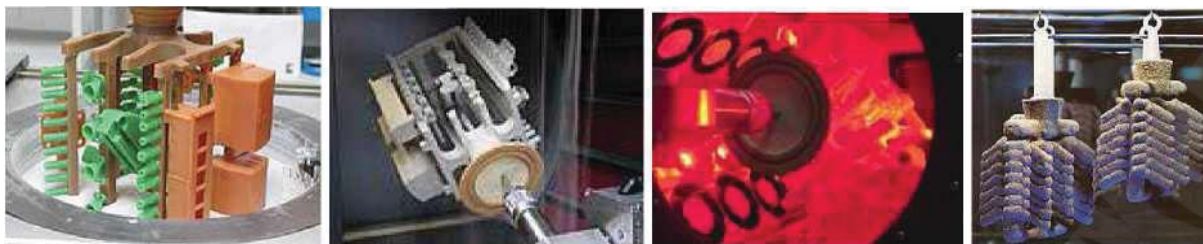


Рисунок 148 – Машина “Cyclon”

выжигают модель, получая таким образом форму для последующей заливки в неё металла.

Машина “Cyclon” выполняет все эти операции в автоматическом режиме (рис. 155). При создания оболочковой формы используется суспензия на водной основе. К преимуществам машины относятся: сокращение времени создания оболочковой формы в 10–20 раз по сравнению с ручным способом формовки; уменьшение расхода формовочных материалов на 25 %; улучшение газопроницаемости формы; увеличение прочности оболочки. Максимальный размер форм 500x500x500 мм, вес до 15 кг. Габариты машины 4600x1450x3750 мм.

Для ускорения процесса приготовления оболочковых форм используется специальная сушильная машина – Booster (МК-Technology), которая может быть легко интегрировано в существующую технологическую линию. Booster позволяет получать пригодные для заливки металла формы в течение одного рабочего дня. Максимальный размер оболочковой формы 800x800x1000 мм, габаритные размеры машины 1900x3500x1850 мм, масса 1600 кг.



Смачивание

Обсыпка

Просушка
слоя

Готовые
формы

Рисунок 149 – Элементы технологии “Cyclon”

7.4 Технологии синтеза песчаных литейных форм

Литейные формы – это отдельный и большой раздел АF-технологий. В последние годы динамичное развитие получило направление непосредственного выращивания песчаных форм для литья металлов, а также выращивание металлических изделий, в частности, пресс-форм для литья пластмасс. Здесь, как нигде, в полной мере находит практическое воплощение принцип «безбумажных технологий» – производство изделия в принципе не нуждается в сопровождении посредством традиционной бумажной документации в виде чертежей, технологических карт и т. д. Меняется и традиционный подход к кадровому обеспечению работ. Конструктор и технолог работают не последовательно, а параллельно и зачастую конструктор выполняет функцию технолога, создавая параллельно с САD-моделью детали САD – модели технологической оснастки для литья детали.

Для производства песчаных литейных форм используется две АF-технологии:

- 1) послойное спекание плакированного песка лазерным лучом (фирма EOS);
- 2) послойное нанесение связующего состава или Inkjet-технология (ProMetal).

Первая технология – это разновидность упомянутой выше SLS-технологии, с той лишь разницей, что в качестве модельного материала используется литейный (силикатный или циркониевый) предварительно плакированный полимером песок. После спекания получается так называемая «грин-модель» (в смысле – «сырая»), которая требует весьма аккуратного обращения при очистке. Для облегчения этого процесса, очищенные места сразу же обрабатывают пламенем газовой горелки, закрепляя их таким образом. После очистки фрагменты формы помещают в прокалочную печь и окончательно (при температуре 300–350 °С) отверждают массив формы (рис. 157).

Вторая технология похожа на MJM-технологию с той разницей,

что на рабочую платформу впрыскивается не строительный материал, а связующий состав. Строительный же материал (литейный песок) подаётся и разравнивается на рабочей платформе послойно с шагом 0,2–0,4 мм аналогично SLS-системам. В этом случае дополнительной термообработки формы не требуется (рис. 158).

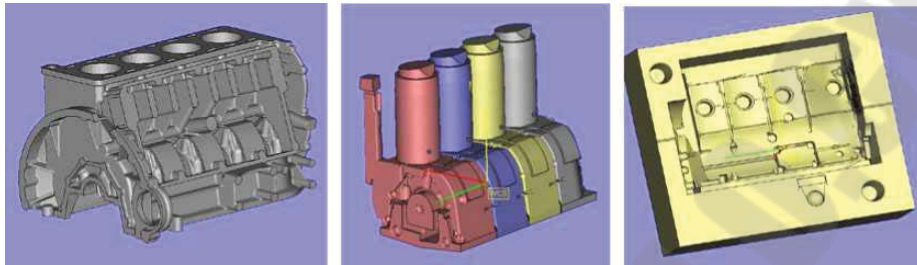


Рисунок 150 – CAD модели блока цилиндров и фрагментов песчаной формы



Рисунок 151 – Выращенные фрагменты формы (ProMetal), форма в сборе и отливка блока (чугун)

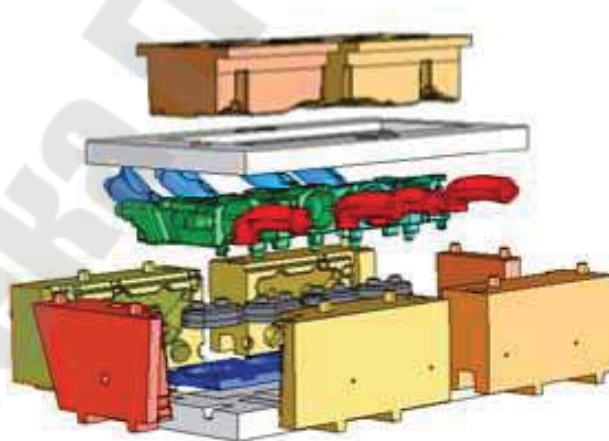


Рисунок 152 – Выращивание формы на SLS-машине

Независимо от метода построения собственно формы, алгоритм действий CAD-модели практически одинаков. Коротко последовательность операций выглядит следующим образом. Создаётся CAD-модель изделия; назначаются припуска на обрабатываемые поверхности; согласно рекомендациям технолога проектируется

литниковая система, которая сочленяется с основной САД-моделью, получают технологическую САД-модель, модель масштабируют в соответствии в коэффициентом усадки литейного материала; создаётся модель (будущего) песчаного блока – обычно в виде параллелепипеда, куда заключена технологическая САД – модель; этот блок разрезается на несколько частей в зависимости от размеров рабочей камеры АФ-машины; создаются негативы – «отпечатки» технологической модели в песчаном блоке или его фрагментах; таким же образом методом вычитания создаются модели стержней; в завершение процесса проектирования создаются stl – файлы формы. Далее – дело техники, а именно технологической АФ-машины, которая строит фрагменты формы. После завершения построения фрагменты песчаной форма с известными предосторожностями собирают: стыкуют, герметизируют швы, устанавливают холодильники и т. д. Затем – собственно заливка металла (рис. 159).

Машины, синтезирующие песчаные формы. Машины ProMetal отличаются высокой производительностью и предназначены для целей НИОКР и промышленного использования в производстве не только штучной, но серийной продукции. Самая большая из них ProMetal S-MAX имеет рабочую зону построения 1500x750x700 мм, контейнер ёмкостью 800 л, шаг построения 0,2–0,4 мм и скорость построения моделей 12...28 мм/ч по высоте, на формирование слоя необходимо



Сборка формы

Отливка (алюминий)

Рисунок 153 – Работа с песчаными формам

около 40 с. Для выработки всего объёма при непрерывной работе машины требуется два дня. Машина чувствительна к качеству песка – размер частиц не должен превышать 140 мкм.

Основным преимуществом машины является возможность строить за одно целое относительно габаритные формы и стержни. Производи-

тельность машины также является существенным преимуществом, в особенности для условий индустриального применения. Стоимость машины весьма значительна, превышает 1 млн. евро.

В машине EOS S 700 используется SLS-технология (рис. 160). Она не столь быстрая, но более «деликатная», может строить филигранные фрагменты формы размерами до 1 мм. Рабочая зона построения 720x380x380 мм, шаг построения 0,2 мм, точность построения 0,3 мм (на длине 720 мм). Габаритные размеры 1420x1400x2150 мм. Для увеличения скорости работы в машине используется система с двумя лазерами. Машина отверждает до 2500 см³ песка в час (для сравнения: ProMetal – 7500 см³/ч). Несмотря на определённые недостатки, связанные с большей трудоёмкостью получения моделей и меньшей производительностью машины, она обладает несомненным преимуществом по точности построения моделей и чистоте поверхности. На ней могут быть изготовлены формы и стержни,

Песчаные формы и отливки (EOS) по сложности недоступные другим технологиям (рис. 161). Эти машины применяются там, где существуют заведомо повышенные требования к точности литья и чистоте поверхности отливок. Существенным преимуществом является и то, что расходным материалом является недорогой литейный песок, плакирование которого не представляет трудностей и может быть произведено непосредственно на месте установки машины.



Рисунок 154 – Машина EOS S700



Рисунок 155 – Образцы продукции

7.5 Технологии синтеза металлических изделий и форм для литья металлов и пластмасс

Важное место в АФ-технологиях занимают технологии непосредственного выращивания деталей, в частности, пресс-форм из металла (рис. 162). В англоязычной литературе эти технологии получили название Direct Manufacturing или Direct Metal Fabrication. Суть технологии заключается в последовательном «склеивании», спекании или сваривании слоёв порошкового металла.

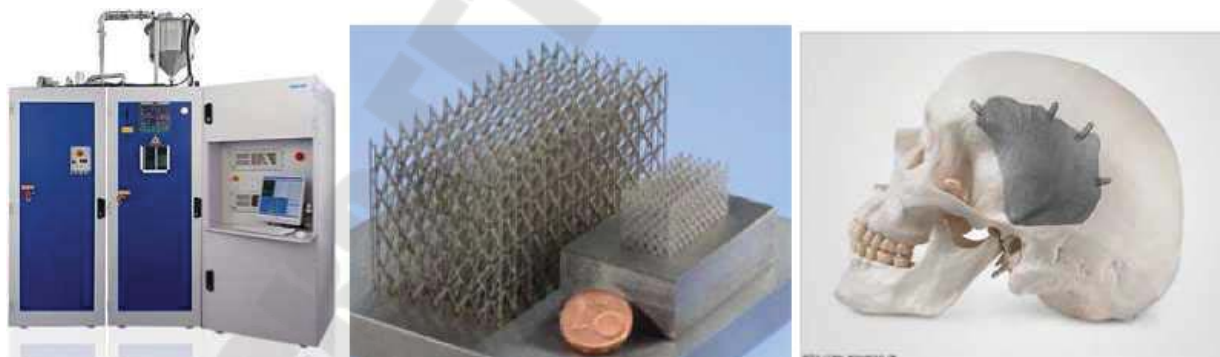


Рисунок 156 – АФ машина Realiser SLM 250 и образцы изделий из титана

Применяют две технологии формирования модели при построении – лазерную (спекание, сплавление) и технологию Inkjet, согласно которой слой фиксируется с помощью специального состава, впрыскиваемого на поверхность порошкового металла через многоструйную подвижную головку (по типу 3D-принтера). Иногда, как например фирма 3D Systems, сначала посредством лазерного спекания получают так называемую «грин-модель», которую затем пропитывают (инфильтруют) расплавленной бронзой. Но в последнее время с развитием лазерной техники все большее распространение получают технологии (EOS, Arcam, MTT Technologies, ConceptLaser, Realizer

и др.) непосредственного сплавления слоёв порошкового металла без последующей инфильтрации Номенклатура применяемых материалов весьма широкая: конструкционные и инструментальные стали, титан-алюминиевые композиции, кобальт-хром, инконель, драгметаллы. Совершенствование лазерных технологий, использование нанотехнологий для получения мелкодисперсных порошковых композиций металлов позволило выращивать полностью функциональные металлические детали с механическими свойствами литых деталей, изготовленных традиционными методами. Более того, АF-технологии позволили изготавливать детали с конфигурацией, которую в принципе невозможно выполнить традиционными методами, например, неразъёмные пресс-формы с внутренними каналами охлаждения. Для целей литейного производства эта технология представляет несомненный интерес, в частности, для изготовления литейной оснастки – форм, как для получения восковых моделей в серийном производстве или отливок из пластмасс, так и для непосредственного литья металлов (кокили, формообразующие литейной оснастки) (рис. 163, 164).

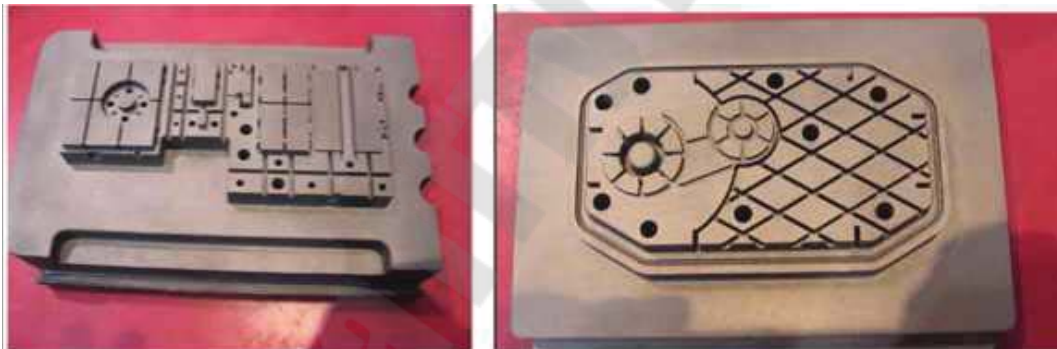


Рисунок 157 – Синтезированные металлические вставки для литья деталей из пластмассы (3D Systems)



Рисунок 158 – Машина EOS EOSINT M 270 и образцы выращенных металлических изделий

7.6 Аддитивные технологии, литейное производство и порошковая металлургия

В данном разделе речь пойдёт о новых технологиях с ещё неустоявшейся терминологией, находящихся на стыке разных традиционных технологий, и которые невозможно отнести к какой-либо из них. Имеется в виду, в частности, так называемая технология *Spray forming*. Она объединяет в себя и литейные знания, поскольку имеет место плавка металла, и технологии распыливания металла, а это сфера знаний порошковой металлургии, и знания по металлографии, а это вопросы общего металловедения, при этом в конечном итоге мы получаем то же, что и при литье в изложницу – заготовку, но это не просто заготовка: она также получается посредством послойного синтеза, что и роднит технологию *spray forming* с AF-технологиями (рис. 165).

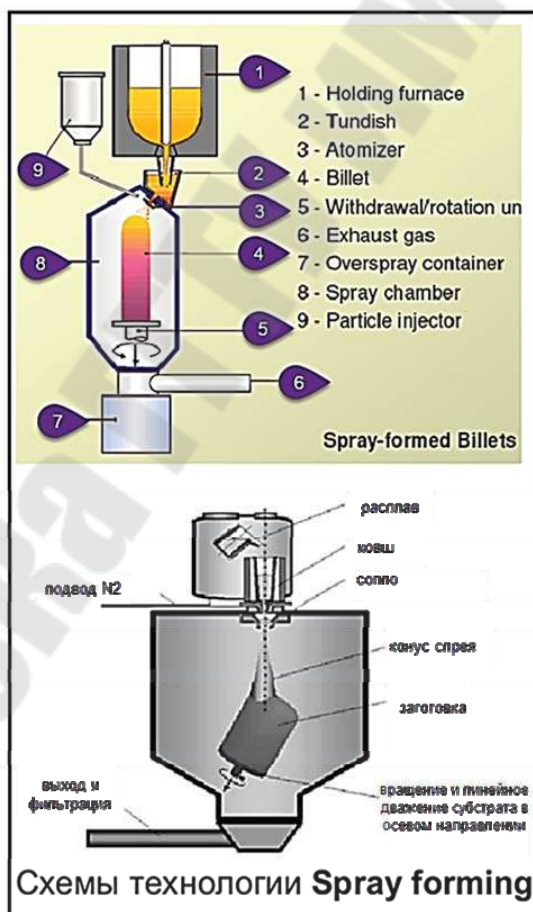


Рисунок 159 – Синтезированные металлические вставки для литья деталей из пластмассы (3D Systems)

Spray forming – относительно новая технология получения заготовок из конструкционных и специальных сплавов посредством распыления (атомизации) металла, предложена в 1970 году проф. Singer

(Swansea University, Великобритания). Суть технологии заключается в послойном напылении металла на подложку и «выращивании» болванки (заготовки) для последующей механообработки. Металл расплавляется в плавильной камере и затем посредством специального сопла распыляется потоком инертного газа, частички металла (размером 10–100 мкм) осаждаются на подложку, формируя таким образом массив болванки. В отличие от литой заготовки, полученной простым сливом металла в изложницу, болванки, изготовленная методом *spray forming*, имеет высокую однородность микро- и макроструктуры материала. Технология «*Spray forming*» разработана в первую очередь для изготовления ответственных деталей аэрокосмического назначения из специальных сплавов с повышенными требованиями. Однако она нашла коммерческое применение и в серийном производстве, в частности, для изготовления гильз цилиндров из сплава AL-Si для двигателей автомобилей Мерседес (рис. 166). Данная технология успешно применяется для получения заготовок из сплавов, склонных к ликвации при кристаллизации, в частности, медь-содержащих сплавов, используемых для производства суперпроводников (CuSn), высокопрочных инструментов (CuMnNi, CuAlFe) для нефтедобывающей и горнорудной промышленности.

К недостаткам следует отнести относительно высокие потери материала – до 20 %, при атомизации и осаждении металла на подложку и относительную сложность управления процессом, требующим высоких профессиональных навыков персонала. К особенностям процесса следует отнести наличие микропор в структуре материала, появление которых связано с захватом молекул газа при атомизации и осаждении частичек металла и с «неплотным» спеканием частиц друг с другом при кристаллизации. Пористость металла устраняют посредством горячего изостатического прессования (HIP) и последующей обработки давлением – прокатки иликовки.

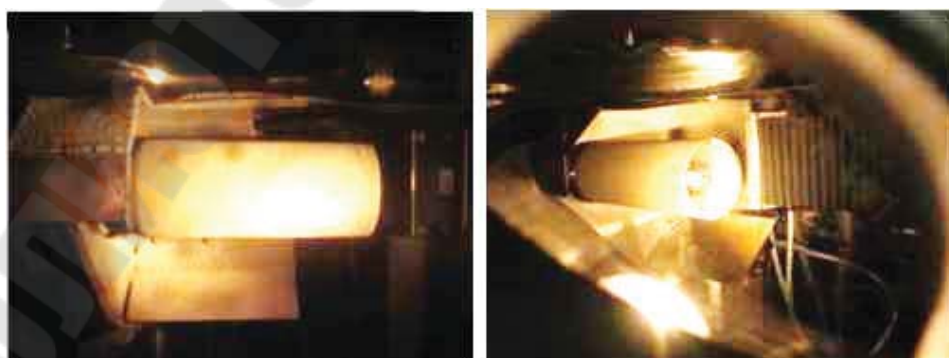


Рисунок 160 – Цилиндрическая заготовка, полученная методом *Spray forming*

Платформа с подложкой, на которой «выращивается» заготовка может совершать возвратно-поступательное движение – тогда получается заготовка в виде ленты, или вращательное движение относительно оси потока распыливаемого металла – для получения цилиндрической заготовки в виде болванки, или вращательное движение относительно оси, перпендикулярной оси потока – для получения заготовки типа «кольцо» или «труба».

Технология spray forming открывает широкие возможности для создания так называемых градиентных материалов (с переменными по сечению физикохимическими свойствами), которые могут быть получены путём послойного нанесения различных материалов через два (или более) распылительных сопла.

В связи с развитием и повышением технического уровня прототипирующих машин может представлять интерес практическое применение технологии Spray forming для получения изделия путём напыления металла на керамическую модель (реплику). Суть технологии в следующем. По САД-модели на прототипирующей машине, например SLA-установке, выращивается стереолитографическая мастер-модель. По ней изготавливается силиконовая или RIM-форма, в форму заливают жидкую керамику и получают керамическую модель-реплику, которую затем устанавливают в Sprayforming-машину, где на керамическую модель послойно напыляют расплавленный металл. Таким образом получают «слепок» с керамической реплики. После механической обработки (удаления облоя и обработки в размер по посадочным поверхностям) получают конечное изделие. Наиболее интересна эта технология для получения пресс-форм и технологической оснастки вообще.

Компания RSP Tooling (RSP – Rapid Solidification Process, www.rsptooling.com, США) является разработчиком нового способа изготовления инструментальной оснастки с использованием технологии Spray forming. Машина RSP представляет собой сочетание плавильной машины и атомайзера (устройства для распыливания). Металл (различные сплавы широкого спектра) плавится в тигле в инертной атмосфере и под давлением направляется к распылительному соплу, где посредством струи азота происходит мелкодисперсное дробление жидкого металла и быстрое отверждение частиц. Около 70 % частиц «долетают» до керамической модели уже в твёрдом состоянии, остальные 30 – в полужидкой фазе. Оставшегося тепла достаточно, чтобы связать (сварить) между собой все частицы (рис. 167).

Исследования показали, что металл имеет более однородную и мелкозернистую структуру с менее выраженной сегрегацией, чем при литье. Частицы металла налипают на керамическую модель, формируя

тело «слепка» (рис. 167). Платформа, на которой закреплена керамическая модель, имеет возможность перемещения в пространстве рабочей камеры машины и оператор, поворачивая платформу, обеспечивает равномерное нанесение металла. После завершения процесса и остывания в течение полутора-двух часов керамическая модель извлекается из металлического «слепка» и производятся стандартные технологические операции: механо- и термообработка (рис. 168).

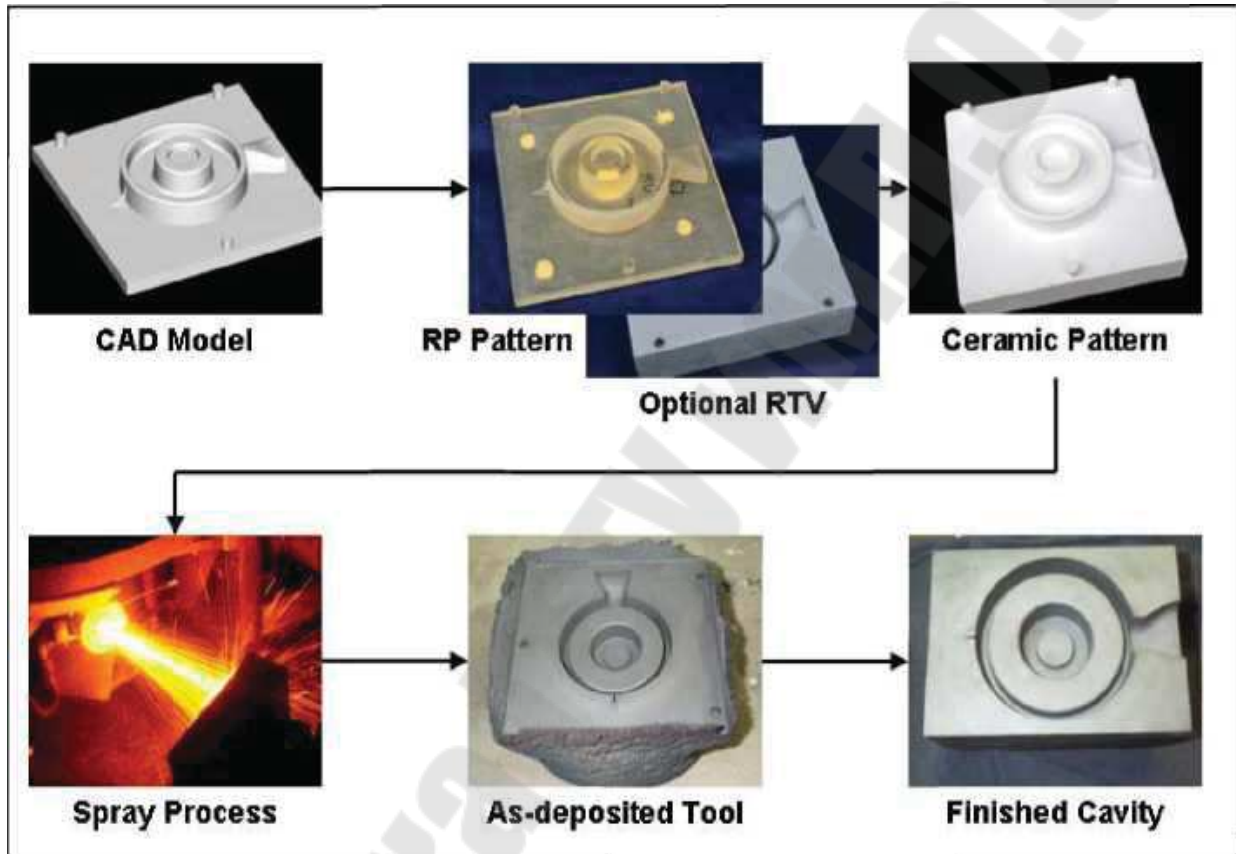


Рисунок 161 – Технология Spray forming



RSP-машина

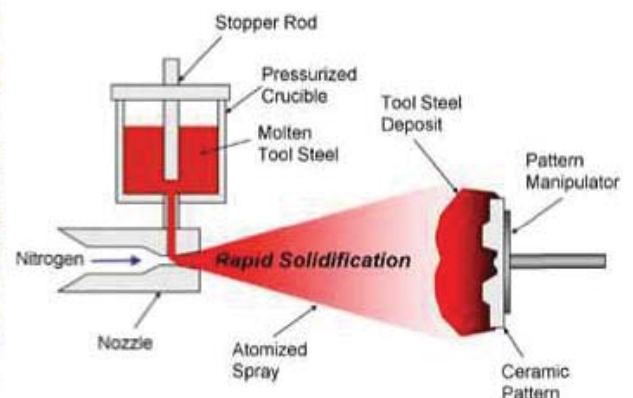


Рисунок 162 – RSP машина

Машина RSP может изготавливать детали с максимальными размерами 180x180x100 мм. Продолжительность рабочего цикла 3–4 часа. Таким образом, в течение одного рабочего дня может быть изготовлено 2–4 изделия. Одним из преимуществ данной технологии является возможность получения биметаллических композиций.

Например, рабочая часть кокиля формируется из специальной стали, а тело из обычной недорогой стали или цветного металла с повышенной интенсивностью теплоотдачи. Данная технология пока не вышла на уровень коммерческого применения, но представляет несомненный интерес.

Сплавы Al-Zn-Cu-Mg традиционно относятся к высокопрочным материалам, однако дальнейшее улучшение их прочностных характеристик сдерживается макросегрегацией, возникающей в заготовке, получаемой литьём. Технология spray forming ослабляет эти проблемы. Сплав 7XXX, полученный новым способом, показал более высокую ударную вязкость и усталостную прочность, чем кованный алюминий. Одним из ограничений в применении сплавов Al-Li является анизотропия у деталей, изготавливаемых из литых заготовок. Сплав, полученный по технологии spray forming с увеличенным содержанием лития, имеет улучшенную изотропию, экспериментально показано отсутствие проблем с растрескиванием отливки и макросегрегацией, которые имеют место при получении заготовки литьём. Получен сплав с содержанием лития 4 % по весу, имеющий плотность $2,4 \text{ г/см}^3$ и с удельной жёсткостью на 30 % выше, чем у обычных алюминиевых сплавов. Были также получены сплавы Al-Cu-Mg-X с улучшенными по сравнению с литейными сплавами прочностными свойствами и износными характеристиками при повышенных температурах (рис. 169).

Одним из самых важных достоинств данной технологии является возможность создания новых материалов с уникальными свойствами, а также разнообразных покрытий. Получены композиционные материалы (ММС, metal matrix composite), в которых матричная основа усилена керамикой до 15 % по объёму, и которые показали повышенную жёсткость и сопротивление износу. Эти материалы изготовлены путём вдувания частиц керамики в распылённый поток металла в процессе осаждения металла по технологии spray forming. Получен уникальный материал Al-Si с содержанием кремния 70 % по весу, такой сплав невозможно получить методами литья из-за катастрофического охрупчивания вследствие выпадения крупных зёрен кремния при кристаллизации и засорения оксидами (рис. 170).



Рисунок 163 – Примеры деталей авиадвигателя, полученные с использованием технологии «Spray forming»

Вариацией соотношения кремния и алюминия могут быть получены сплавы с заданным коэффициентом термического расширения (постоянным в широком диапазоне температур), которые имеют большие перспективы применения в микроволновых устройствах и плёночных радиаторах, использующихся в телекоммуникационных



Установка «Spray forming» Оксфордского университета, (до 80 кг по Al)

системах, аэрокосмической и оборонной промышленности.

Европейскими лидерами в освоении технологий «Spray forming»

Рисунок 164 – Установка «Spray forming» Оксфордского университета, (до 80 кг по Al)

являются компании Sandvik Osprey (Великобритания, www.smt.sandvik.com), которая также занимает передовые позиции по выпуску порошковых металлов и оборудования для их производства, и немецкая фирма ALD, специализирующаяся на выпуске литейного оборудования,

вакуумных печей и технологического оборудования для термообработки и порошковой металлургии.

В США ведущие позиции в этой области занимают General Electric, Teledyne Allvac (www.allvac.com), а также компания Sprayform Technologies International – совместное предприятие Pratt & Whitney и Howmet, разработавшая технологию получения пре-форм (заготовок) турбинных дисков диаметром до 1400 мм.

Фундаментальные исследования и разработки по практическому использованию возможностей технологии Spray forming активно ведут также: U.S. Navy Labs, Pennsylvania State University, University of California at Irvine (США), Applied Research Labs, Advanced Institute of Science and Technology (Ю. Корея), National Cheng Kung University (Тайвань), IPEN (Бразилия), Oxford University Centre for Advanced Materials and Composites (Великобритания), Inner Mongolia Metals Institute (Китай), Bremen University (Германия), Katholieke Universiteit Leuven (Бельгия).

В Европе на трёх заводах по технологии spray forming производится более 3000 т/г заэвтектического сплава Al-Si. Компания Spray Steel производит до 4000 т/г заготовок из сталей различного назначения, из которых, в частности, фирма BOHLER – UDDEHOLM AG (Австрия) изготавливает металлорежущий инструмент.

Большие перспективы данная технология имеет для создания новых конструкционных наноструктурных материалов, в частности, для дальнейшего развития отечественной технологии ИПД – интенсивной пластической деформации. Известно, что ИПД методом, например, равноканального углового прессования – РКУП, уже сейчас позволяет получать массивные наноструктурные заготовки размерами до 085 и длиной до 300 мм, пригодные для использования в машиностроении. При реализации РКУП заготовка неоднократно продавливается в специальной оснастке через два пересекающихся под углом 90 градусов канала с одинаковыми поперечными сечениями (при комнатной или повышенной температурах, в зависимости от деформируемого материала) (рис. 171). «Наноструктурность» материала получают за счёт деформации сдвигом. Наноструктурные материалы, вследствие очень малого размера зёрен, содержат в структуре большое количество границ зёрен, которые играют определяющую роль в формировании их необычных физических и механических свойств. При «традиционных» методах упрочнения – прокатке, волочении, ковке повышение прочности материала, как правило, сопровождается уменьшением его пластичности. Наноструктурированные за счёт ИПД материалы имеют высокую прочность и уникальную пластичность. Для формирования наноструктур методом ИПД весьма важными являются не только число

проходов, но и однородность исходного массива, равномерность распределения веществ, составляющих сплав, по объёму исходного материала. Технология *spray forming* позволяет получить хорошо подготовленный для ИПД материал.



Рисунок 165 – Схема процесса РКУП

Интересным и перспективным направлением использования наноматериалов является подшихтовка ультрадисперсных порошков в распыливаемый расплав основного, матричного металла. Такой метод даёт возможность создания уникальных сплавов с *равномерным* включением в объёмную структуру металла наночастиц различных материалов – металлов, включая редкоземельные, оксидов и пр.

Здесь же приведём некоторые данные об оборудовании – атомайзерах, с помощью которого могут быть реализованы проекты с использованием технологии *spray forming*.

Процесс распыливания металла (и получения порошка) – атомизация (от англ. *atomization* – распыление) различен в зависимости от исходного металла. Обычно атомайзер содержит плавильную камеру, где в условиях вакуума или инертной среды производят расплав металла, и распылительную камеру, где струю расплавленного металла, вытекающую из плавильной камеры, разбивают на мелкие капли с помощью высокоскоростного потока аргона, воздуха или водяного пара в зависимости от исходного металла и требований к форме частичек порошка. Конструкция машин позволяет получать металл в слитках (слив в изложницу), либо в виде порошка, либо в виде *spray forming*-заготовки. Слитки получают для последующей обработки давлением (прокат, ковка) и проведения необходимых исследований. Владение такой техникой, кроме возможности проводить широкий круг

научно-исследовательских работ в области создания перспективных технологий и материалов, снимает зависимость исследователей от поставщиков металлических порошков, позволяет создавать в требуемом количестве «свои» порошки для решения конкретных задач, а также обеспечивать расходными материалами АF-машины для послойного синтеза.

Плавильно-распылительная машина Hermiga 100/10 VI (Phoenix Scientific Industries Ltd., Великобритания) – атомайзер, лабораторно-исследовательская машина с донным сливом и с газовым (аргон) распылителем для получения порошков спецсталей, титановых сплавов и заготовок методом spray forming. Машина используется главным образом в целях НИОКР в НИИ и университетах для проведения исследований в области металлургии, для получения небольших слитков металлов и их сплавов для дальнейших физикохимических исследований, отработки технологии литья и механообработки материалов и т. д., а также для получения небольших партий порошковых металлов для целей общих задач порошковой металлургии. Машина имеет относительно небольшие размеры – 2100x3200x2400 мм, вес 2500 кг, что важно при инсталляции в стеснённых лабораторных условиях, типичных для университетов и НИИ. Машина может также выполнять функцию «поставщика» расходных (строительных) материалов для аддитивных машин, для выращивания изделий (в частности, литейных форм) из металлических порошков. Получаемый порошок имеет сферическую геометрию частиц. Скорость охлаждения при атомизации от 10^3 до 10^6 К/с. Модель Hermiga 100/10 VI имеет легкосъёмный тигель ёмкостью 10,0 кг по стали. Дисперсность порошка варьируется от 10 до 100 мкм. Порошок может быть дополнительно разделён на отдельные фракции с помощью стандартных вибросит. Широкий спектр расплавляемых металлов, включая пиррофорные сплавы и сплавы редкоземельных металлов. При получении алюминиевых порошков с целью снижения опасности взрыва предусмотрено регулируемое пассивирование. Как опция – атомизация в воде для получения металлических гранул. В линейке оборудования фирмы PSI имеются также модели Hermiga 75/5 VI, Hermiga 100/25VI (все с донным сливом), Hermiga 100/50V21, Hermiga 120/100 V21, Hermiga 100/200 V21 (все с поворотным тиглем), которые имеют ёмкость тигля по стали, соответственно, 5, 25, 50, 100 и 200 кг и являются машинами для мало – и среднеосерийного производства металлических заготовок и порошков.

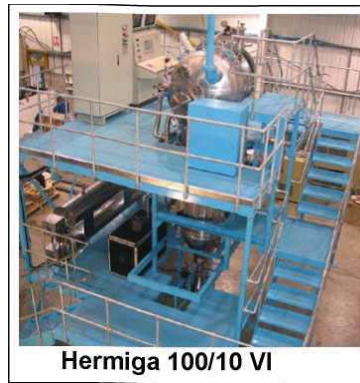


Рисунок 166 – Плавильно-распылительная машина Hermiga

Компьютерная томография для измерений и неразрушающего контроля литых и металлопорошковых изделий

Для целей НИР, в частности, металлургических исследований, дефектоскопии и широкого круга инженерных задач вообще большой интерес представляют системы компьютерной томографии, позволяющие «увидеть» внутреннюю структуру изучаемого объекта. В контексте данной работы, делающей акцент на технологическом обеспечении в первую очередь НИОКР посредством аддитивных технологий, томографы представляют особый интерес для отработки технологии литья ответственных изделий с техники позволяет оперативно исследовать проблемные места в отливке, объективно оценить степень их важности, провести варианты исследования литниковой системы, режимов пред- и пост-обработки отливки и таким образом в сжатые сроки отработать бездефектную технологию получения литых изделий. Современные системы компьютерной томографии позволяют идентифицировать объекты (поры, раковины, включения и т. д.) с высоким разрешением, получать по сути трёхмерный скан детали.

По томограмме можно получить наглядное изображение и любого сечения объекта, и 3-х мерной модели в целом, которая также может быть сопоставлена с исходной САД-моделью (рис. 173). Важным параметром системы является размер пятна фокуса при фокусировании рентгеновских лучей. Чем меньше его размер, тем выше разрешение системы, тем более чёткое и достоверное изображение проецируется на детектор. В современных системах для промышленных задач размер пятна фокуса составляет 200 и менее нанометров (0,2 мкм), что позволяет создавать томографы для достаточно габаритных объектов, таких как блоки и головки цилиндров двигателей, корпусных деталей энергетических машин и т. д.

Universal и Tomoscope для целей НИОКР, имеющие в своём составе макро- и микро-фокусные трубки и линейный и

плоскопанельный детекторы. Микрофокусные трубки открытого типа с мощностью излучателей IQ – 225 кэВ/0.01–3.0 тА.

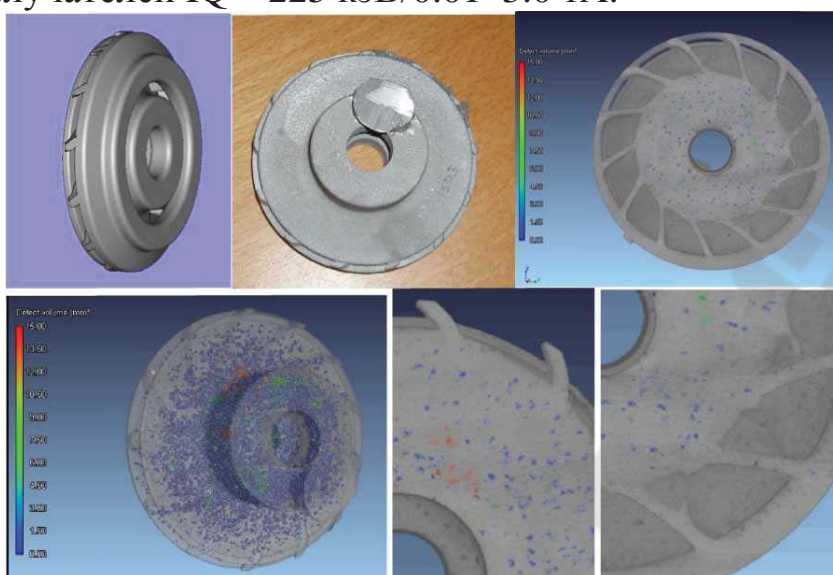


Рисунок 167 – Инспекционный контроль и анализ качества литейных деталей

Макрофокусные трубки 60 – 450 кэВ/2.0–9.0 тА. Масса инспектируемой детали до 65 кг, высота – до 650 мм, диаметр – до 635 мм. Томограф имеет гранитное основание и может быть использован в качестве контрольноизмерительной машины. Разрешение до 1 мкм, точность измерений 10 мкм. Томографы позволяют проводить регистрацию и анализ дефектов и внутренней структуры деталей практически из всех конструкционных материалов, включая пластмассовые и композитные. Эти машины чрезвычайно удобны и полезны для отработки технологии литья, а также для входного и выходного контроля особо ответственных отливок и металлопорошковых изделий с повышенными требованиями на герметичность и качество внутренней структуры материала. Известными производителями компьютерных томографов являются также: Nikon (производство в Бельгии), General Electric (подразделение Phoenix), Carl Zeiss, Werth, Matrix Technologies (Германия) Для лабораторных исследований представляют интерес относительно недорогие (80–120 тыс. евро) томографы CTportable (Fraunhofer EZRT), и томографы серии SHR (Shake GmbH) с трубками 50–160 кВ. Наиболее популярным программным продуктом для обработки данных томографирования, контрольных измерений и анализа является VGStudio Max 2.1 компании Volume Graphics.

CAD-модель, отливка, полученная литьём по выжигаемым синтез-моделям и результаты томорафических исследований (с указанием дефектных мест).

8 КОМПЬЮТЕРИЗИРОВАННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ В ОБЛАСТИ АНАЛИЗА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ МИКРОСТРУКТУРЫ СПЛАВОВ

При оптимизации химического состава литых железоуглеродистых сплавов, например, быстрорежущих сталей и технологии получения заготовок инструмента основной целью является формирование такой структуры, которая обеспечила необходимую теплостойкость, прочность и износостойкость изделия, высокие показатели которых, в свою очередь, явились бы гарантией предотвращения преждевременного выхода их из строя.

Для практического использования литейных технологий чрезвычайно важно обеспечить высокие показатели ударной вязкости образцов сплава, что гарантируется только тщательным контролем его структурных параметров. Тщательность и оперативность контроля может быть достигнута только применением автоматизированных методов обработки изображения микроструктур. Эти методы, в свою очередь, могут быть применимы только в случае правильного выбора контролируемых параметров.

В данной области исследований широко применяются информационные технологии, которые можно разделить на следующие типы:

1. Компьютеризированное оборудование с программным обеспечением.
2. Программное обеспечение для анализа микроструктур.
3. Базы данных микроструктур.

Промышленный программно-аппаратный комплекс анализа изображений SIAMS 700.

Для осуществления автоматизированной обработки микроструктур применяют промышленный программно-аппаратный комплекс анализа изображений SIAMS 700 представлен на рисунке 75.

Анализатор SIAMS 700 является средством измерения «Анализатор фрагментов микроструктуры твёрдых тел». Применение Анализатора SIAMS700 делает структурный анализ материалов лёгким и точным.

Аппаратное обеспечение:

1. Микроскоп оптический
2. Моторизованный столик для микроскопа
3. Цифровая микроскопная видеокамера высокого разрешения

SIMAGIS

4. Вычислительная станция SIAMS Visual Station, периферийные устройства

5. Планшетное устройство оцифровки макроструктуры

Дополнительно поставляется оборудование для изготовления шлифов:

- 1) Отрезные станки
- 2) Прессы для горячей запресовки образцов, материалы для холодной заливки
- 3) Шлифовально-полировальные станки, устройство для электролитической полировки
- 4) Автоматизированные линии и ванны для макротравления

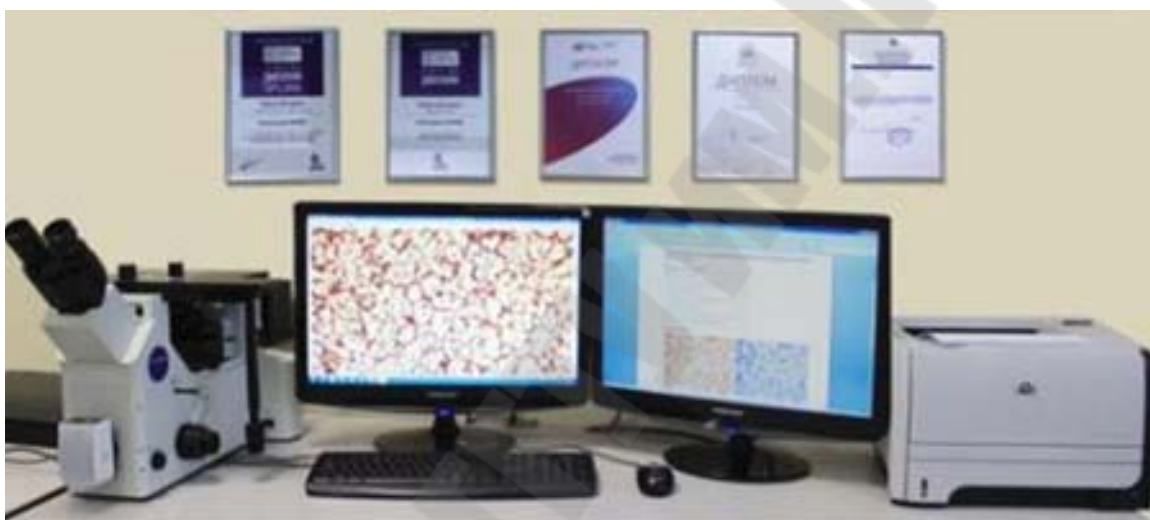


Рисунок 168 – Комплекс SIAMS 700

Программное обеспечение SIAMS 700

Пакет программного обеспечения комплектуется из набора модулей, которые предоставляют лаборанту совершенно новый подход к работе:

1. коллективной работы и удалённой сервисной поддержки в режиме On-Line;
 2. построения панорамного изображения в режиме обычного просмотра образца;
 3. просмотра «живого» видео и съёмки микроструктуры на удалённых рабочих местах;
 4. создания автоматически пополняемых атласов структур;
 5. прямого экспорта результатов анализа в интегрированный с анализатором
 6. электронный журнал и построения контрольных карт Шухарта.
- Весь пакет программного обеспечения состоит из модульной

структуры. Нужные модули можно выбрать исходя из решаемых задач.

Модуль «Инструментальная платформа «SIAMS Photolab»

Модуль представлен на рис. 76. Интерфейс платформы представляет собой электронные таблицы SIMAGIS для размещения изображений, математических функций их обработки и результатов.

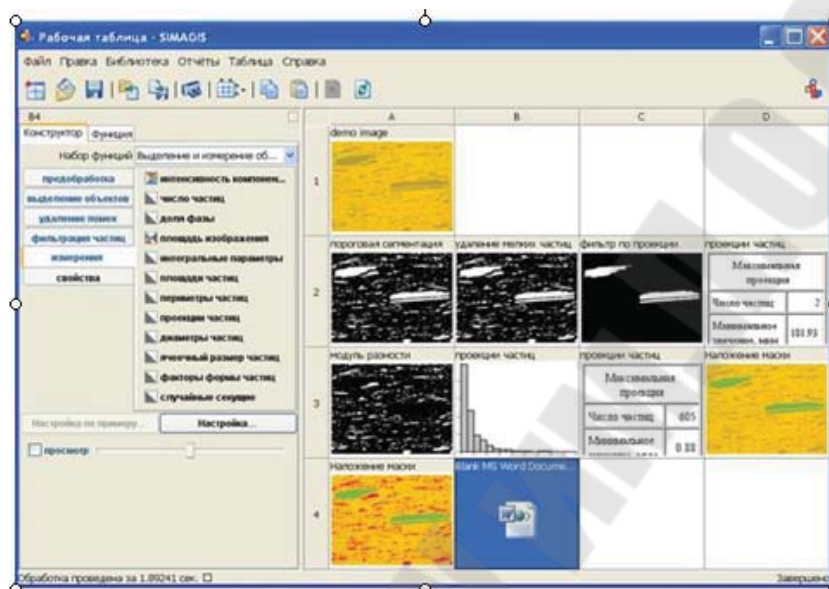


Рисунок 169 – Окно программы «SIAMS Photolab»

Возможности модуля

1. Визуализация и ввод изображений микроструктуры образцов с микроскопа, цифрового фотоаппарата или сканера.
2. Экспорт и сохранение и графических изображений в форматах tif, tiff, jpg, jpeg, png, bmp, img.
3. Получение пользователем сфокусированного изображения по серии расфокусированных.
4. Создание панорамы смежных полей зрения.
5. Повышение качества изображения: настройка цветового баланса, изменение яркости и контраста, выравнивание освещённости
6. Выделение различных деталей структуры, исходя из поставленной задачи: вычитание помех, фильтрация частиц по форме, размеру, цвету, яркости и другим характеристикам, наложение маски на выделенные элементы структуры.
7. Измерение любых размерных и планиметрических характеристик структурных составляющих.
8. Использование готовых алгоритмов – примеров методик анализа для самообучения пользователя принципу составления своих собственных алгоритмов.

9. Встроенный «Конструктор решений» – инструмент для создания собственных методик для одновременного анализа любого количества полей зрения.
10. Создание и сохранение отчёта в формате MS Word. Возможен экспорт результатов анализов в MS EXCEL.
11. Создание альбомов изображений микроструктур по заданной классификации и выбранному варианту оформления.

Модуль «SIAMS StatBook» (рис. 176). Предназначен для формирования электронного лабораторного журнала. Результаты анализа микроструктур передаются в «SIAMS StatBook» из любой методики программного обеспечения SIAMS нажатием одной кнопки.

Модуль «Сетевая платформа «SIAMS Apps». Сетевая платформа «SIAMS Apps» предназначена для коллективной работы, систематизации и хранения изображений и результатов анализа структур, удалённого доступа к информации. «SIAMS Apps» объединяет автоматизированные методики анализа, инструменты для измерений и информационную систему. Система устанавливается отдельно, на сервере, обеспечивая работу на любом персональном компьютере, входящих в сеть организации.

Модуль «Тематические электронные атласы для металлографического анализа методом сравнения»

Возможности модуля:

1. Упорядоченное хранение большого количества графических изображений микроструктур.
2. Одновременный просмотр двух изображений микроструктур (исследуемого и выбранного или эталонного из атласа).
3. Авто подбор наиболее подходящих вариантов микроструктур для сравнения по требуемым параметрам.
4. Привязка изображений микроструктур к идентификационным признакам образца и результатам сравнительного анализа.
5. Дополнение атласа новыми изображениями микроструктур по окончании очередного исследования по выбору пользователя.
6. Помощь в формировании выводов по результатам сравнительных анализов на основании имеющихся.
7. Автоматическое формирование отчёта по результатам анализа нескольких полей зрения.

Модуль «SIAMS VideoPanorama». Данный модуль предназначен для создания панорамных изображений микроструктуры исследуемых образцов. В работе модуля не используется моторизованный столик микроскопа. Оператор вручную управляет столиком микроскопа и в реальном времени происходит построение панорамного изображения просмотренных областей образца. Работу модуля можно посмотреть здесь: <https://goo.gl/4cpzWi>.

Модуль «SIAMS AutoScan». Данный модуль предназначен для управления моторизованным столиком микроскопа и построения панорамных изображений без участия оператора.

Модуль «SIAMS Video». Данный модуль предназначен для удалённого просмотра микроструктур исследуемых образцов под микроскопом в режиме реального времени, что не требует установку специального программного обеспечения на компьютер, подключённый к микроскопу. После включения модуля «SIAMS Video» на компьютере, к которому подключён микроскоп, начинается прямая трансляция с видеокамеры микроскопа, которую могут просматривать авторизованные пользователи «SIAMS Apps». Оператор управляет трансляцией, управляя микроскопом и пользователи, наблюдающие видеотрансляцию, могут захватывать и сохранять изображение требуемого интересующего поля зрения в любой момент времени.

Методики Анализатора SIAMS 700. Методики систематизированы по различным исследуемым материалам, например, стали, чугуны, сплавы на основе вольфрама и другие. Для каждого материала сгруппированы методики по типу контролируемых параметров микроструктур, например анализ размера зерна, анализ глубины слоя и другие. В анализаторе SIAMS 700 методики делятся на три типа:

- 1) автоматические (А);
- 2) полуавтоматические (П);
- 3) Методики сравнения со стандартными шкалами нормативных документов (Ср).

Автоматические методики. Предназначены для автоматизации всего процесса анализа – от ввода изображения с видеокамеры микроскопа, до распечатки сформированного по результатам исследования отчёта. Каждая из методик работает по своему собственному алгоритму, удовлетворяя методологическую преемственность по отношению к российским и зарубежным стандартам. Методики представлены на рис. 178.

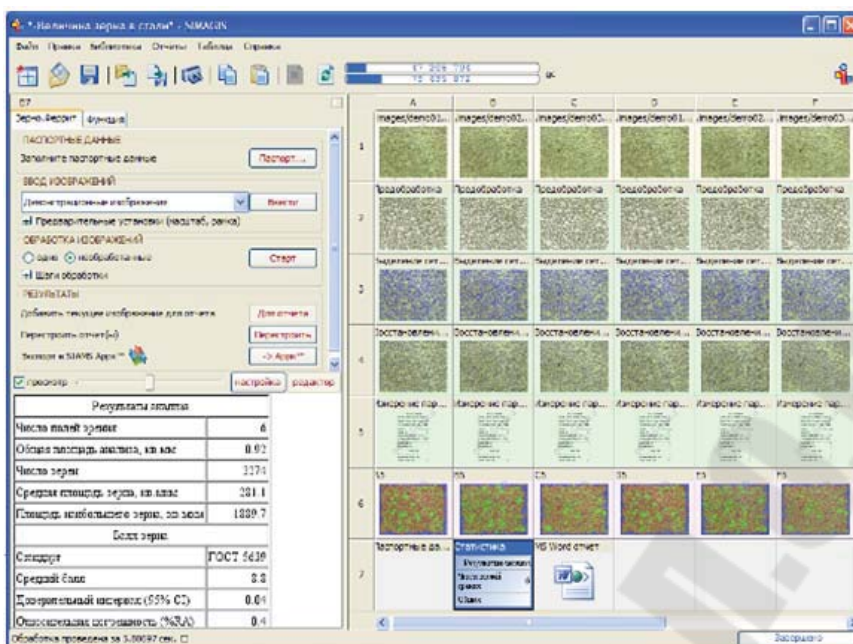


Рисунок 176 – Окно программы

«Автоматические методики Анализатора SIAMS 700»

Возможности методик:

1. Одновременный анализ нескольких полей зрения с получением результатов по каждому полю зрения.
2. Каждая методика открывается в своём окне программы в виде единой таблицы, в ячейках которой последовательно расположены все исходные, обработанные изображения и промежуточные микроструктуры и результаты анализа для каждого поля зрения и для всего образца.
3. Существует возможность проверки правильности выделения структурных составляющих исследуемых образцов с помощью включения регулировки прозрачности маски или режима мерцания маски.
4. Представленная в виде электронной таблицы методики дают возможность пользователю на любом этапе анализа произвести корректировку настройки функций для более точного выделения структурных составляющих. При этом программа автоматически пересчитывает все далее идущие этапы и перестраивает отчёт.
5. Возможность ручной корректировки микроструктур, выделением объектов измерения при помощи встроенного графического редактора.
6. Автоматическое формирование сводной таблицы результатов, отчёта.
7. Автоматическое формирование в протокол графиков, сводных таблиц, обработанных и исходных фотографий микроструктур.

8. Совместимость с приложениями «SIAMS VideoPanorama», «SIAMS StatBook», «Тематические электронные атласы».

Полуавтоматические методики.

Возможности методик:

1. Автоматическая обработка результатов по указанным объектам.
2. Поочерёдный анализ нескольких полей зрения с получением результатов по каждому полю зрения.
3. Автоматическое формирование сводной таблицы результатов, отчёта.
4. Автоматическое включение в отчёт графиков, сводных таблиц, исходных и обработанных изображений микроструктур.
5. Совместимость с приложениями «SIAMS StatBook», «SIAMS VideoPanorama», «SIAMS Apps», «SIAMS AutoScan».

Рабочее окно методики представлено на рис. 177.

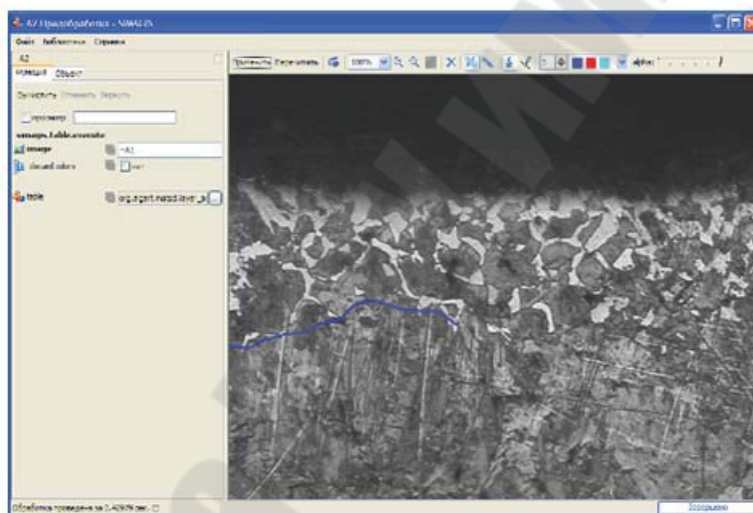


Рисунок 177 – Окно программы «Полуавтоматические методики Анализатора SIAMS 700»

Методики сравнения со стандартными шкалами нормативных документов

Данные методики предназначены для автоматизации визуального сравнения микроструктуры образца с фотографиями микроструктур, приведённых в ГОСТ. Анализ проводится по произвольному количеству полей зрения с сохранением результатов. Из стандартного ряда фотографий, пользователь выбирает одну со структурой, соответствующей анализируемой (рис. 178).

Возможности методик:

1. Автоматическое формирование изображений к единому масштабу.

2. Синхронное изменение масштаба сравниваемых микроструктур.
 3. Автоматическое присвоение балла микроструктуры.
 4. Анализ любого количества полей зрения с сохранением результатов анализа.
 5. Автоматическое формирование отчёта.
 6. Возможность самостоятельного создания пользователем шкал эталонов сравнения на основе микроструктур.
 7. Интеграция с приложениями «SIAMS StatBook», «SIAMS Apps».
- Рабочее окно методики представлено на рис. 180.

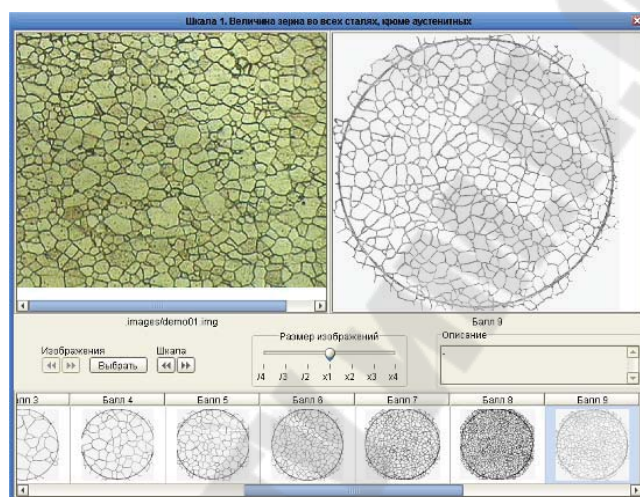


Рисунок 178 – Окно программы «Методики сравнения со стандартными шкалами нормативных документов»

Рентгеновский дифрактометр ДРОН 3.0

Общие сведения

Дифрактометр ДРОН-3.0 предназначен для выполнения широкого круга рентгеноструктурных исследований монокристаллов и поликристаллов различных материалов. Применение специальных приставок делает возможным проведение исследований с охватом области углов, начиная с 12 минут; в температурных интервалах от +20 до +2000 °С и от +20 до –180 °С. В основе данного метода лежит явление дифракции рентгеновских лучей на трёхмерной кристаллической решётке. Фотография ДРОН 3.0 представлена на рис. 179.

Для определения фазового состава и параметров тонкой структуры исследуемых образцов проводится съёмка полной рентгенограммы в непрерывном режиме с шагом по углу 0,1°. Интервал углов $2\theta = 10^\circ - 90^\circ$ выбирается с учётом нахождения линий предполагаемых фаз картотеки.

Аппаратное обеспечение

Основными частями дифрактометра ДРОН-3.0 являются:

1. Рентгеновский аппарат;
2. Гониометрический блок;
3. Блок автоматического управления;
4. Персональный компьютер;
5. Устройство вывода информации.



Рисунок 170 – Дифрактометр ДРОН 3.0

Программное обеспечение.

Расшифровка фазового состава полученной рентгенограммы проводится в программе *Crystallographica Search-Match (Oxford)* и включает:

1. удаление фона (автоматически или по точкам);
2. автоматическую разметку линий с удалением $K\alpha_2$ дублетов и расчётом характеристик пиков;
3. выбором порога чувствительности (0–100 %) и ширины линии;

Идентификация фазового состава проводится в режимах:

1. автоматического поиска эталонных образцов в полной базе данных *PDFWIN 2,0*, включающей более 120 тысяч карточек;
2. создания собственной базы данных в программе *Crystallographica Search-Match* по данным элементного состава, известной сингонии и др., значительно сужающей число эталонных карточек, позволяющей повысить точность и увеличить скорость индентификации рентгенограмм. Рабочее окно программы представлено на рисунке 180.

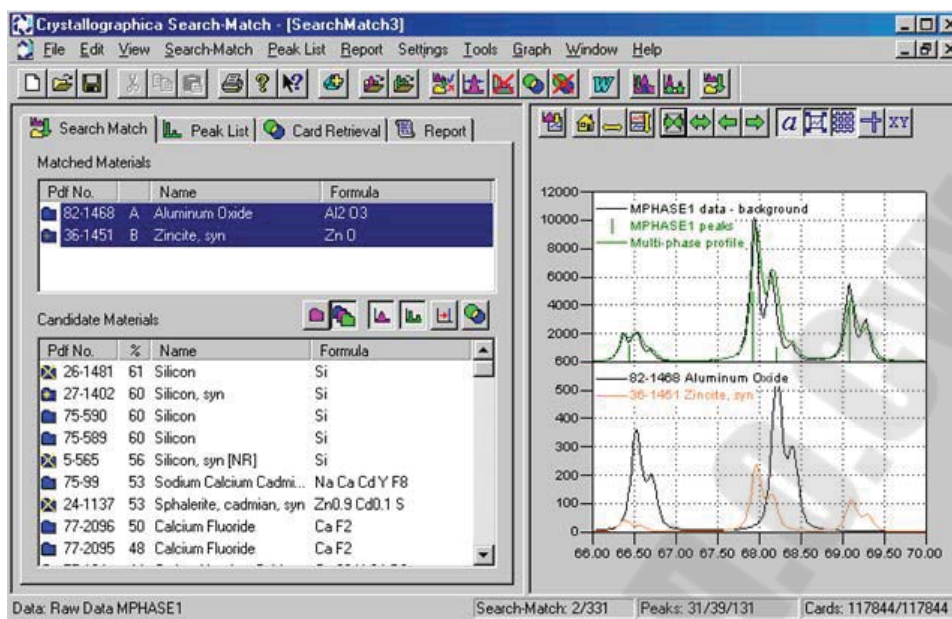


Рисунок 171 – Рабочее окно программы «Crystallographica Search-Match»

По анализу рентгенограмм сравнения проводится отбор и идентификация фазового состава образца. Результаты идентификации фазового состава включают в себя данные о параметрах рентгеновского спектра, подобранных карточках (название, химическая формула и номер), характеристике пиков (угол, межплоскостное расстояние, интенсивность, полуширина и принадлежность к карточке).

Для расчёта параметров тонкой кристаллической структуры (размер ОКР, плотность дислокаций, относительная средняя микродеформация, параметр решётки) выбираются линии двух порядков отражения от одной плоскости, которые для надёжной регистрации имеют достаточную интенсивность и не совпадают с другими отражениями

Пост микроконтроля МК-3Т. Общие сведения

Пост микроконтроля (рис. 82) – измерительный комплекс на базе микроскопа МИ-1, предназначен для контроля и измерения структуры, состава и свойств металлов, сплавов при производстве в металлургии, входном контроле металлов в машиностроении.



Рисунок 172 – Пост микроконтроля МК-1

Заложенные в оптической составляющей микроскопа возможности, позволяют широко его использовать для анализа микроструктур сплавов.

Пост микроконтроля МК-3 оснащён качественной оптикой высшего класса с увеличенным полем наблюдения, что позволяет рассматривать исследуемые объекты без существенных потерь времени на поиск объектов при изменении увеличения. В соответствии с поставленной задачей, объекты можно исследовать в светлом и тёмном поле, реализовав режим поляризационного контраста. Пост микроконтроля МК-3 позволяет осуществлять TV контроль и компьютерный анализ изображения.

Аппаратное обеспечение

Пост микроконтроля МК-3 состоит из следующих комплектующих:

1. Компьютер
2. Микроскоп МИ-1

Программное обеспечение

Поставляемое к посту программное обеспечение – SimpleIM. Рабочее окно программы представлено на рис. 182.

С помощью данного оборудования можно осуществлять следующие технологические операции:

- 1) измерение геометрических размеров;
- 2) измерение площади и процентного количества включений;
- 3) подсчёт и измерение различных коэффициентов формы и распределения частиц;
- 4) автоматизация измерений в зависимости от типа материала на изображении;

- 5) специальные алгоритмы восстановления границ зёрен для однофазных и многофазных материалов;
- 6) вычисление относительной однородности материала с помощью функции Измерение однородности;
- 7) возможность быстрого создания отчётов о результатах эксперимента на основе сохранённых шаблонов;
- 8) отображение подробной статистической информации в виде таблиц и гистограмм;
- 9) представление данных и форматирование изображений в стандартизованном формате.

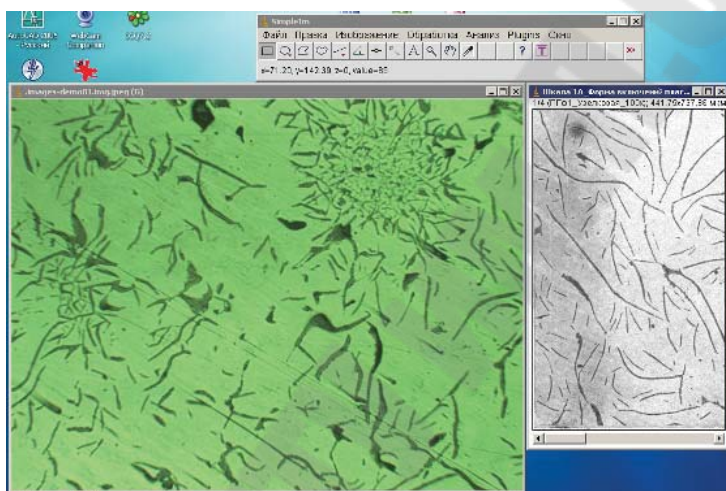


Рисунок 173 – Рабочее окно программы SimpleIM

Данные измерений для ASTM-стандартов представляются в формате, совместимом с промышленными стандартами.

Программа анализа изображений NEXSYS. Компания «Новые экспертные системы» является разработчиком специализированного программного обеспечения NEXSYS ImageExpert™, которое состоит из нескольких самостоятельных программ для работы с микроструктурами. Так же этот пакет используется и в других областях исследований, таких как медико-биологических или экологических, научных исследований в области твёрдого тела, жидкостей или плазмы, и многие другие задачи.

NEXSYS ImageExpert™ Pro 3. Этот программный продукт предназначен для количественного анализа изображений. Широкий набор функций по обработке изображений и выделению интересующих структурных элементов позволяют использовать анализатор для решения широкого круга задач. Наличие оптимального набора инструментов намного упрощает применение ручных операций. На стадии предварительной обработки он позволяет, к примеру, восстановить резкое изображение из ряда частично-резких, устранить

дефекты освещённости шлифа, усилить чёткость мелких деталей. Для выделенных объектов на изображениях рассчитывается несколько десятков количественных параметров, при этом их подборка и точность вывода настраиваются пользователем под конкретные виды анализа. Полученные количественные данные формируются и представляются в соответствии с требованиями российских и международных стандартов. Отчёты формируются в среде текстового редактора Microsoft Word. Рабочее окно программы изображено на рисунке 183.

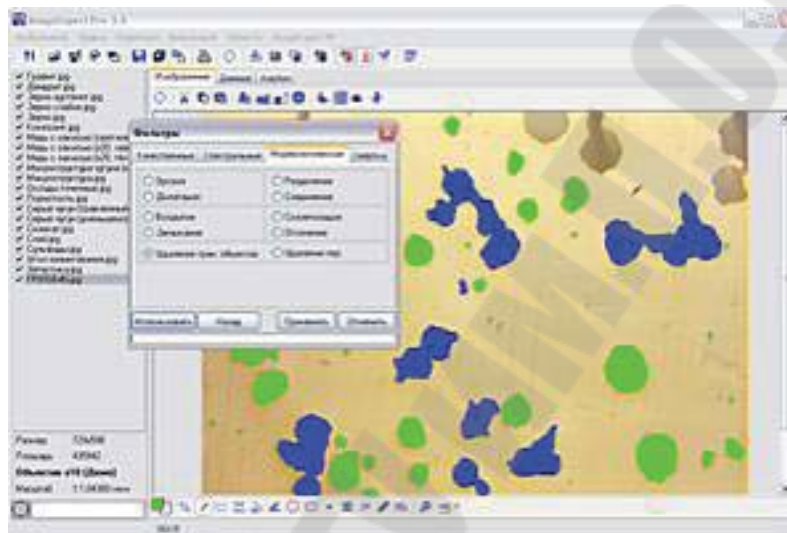


Рисунок 174 – Окно программы NEXSYS ImageExpert™ Pro 3

NEXSYS ImageExpert™ Sample 2

Данное программное обеспечение предназначено для качественного анализа изображений и ориентировано на анализ структур посредством сравнения с эталонами. Изображения с камеры напрямую поступают в программу анализа, затем автоматически масштабируются и пользователь назначает каждому полю зрения балл, сравнивая с эталонами в правой части программы, пролистывая их один за другим. На основе полученной статистики формируется автоотчёт в Microsoft Word, включающий название шкалы стандарта, изображение, баллы по полям зрения, гистограмму и таблицу, общую статистику и вывод, а также подпись оператора (рис. 184).

Также, в данной программе, пользователи имеют возможность ввести в анализатор требуемые стандарты самостоятельно, и при необходимости дополнительно приобретать комплекты эталонных шкал у производителя. Рабочее окно программы изображено на рисунке 186.

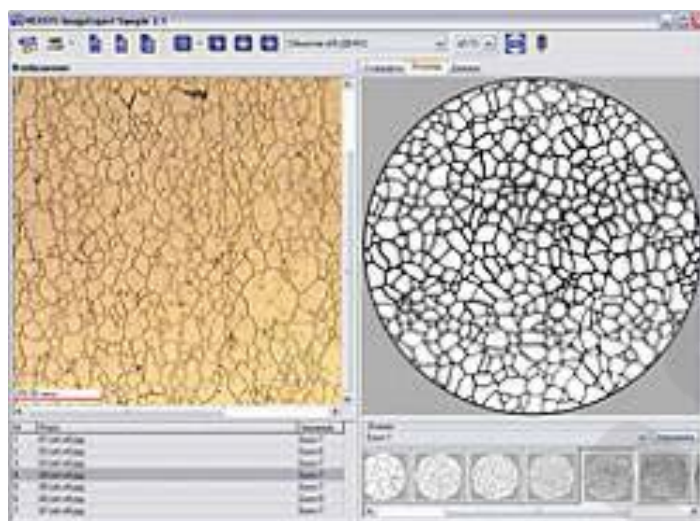


Рисунок 175 – Окно программы NEXSYS ImageExpert™ Sample 2

EXSYS ImageExpert™ MicroHardness 2

Данная программа является продолжением новой технологии ImageExpert™ третьего поколения и предназначена для измерений микротвёрдости фазовых структурных составляющих и для получения распределения микротвёрдости по толщине, например химико-термически обработанных слоёв. Программа позволяет получать изображения отпечатков с цифровых или аналоговых видеокамер в реальном времени или загружать полученные ранее изображения из файлов. Проведение предварительной калибровки аппаратно-программного комплекса позволяет получать адекватные значения микротвёрдости. Методика анализа производится в полном соответствии с ГОСТ 9450–76 «Измерение микротвёрдости вдавливанием алмазных наконечников» по методу восстановленного отпечатка. Рабочее окно программы изображено на рисунке 185.

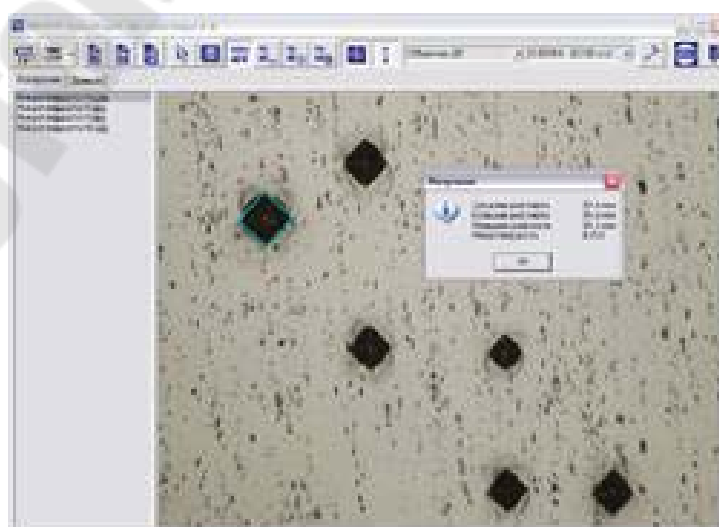


Рисунок 176 – Окно программы NEXSYS ImageExpert™ MicroHardness 2

NEXSYS ImageExpert™ Gauge

Данная программа предназначена для получения изображений анализируемых структур и материалов, наблюдаемых в микроскопе, с проведением оператором простых геометрических измерений элементов структуры в реальных физических единицах.

Мастер съёмки, встроенный в программу, работает с широким спектром аналоговых и цифровых видеокамер. Пользователь, ведя съёмку в «живом» времени, имеет возможность сохранять отдельные её кадры. Для удобства оператора реализована возможность ступенчатого масштабирования для режима отображения видео и для сохраняемых изображений. Анализатор поддерживает наиболее популярные графические растровые форматы: bmp, jpg, gif, tif, psx, pcd, psd. Полученные изображения могут быть сохранены или распечатаны на принтере. Для загруженных изображений можно получать такие геометрические параметры, как линейная длина; значения углов определяемых по трём точкам или по двум не пересекающимся отрезкам; параметры окружности определяемой по трём точкам на её границе; параметры выпуклого четырёхугольника, определяемого по четырём точкам в углах фигуры. Рабочее окно программы изображено на рисунке 186.

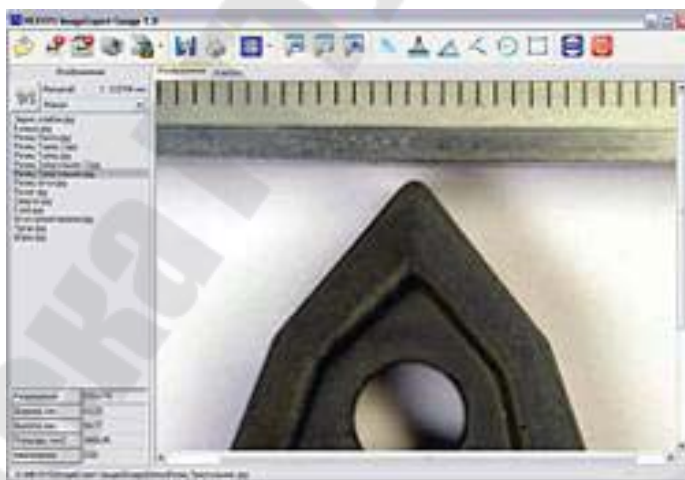


Рисунок 177 – Окно программы NEXSYS® ImageExpert™

Программа анализа SW Complex Analysis. Общие сведения

Программное обеспечение SW Complex Analysis предназначено для качественной и количественной оценки неоднородностей, возникающих во время эпитаксиального роста полупроводниковых структур методом МОСГФЭ. Использование данного программного обеспечения помогает оптимизировать параметры роста с целью значительного сокращения необходимого времени и материальных затрат при калибровке реактора перед выводом его на проектную

мощность и при периодической эксплуатации.

Решаемые задачи:

1. Построение карт сопротивления пластин: анализ однородности легирования;
2. Обработка и визуализация данных, получаемых с установки фотолюминесценции: карты фотолюминесценции и отражения на белом свете брэгговского зеркала;
3. Объединение данных по отдельным пластинам в единую структуру подложконосителя;
4. Построение радиальных сечений исходных данных (линейных профилей) как пластин, так и всего подложконосителя;
5. Количественный анализ неоднородности: статистический анализ данных.

Помимо главных задач, связанных с контролем качества роста полупроводниковых структур и оценки неоднородности, возникающей во время МОСГФЭ, программа может открывать, анализировать и отображать в 3D текстовые файлы с массивом вершин, а также проводить количественный анализ яркости (и построение трёхмерного профиля) изображений по четырём моделям расчёта светимости. В программу также включён инструмент для визуальной оценки длины волны светящегося объекта по его фотографии.

Анализ приведённых программ подтверждает возможность их использования для оценки структурных параметров структуры железоуглеродистых сплавов с вероятным прогнозированием их свойств и контроля качества. Рабочее окно программы изображено на рисунке 187.

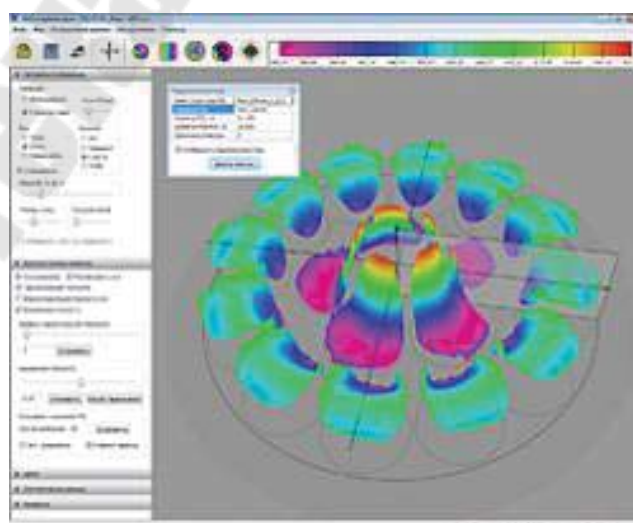


Рисунок 178 – Окно программы SWComplexAnalysis

Программа анализа изображений «Thixomet® Pro». Общие сведения

Программа анализа изображений «Thixomet® Pro» специально разработана для решения многих задач в металлургии и материаловедении. В программе анализа изображений происходит по различным методикам и стандартам. Данная программа прошла метрологическое освидетельствование как средство измерения.

Оценка среднего размера зерна

Оценка среднего размера зерна происходит по следующим стандартам: ГОСТ 5639–82, ГОСТ 21073–75, ASTM E1382, ASTM E112, DIN 50 601.

В этих модулях производится автоматическое распознавание границ зёрен, а средний размер зерна рассчитывается по найденному числу зёрен и площади, которую они занимают. С помощью специальных инструментов можно реконструировать плохо протравленные границы, исключить из анализа мелкие выделения второй фазы и др. (188).

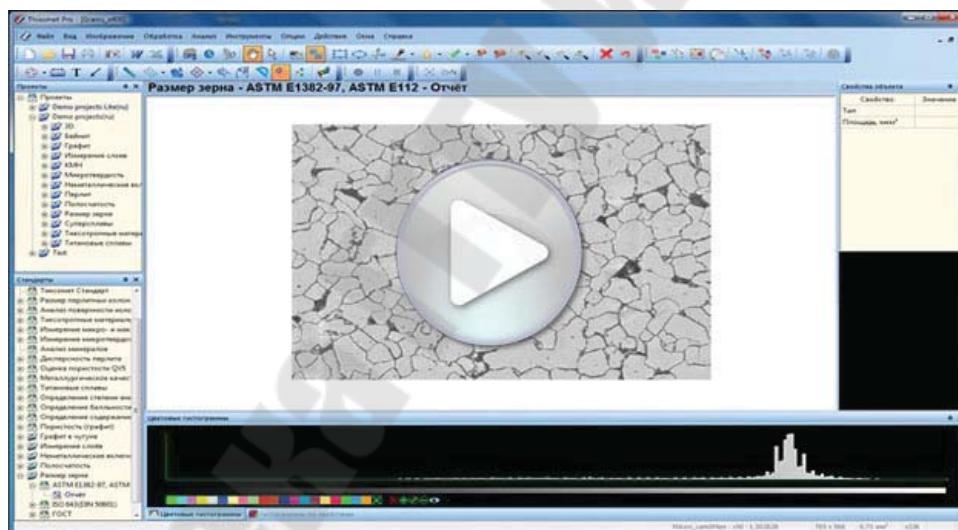


Рисунок 179 – Оценка среднего размера зерна

Оценка загрязнённости стали неметаллическими включениями

Осуществляется по ASTM E1245, ГОСТ 1778–70, DIN 50602. На основе стереологических соотношений определяются все важнейшие параметры неметаллических включений или второй фазы: объёмная доля, размер и характер взаимного расположения. Назначение балла производят по измеренной объёмной доле для каждого типа включений на основе известной градуировочной кривой «балл-объёмная доля». Производится разделение включений на типы, предусмотренные стандартами, поиск наиболее загрязнённого поля или подсчёт количества полей определённого уровня загрязнённости для каждого типа

включений в зависимости от выбранного метода. Рабочее окно методики изображено на рисунке 191.

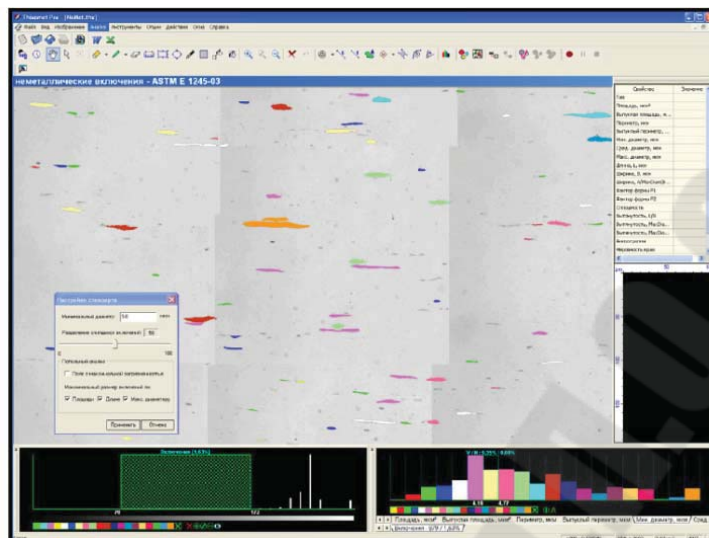


Рисунок 180 – Оценка загрязнённости стали неметаллическими включениями

Измерение слоёв и покрытий. Определение глубины обезуглероженного слоя происходит в режиме «от поля к полю» или «от панорамы к панораме» в автоматическом или ручном. В автоматическом режиме распознаются кромки образца и границы зон обезуглероживания. С помощью инструментов тонкой настройки можно задавать требуемое соотношение «феррит-перлит», по которому будет определена граница обезуглероживания. Также присутствует возможность рассчитывать соответствующие средние значения, вести статистику измерений и проводить измерения многослойных структур. Рабочее окно методики изображено на рисунке 190.

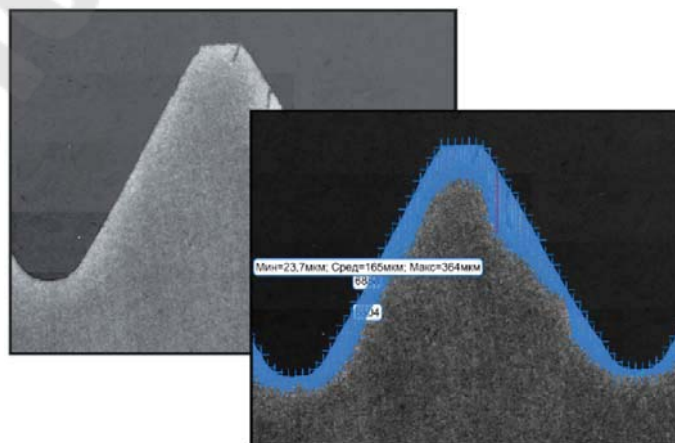


Рисунок 181 – Обезуглероженный слой на поверхности зуба фрезы

Автоматизация измерений твёрдости

Данный модуль используется для автоматизации измерения микро- и макро – твёрдости по Виккерсу, Кнупу или Бриннелю.

Распознавание отпечатков индентора производится автоматически с возможностью коррекции результатов распознавания, либо вручную, с помощью специального измерительного инструмента. Рабочее окно методики изображено на рис. 191.

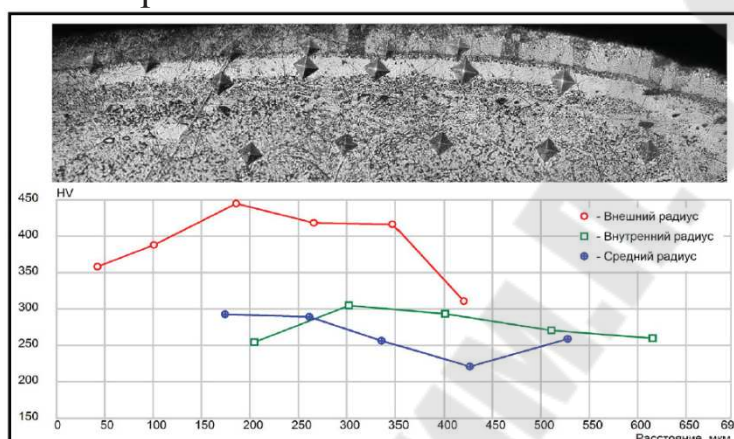


Рисунок 182 – Распределение микротвёрдости по глубине

Анализ поверхности изломов

Анализ поверхности изломов производится методами текстурного анализа, где распознаются области вязкого или хрупкого излома образцов после испытаний на ударную вязкость или падающим грузом. Исследуются предварительно созданные панорамные изображения, улучшенные с помощью алгоритма расширенного фокуса.

Рабочее окно методики изображено на рис. 192.

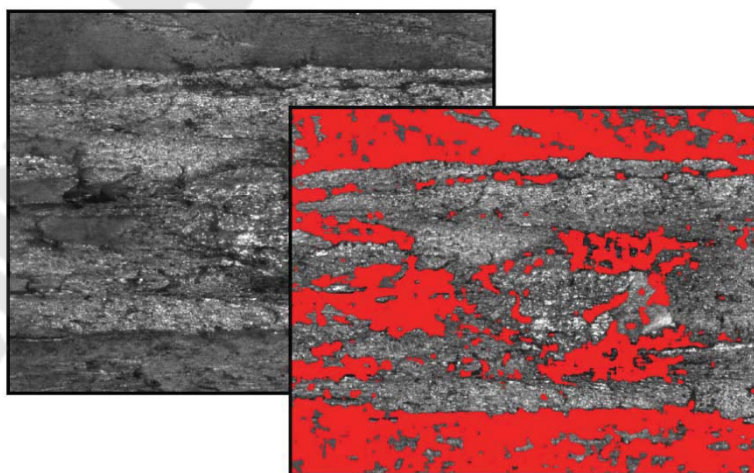


Рисунок 183 – Поверхность разрушения образца с участками вязкого и хрупкого разрушения

Методы сравнения с эталонами

В данном модуле оценка микроструктур производится методом сравнения с эталонами, где полупрозрачные изображения которых накладываются на изучаемое изображение микроструктуры. По результатам сравнения происходит расчёт статистических параметров и формируется отчёт. Имеется базовый набор стандартных шкал, которые возможно неограниченно расширить пользователю.

Определение структурной полосчатости стали

Методика «ВНИИСТ» предназначена для определения структурной полосчатости с помощью баллов соответствующей шкалы, аналогичной ГОСТ 5640–68, но для структуры «феррито-бейнитной». Шкала построена по принципу увеличения количества полос второй фазы с учётом их сплошности и степени вытянутости ферритного зерна. Для тонкой настройки методики используется алгоритм восстановления плохо протравленных границ зёрен. Полосчатость в соответствии с требованиями этого стандарта описывается словесно. Рабочее окно методики изображено на рис. 193.

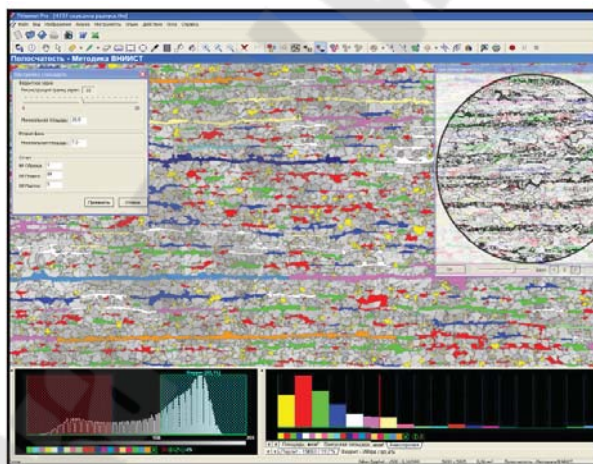


Рисунок 184 – Определение структурной полосчатости стали

Оценка микроструктуры перлита

Данный модуль разработан для оценки размера зёрен перлита и его колоний, а также для определения соотношения структуры «перлит-феррит» в стали. Для распознавания колоний перлита используется метод выделения границ по перепадам яркости, а также их реконструкция по морфологии. По результатам измерений формируется отчёт с процентным соотношением «перлит-феррит» и баллом перлитных колоний, назначенным по аналогии с оценкой размера ферритного зерна по ГОСТ 5639.

Также в этом модуле доступны настройки для отделения феррита от цементита в перлите для анализа перлита различной степени дисперсности. Рабочее окно методики изображено на рис. 194.

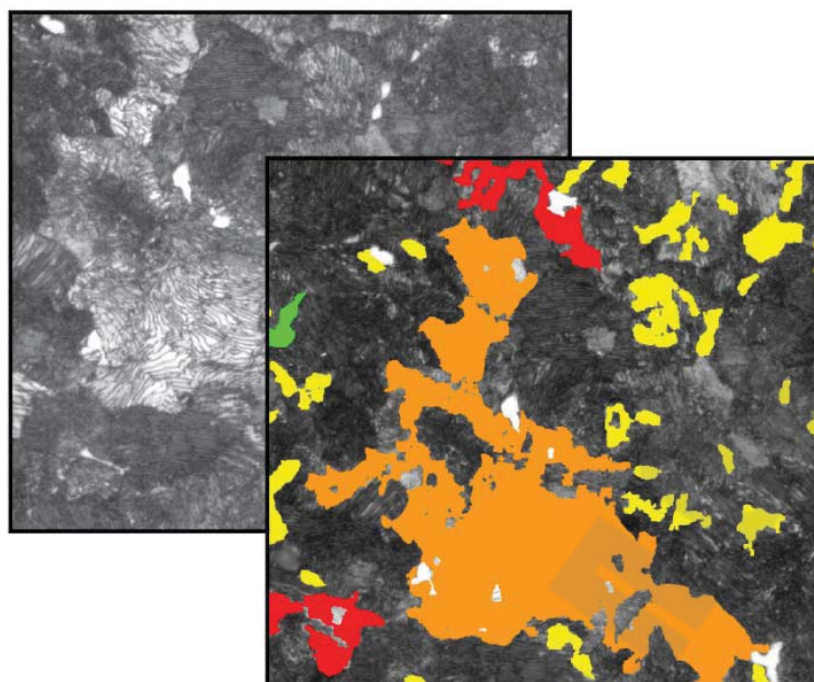


Рисунок 185 – Оценка микроструктуры перлита

Экспорт продуктов в ms office. Полученные результаты, изображения, их фрагменты в оригинальном или распознанном виде, калиброванные изображения с микронной линейкой или маркером, результаты измерений метрических параметров объектов изображения возможно экспортировать в приложении MS OFFICE для формирования индивидуальных отчётов.

9 БИОНИЧЕСКИЙ (ГЕНЕРАТИВНЫЙ) ДИЗАЙН В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Технологическое развитие в наступившую цифровую эпоху совершает, можно сказать, парадоксальный вираж, отклоняясь с пути создания все более техногенных изделий и обращаясь за помощью к живой природе. Непрерывный поиск инновационных, идей для генерации во всех сферах экономики и жизни людей продукции с новыми необычными свойствами ведёт к тому, что традиционные методы производства уже не в состоянии их реализовать. Появившийся во второй половине прошлого века и становящийся всё более актуальным бионический дизайн – подход к разработке принципиально новых конструкций на основе природных структурных форм – способен создавать в кратчайшие сроки сложнейшие инженерные решения, фактически столь же совершенные, как и те, что были созданы природой за тысячелетия эволюции. Каковы, однако, реальные перспективы этого подхода потеснить традиционные технологии моделирования? Что он может предложить для улучшения традиционных деталей и конструкций? Какова специфика внедрения бионического метода проектирования изделий в современное производство? Какое программное обеспечение способно обеспечить создание подобных конструкций? Своё экспертное мнение высказывают ведущие специалисты и топ-менеджеры российских и зарубежных компаний, имеющих в данной области наибольшую экспертизу.

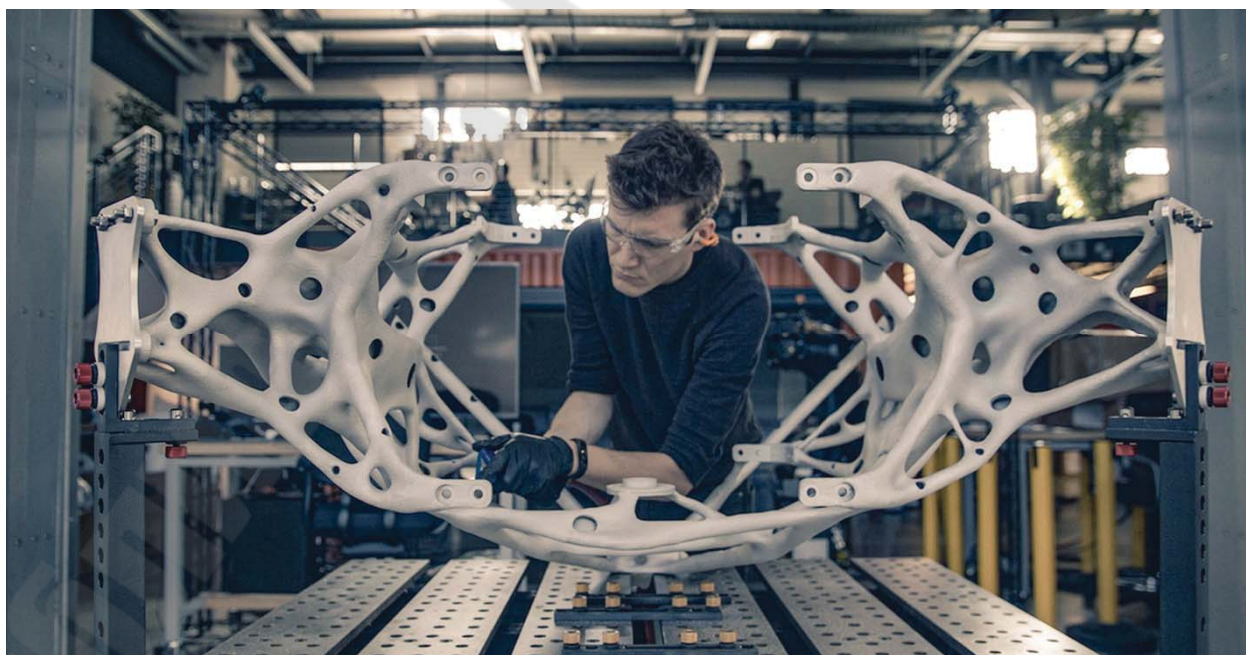


Рисунок 186 – Использование деталей полученных с применением генеративного дизайна в автопроме

Бионический дизайн приверженцы этого направления в промышленном конструировании провозглашают в качестве принципиально нового подхода к созданию best-in-class оптимизированных конструкций.



Рисунок 187 – Пример мультивариативности генеративного дизайна

Основные отрасли промышленности, такие как энергетика, современная архитектура, а также машиностроение для гражданского и особенно военного направления все ещё требуют конструкций с определённым заделом по технологичности, надёжности и локальной ремонтпригодности. Использование бионических принципов в процессе проектирования и создания продуктов нового поколения является на сегодняшний день одним из ключевых трендов технологического развития, затрагивающим самые разные отрасли высокотехнологичной промышленности (авиастроение, автомобилестроение, машиностроение), медицину, архитектуру, промышленный дизайн и другие области. На данный момент можно выделить два основных подхода к применению бионических принципов – традиционный и современный. И если первый предполагает заимствование принципов организации, свойств, функций, структур и материалов из живой природы с целью улучшения существующих и создания новых, не менее совершенных технических систем, то второй неразрывно связан с развитием передовых производственных технологий, и в его основе лежат технологии компьютерной оптимизации (Computer-Aided Optimization, CAO) – многопараметрической, топологической, многокритериальной, мультидисциплинарной

и др. – то есть математический подход, основанный на описании пространственной (3D) задачи оптимизации с помощью уравнений в частных производных. Сегодня технологии компьютерной оптимизации и компьютерного моделирования тесно вплетены в процесс проектирования конструкций, более того, они стали основой, а затем и драйвером проектирования в промышленности, выражением чего служит парадигма Simulation & Optimization Driven Design.

Суть этой концепции заключается в том, что проектирование изделия осуществляется на базе первичных инженерных расчётов, что существенно облегчает дальнейшую работу – получаемый в результате дизайн близок к оптимальному и может служить отправной точкой для более эффективного использования методов математического программирования. Такой подход значительно сокращает сроки разработки продукта и существенно удешевляет этот процесс, позволяя при этом повысить технико-эксплуатационные характеристики изделия.

Конвергенция и синергия технологий компьютерного проектирования и моделирования, включая технологии оптимизации (то есть концепции Simulation & Optimization Driven Design) и аддитивные технологии дают возможность говорить о принципиально новом подходе к проектированию и созданию best-in-class оптимизированных конструкций – бионическом дизайне (Simulation & Optimization Driven Bionic Design), который не только не исключает технологии оптимизации, но способствует их развитию и совершенствованию.

Понятие бионического дизайна можно разделить на три составляющих:

- собственно бионический дизайн как результат работы дизайнера;
- конструкция как результат топологической оптимизации, в результате которой форма оптимизируется в зависимости от напряжений внутри детали;
- конструкция с матричной и решетчатой структурой.

В первом случае вообще не предусматривается оптимизация, во втором используются разработанные стандартные методы оптимизации, которые и в будущем будут востребованы, в третьем требуется развитие новых методов, которые появятся в ближайшем будущем.

Первый и второй типы дизайна вряд ли повлекут за собой изменения в технологии, поскольку современные станки с ЧПУ решают практически все проблемы, а вот третий вариант, скорее всего, потребует перехода к аддитивным технологиям.

В ближайшем будущем изделий, оптимизированных в формате бионического дизайна, будет становиться все больше. Однако говорить о массовом переходе деталей на изменённую геометрию явно

несвоевременно, поскольку в большинстве случаев изготовление таких изделий возможно только вкупе со сменой способа производства.

Оптимизация геометрии – не единственный способ повышения эксплуатационных характеристик, опыт говорит о том, что простая замена материала может дать очень интересные результаты. Поэтому обычно необходим комплексный подход к оптимизации.

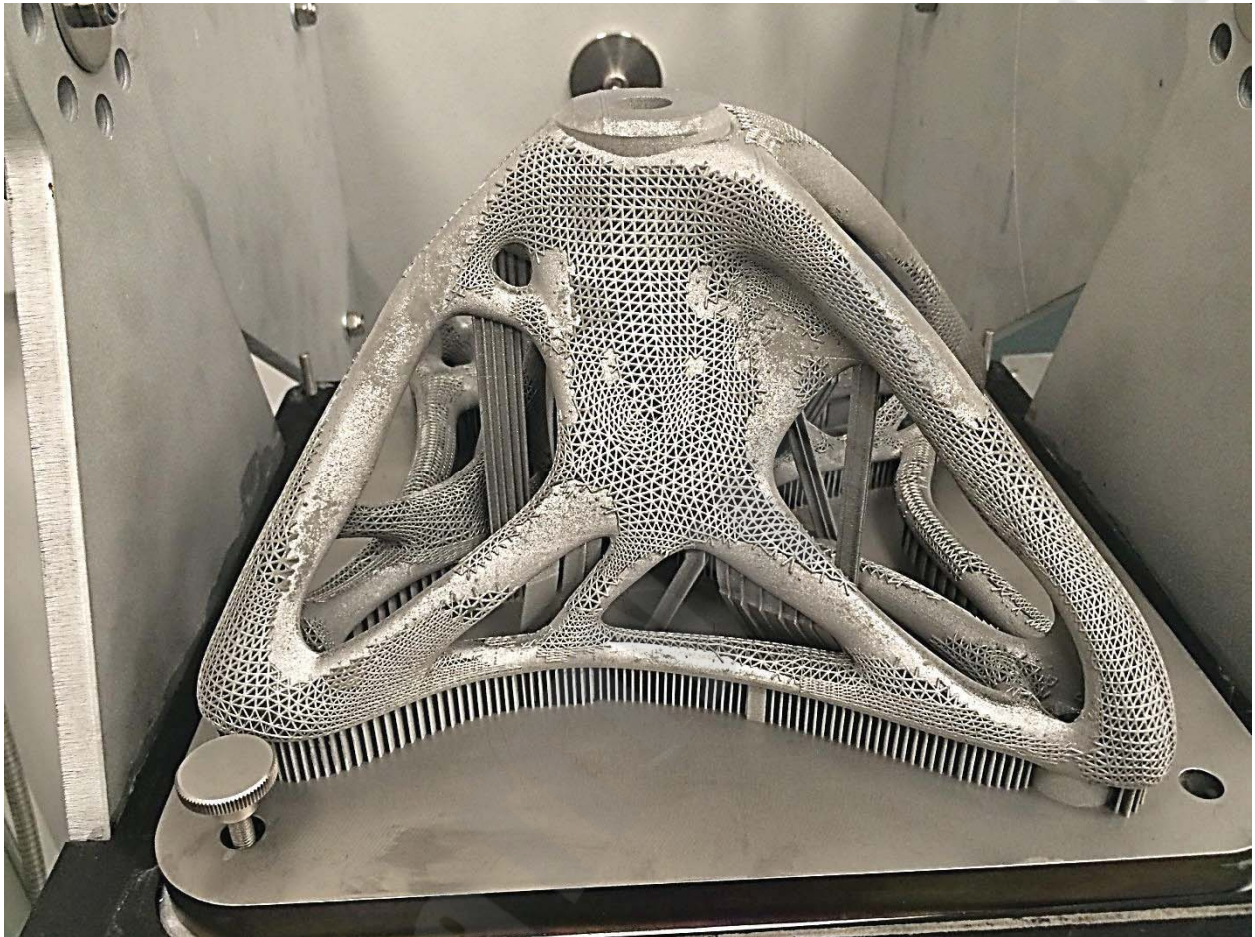


Рисунок 188 – Пример печать металлического изделия, конструкция которого создана с применением комплекса технологий бионического дизайна и топологической оптимизации

Бионические модели создаются с использованием технологий топологической оптимизации. Топологическая и параметрическая оптимизация являются принципиально разными подходами к созданию конструкций.

Параметрическая оптимизация является универсальным подходом к решению задач минимизации массы, повышения жёсткости, улучшения других эксплуатационных характеристик. При этом одной из основных проблем является создание корректной параметрической модели конструкции, позволяющей эффективно решить задачу оптимизации при минимальном количестве параметров, так как увеличение их числа приводит к лавинообразному росту времени решения задачи (эффект "проклятия размерности"). Для эффективного

использования технологий оптимизации проектировщик должен обладать замкнутой расчётной цепочкой программных CAD/CAE-комплексов и непосредственно самим оптимизационным кодом.

Топологическая оптимизация служит для определения принципиальной силовой схемы (концепции) конструкции и даёт ответ на вопрос, как расположить силовые элементы в конструкции и связать их между собой для обеспечения минимальной массы в сочетании с максимальной жёсткостью. При этом для воплощения данной концепции в серийном производстве необходимо проведение последующей конструкторской и технологической проработки детали, что является трудоёмким процессом, требует итерационного подхода и замкнутой расчётной цепочки (рис. 198). Следует отметить, что применение аддитивных технологий нивелирует данные проблемы лишь частично.



Рисунок 198 – Зависимость эффекта использования деталей – продуктов аддитивного производства от стоимости их изготовления

Таким образом, несмотря на принципиальную разницу в подходах, два данных направления совершенствования конструкций имеют схожие CAD/CAE – требования для своего применения. При этом топологическая оптимизация позволяет найти концептуальную форму, а параметрическая оптимизация – осуществить поиск оптимального сочетания параметров бионической конструкции и доводку прочностных характеристик с учётом технологии изготовления. Именно сочетание двух данных подходов имеет максимальный потенциал. На сегодняшний день уже существуют примеры успешного применения подобного подхода в отечественных и зарубежных компаниях в разных

отраслях промышленности. Ведущие разработчики коммерческого программного обеспечения интегрируют технологии как параметрической, так и топологической оптимизации в свои расчётные цепочки.

Выбор подхода зависит от цели и критериев оптимизации. Существующие технологии оптимизации на данном этапе используются ограниченно, в том числе и для стандартных деталей. У бионического дизайна есть как преимущества, так и недостатки.

Основными преимуществами являются:

- возможность существенно снизить массу, удалить «неработающий» материал, сделав деталь равнопрочной и более равномерно нагруженной;
- возможность заменить одной деталью сборочный узел и таким образом снизить массу (в том числе за счёт удаления из конструкции крепёжных элементов и фланцев) и упростить сборку (рис. 199);
- расширение функциональности детали, то есть добавление новых функций либо усовершенствование уже существующих.

Необходимо иметь в виду, что изготовление оптимизированной детали только с использованием аддитивных технологий может вызвать определённые сложности (например, связанные с последующим ремонтом данной детали или прочие, ещё не изученные). Поэтому целесообразность применения аддитивных технологий в таких случаях остаётся под вопросом.

Освоение технологий оптимизации и аддитивного производства, на данный момент ещё не полностью раскрывших весь свой потенциал, является отправной точкой для перехода к бионическому дизайну и ускорению развития этого направления.

На рынке присутствуют как специализированные проблемно-ориентированные решения для топологической оптимизации, так и программные комплексы, в которых имеется модуль для топологической оптимизации конструкций. Специализированные решения, как правило, обладают более широкими возможностями для проектирования бионических конструкций – большей номенклатурой настроек модели, граничных условий, доступных видов нагрузок или возможностями учёта технологических ограничений. Однако такое программное обеспечение может иметь недостатки, связанные с трудностями интеграции в общую CAD/CAE/CAM/PLM-концепцию предприятия, которая, как правило, строится на мультидисциплинарных программных платформах от ведущих мировых или отечественных производителей. Также сегодня мы видим очень много примеров, когда появившееся специализированное решение впоследствии входит в

состав одной из CAD/CAE / CAM – платформ и становится одним из её модулей.

Существующие системы проектирования легко решают вопросы дизайна любой сложности, включая и бионические формы. Для оптимизационного дизайна есть пакеты топологической оптимизации практически от всех ведущих игроков – Siemens PLM Software, Dassault Systemes, ANSYS, MSC Software и др. (рис. 200). Сложнее обстоит дело с матричными структурами, пока их на рынке не так много.

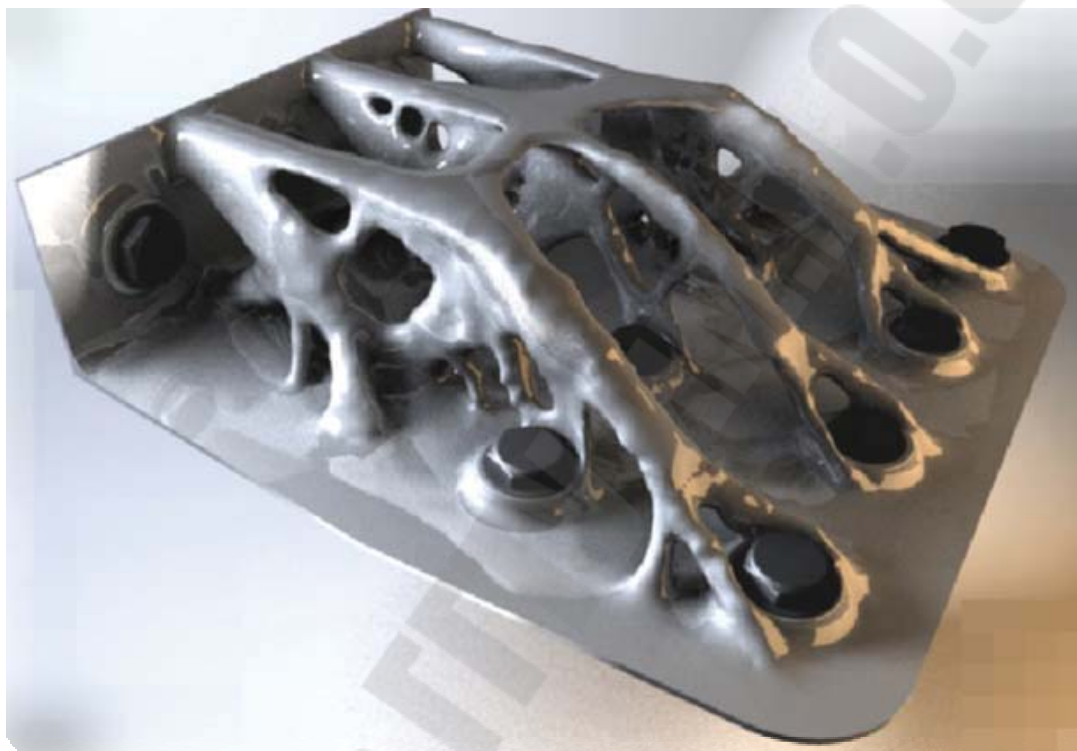


Рисунок 199 – Пример применения бионического дизайна в промышленности

Для создания концептуальной модели изделия, без отображения его внутренней структуры, с целью оценки его дизайна и формы возможно использование стандартных пакетов. Если говорить о разработке объектов с оптимизированным для облегчения веса дизайном или о создании решетчатых структур, расчёте их прочности, то для таких целей необходимо использовать специализированное ПО, например Autodesk Netfabb. Стандартные пакеты с такой задачей могут не справиться в связи с большой нагрузкой на программную и аппаратную часть.

Специальные пакеты или программное обеспечение, которое заточено под расчёты геометрии с бионическим дизайном, способны дать существенный выигрыш в качестве и скорости построения оптимизированных деталей, но в принципе построение таких изделий

доступно всем, кто работает в CAD – программах. Что касается анализа и моделирования напряжения, то тут совершенно нет разницы, как выглядит исследуемая деталь, ПО будет одинаковым.

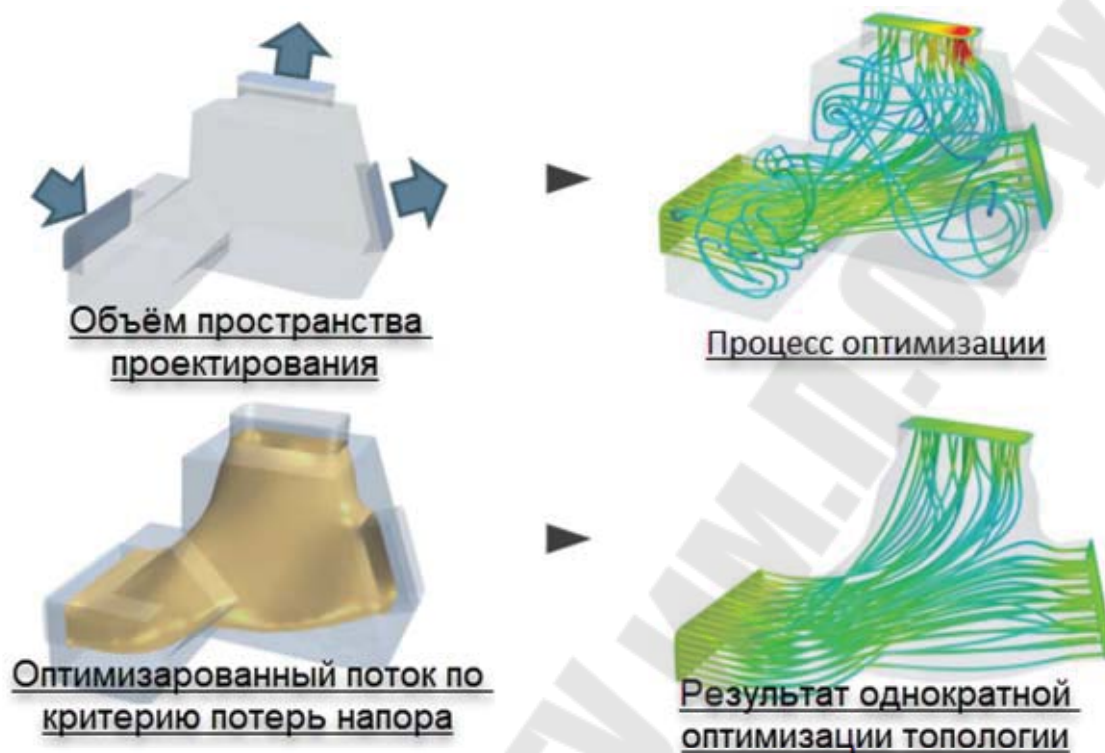


Рисунок 200 – Пример оптимизации топологии канала воздуховода

Для получения полного цикла – от моделирования до подготовки изделия к изготовлению аддитивными методами – можно использовать ПО Materialise. Для создания изделий в соответствии с принципами бионического проектирования необходимо высокотехнологичное инженерное программное обеспечение. В первую очередь это программные системы, позволяющие использовать топологическую оптимизацию. Признанным лидером на рынке таких систем является программная система OptiStruct, разработанная компанией Altair (США). К данному классу ПО относятся также модуль для расчёта механической прочности моделей solidThinking Inspire, тоже разработанный компанией Altair, решения для структурной оптимизации и оптимизации потоков Tosca Structure и Tosca Fluid компании Dassault Systemes (Франция), система для оптимизационных расчётов Optimus компании Noesis Solutions (Бельгия), программная среда оптимизации конструкций modeFrontier компании ESTECO (Италия) и др. Если речь идёт о создании высокотехнологичных инженерных систем, вопросом ключевой важности является уровень подготовленности и компетенций специалистов, которые не может

заменить даже самое высокотехнологичное программное обеспечение. Подготовка таких специалистов – «инженерного спецназа» – то есть тех, кто работает на передовой линии перспективных производственных технологий и новых способов организации производства, – процесс долгий и крайне трудоёмкий, именно поэтому их доля составляет всего 5–10 % от общего числа инженеров. На данный момент наблюдается тенденция к сведению всех этапов разработки и производства в единую цифровую среду. Подобный подход позволяет обеспечить сквозной контроль над всем процессом создания изделия, над качеством и процедурами – от разработки до проверки результатов расчётов с дальнейшим переходом к подтверждению выполнения всех требований к детали и к процессу её производства. Тем не менее, использование широко распространённых программных пакетов позволяет обеспечить определённую гибкость, учитывая накопленный технологический опыт предприятий (в том числе в области цифровых технологий) по работе с деталями со специфическими особенностями.

Бионический дизайн – это не просто копирование встречающихся в природе решений, скорее, под этим термином подразумевается многокритериальная оптимизация, когда, например, необходимо создать лёгкую, экономически обоснованную конструкцию, удовлетворяющую заданным критериям по прочности, размерам и динамическим характеристикам. Подобная оптимизация подразумевает использование сложного математического аппарата.

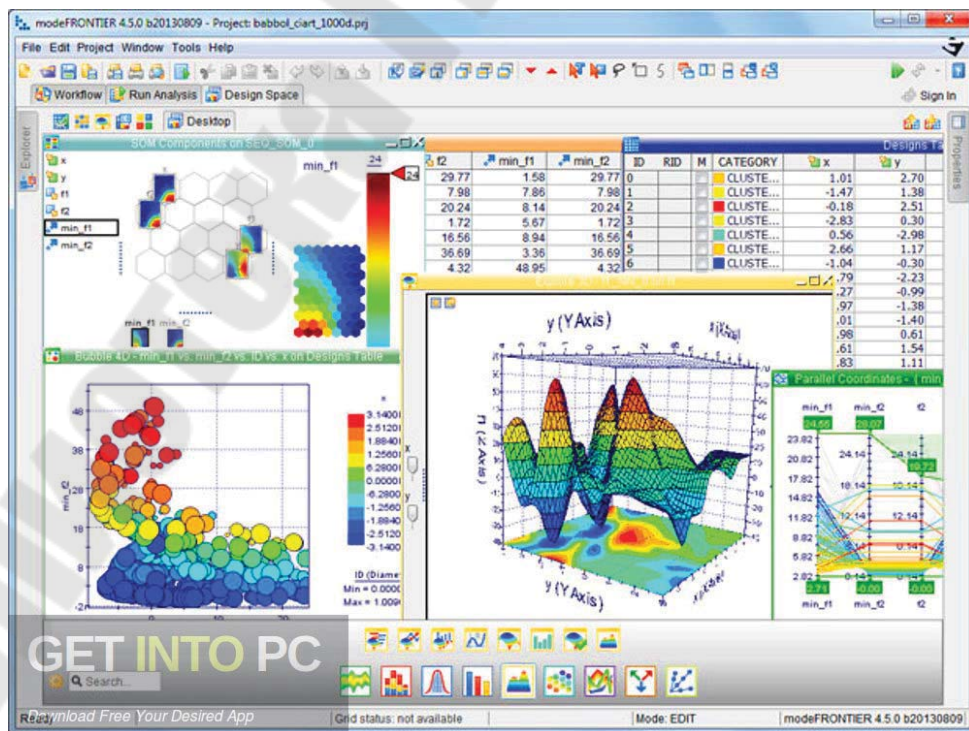


Рисунок 189 – Визуализация работы программы оптимизации

Разумеется, для этих целей удобнее использовать специально разработанный для топологической оптимизации инструмент. В данный момент выбор программ очень широк – от достаточно простых, с интуитивным интерфейсом и относительно небольшим функционалом, до сложных программных пакетов, способных работать с нелинейными системами. Разработчики программного обеспечения предоставляют возможность подобрать оптимизационный модуль под используемый на предприятии решатель, ориентируясь на проверенные алгоритмы расчёта. Для технического воплощения бионической модели, очевидно, необходимо обеспечить сложную настройку инженерного процесса под данный проект и его встраивание в технологическую цепочку. Насколько в этой связи рентабельно внедрять принципы бионического дизайна в существующее производство? Является ли более эффективным путём создание с нуля нового производства? Или тот или иной способ реализации бионического проекта зависит от целевой задачи – оптимизировать типовые элементы и конструкции либо же организовать производство нового изделия со сложной и нестандартной структурой? Здесь всё зависит от конкретных задач. Если говорить о встраивании в заводские процессы небольшого производственного и программного комплекса, то это возможно. Однако, как правило, внедрять принципы бионического дизайна в существующее производство экономически невыгодно из-за технологических ограничений разрабатываемой продукции.



Рисунок 202 – Распечатанная деталь из металла в разрезе

Рентабельность внедрения зависит от проекта, продукта и функциональной критичности деталей, которые необходимо изготовить. Преимущества этого подхода наиболее очевидны при его использовании для целей быстрого прототипирования на стадии эскизного проекта. Одновременное исследование множества решений (не одного-двух) позволит существенно снизить риски при разработке продукта. Всё это обеспечивает ощутимый выигрыш во времени, а следовательно, и в стоимости разработки. Такое внедрение будет выгодно в случае производства небольших стандартизированных деталей после изучения параметров повторяемости изготовления (отклонения значений различных параметров). Однако в случае производства массивных критичных деталей, требующих прохождения сертификации, необходимо предварительно пройти новые этапы утверждения и, возможно, определить новые критерии.

Кроме того, появляются новые перспективы производства продуктов, которые при использовании традиционных технологий невозможно было себе представить, или они были слишком дороги. Новые формы и структуры могут быть созданы с применением таких материалов, как композиты или наноматериалы. И напротив, дорогостоящие композитные детали могут быть заменены металлическими структурами, лёгкими и хорошо изученными (рис. 203). Исследование характеристик материалов после этапа эксплуатации изделия также способствует его оптимизации.

У бионического дизайна имеется значительный недостаток – конструкция, спроектированная в инженерной системе CAD, после топологической оптимизации теряет всю параметризацию, что представляет собой определённую проблему. Именно поэтому объектами оптимизации являются в основном разные кронштейны, а не базовые несущие элементы. Возможно, чтобы преодолеть эти недостатки, топологическая оптимизация будет в будущем встроена в CAD-системы.

Большинство производителей идёт от малых целей к более сложным и, мне кажется, это правильно. Сначала исследуются небольшие детали, изготовленные малыми партиями, оценивается эффект от внедрения таких изделий, прикидывается стоимость изменения больших деталей и далее задачи усложняются. Кто-то ограничивается заказом небольших партий, а кто-то покупает соответствующее оборудование через 2–3 месяца. Здесь необходим поэтапный подход. Следует начинать с оптимизации простых деталей и автоматизации более простых процессов, которые затем будут использоваться для работы с более сложными деталями и сборочными узлами. Следующим этапом будет интегрирование методов

оптимизации, при которых концепция нового продукта будет разрабатываться исходя из требуемых функций. Заключительным этапом будет квалификация и сертификация каждой фазы разработки и каждого элемента производства (металлические порошки, лазеры и так далее).



Рисунок 190 – Распечатанная «в металле» деталь после механической обработки рабочих поверхностей

Проектирование изделий с применением принципов бионического дизайна требует компетенций высокого уровня и соответствующего набора высокотехнологичных инструментов (в том числе программного обеспечения и суперкомпьютеров). Более того, полностью использовать потенциал технологий оптимизации позволяют только аддитивные технологии, так как в силу сложной геометрии изготовление конструкций, полученных в результате оптимизации, посредством традиционной механообработки даже на современных многофункциональных станках с ЧПУ является либо невозможным, либо крайне затратным. Однако важно понимать, что, применяя бионический подход, мы не ставим себе целью удешевление конечного продукта. Сочетание технологий топологической оптимизации с аддитивными технологиями даёт возможность получить продукт с принципиально новым дизайном – «за гранью интуиции главного конструктора», что в свою очередь позволяет снизить эксплуатационные издержки за счёт снижения массы изделия и повышения его технико-эксплуатационных

характеристик. Также стоит отметить, что внедрение отдельных технологий при старых производственных мощностях и традиционном подходе к производству зачастую удорожает конечную продукцию.

Долгосрочной перспективе для обеспечения глобальной конкурентоспособности производимой продукции необходим повсеместный переход на новый технологический уклад. Но перевооружение производства – это весьма длительный, постепенный и ресурсоёмкий процесс. Для этого во всем мире создаются программы по технологическому развитию, призванные способствовать повышению конкурентоспособности производств и конечной продукции в отдельной стране или регионе. Такие программы уже запущены в США, ЕС, Китае.

Очевидно, что изготавливать изделия с особо сложным бионическим дизайном можно только с помощью аддитивных технологий ввиду того, что традиционные технологии производства накладывают достаточно жёсткие ограничения на конструкцию изделия.

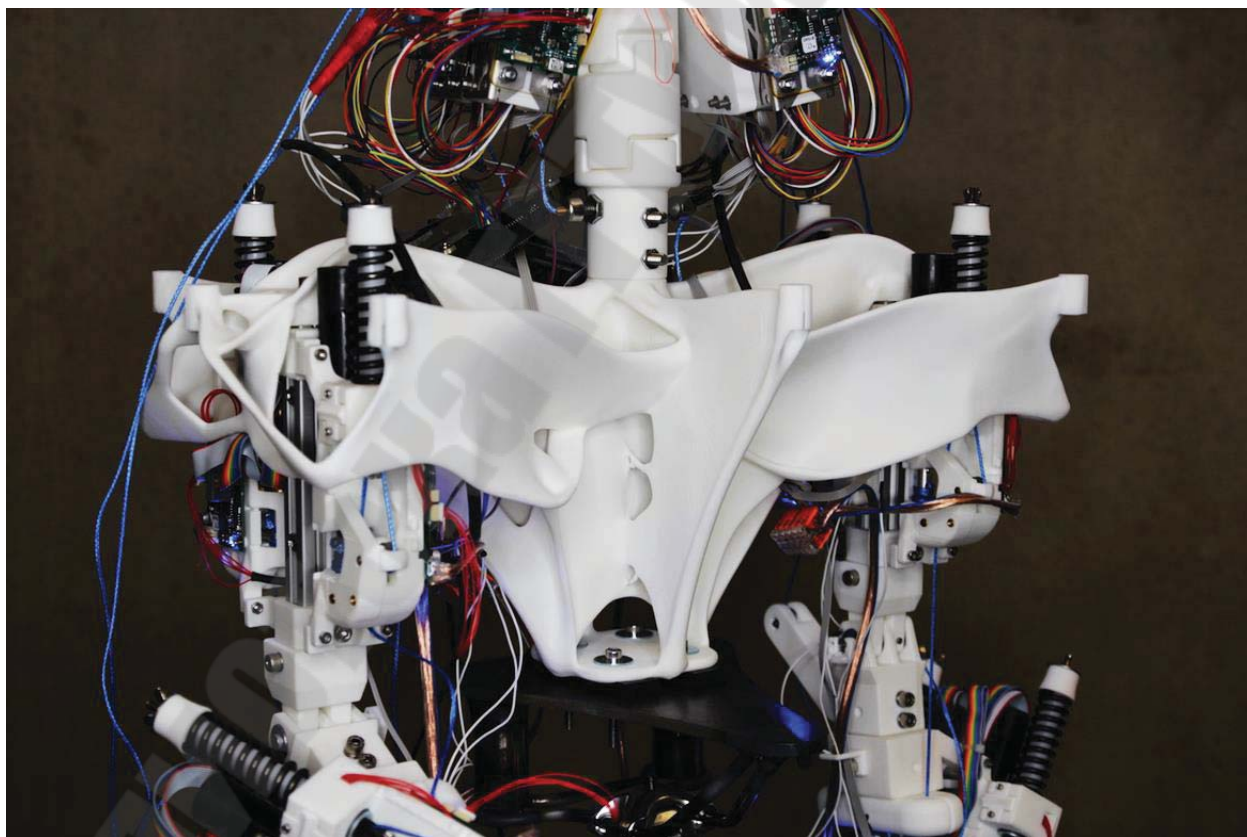


Рисунок 204 – Продукт генеративного дизайна в готовом изделии

Где пролегает та грань, которая разделяет возможность реализации бионического проекта посредством традиционных производственных процессов либо только методами АМ? Вообще,

какими технологиями и оборудованием должна обладать компания-производитель, чтобы работать с бионическими моделями? Практически все аддитивные технологии имеют весьма существенный недостаток – низкая производительность, которая свойственна процессу послойного синтеза, причём, чем более высокая точность требуется, тем менее производительным является процесс. В настоящий момент эти технологии наиболее эффективны в единичном и опытном производстве изделий аэрокосмической индустрии и в некоторых специфичных отраслях, при производстве, например, лопаток турбин, в медицине и проч. Если мы говорим об изготовлении металлических деталей, то во многих случаях 5-осевой станок с ЧПУ сделает бионическую деталь быстрее и с более высоким качеством. Что касается производства пластмассовых изделий, выжигаемых моделей, литьевых форм и стержней, то здесь аддитивные технологии, несомненно, весьма перспективны и уже активно занимают свои ниши.

Эта грань достаточно трудно определяется. При выборе способа производства необходимо искать баланс между экономической целесообразностью и технологической возможностью. Но в данном вопросе кроется и ответ на него. На практике некоторые изделия просто невозможно получить иначе как с помощью аддитивных технологий либо это является очень затратным мероприятием, например, когда необходимо изготовить деталь внутри детали или сложные сетчатые конструкции. Специфику технологий и оборудования диктуют используемые материалы, требуемые характеристики, количество а также способы производства изделия.

Грань устанавливают возможности традиционных методов изготовления и соображения целесообразности. На самом деле, изготовить некоторые изделия с бионическим дизайном можно и традиционным литьём по выжигаемым моделям, но сама модель все равно будет сделана аддитивным методом. Что касается работы с бионическими моделями, то выбор способа изготовления также зависит и от потребностей компании. Самый простой инструмент работы – Интернет. С его помощью любая компания может заказать изготовление своей детали хоть из пластика, хоть из металла. Если же речь идёт о самостоятельном изготовлении, то тут нет однозначного ответа, какой выбор будет наиболее правильным. Это зависит от того, какие задачи ставит перед собой компания, так как именно эти задачи определяют целесообразность применения тех или иных технологий или оборудования. Безусловно, аддитивные технологии позволяют максимально полно реализовать потенциал бионического дизайна и технологий топологической оптимизации конструкций. Однако помимо целей достижения минимальной массы и максимальной жёсткости

необходимо учитывать технологический и экономический аспекты.

В процессе создания бионических конструкций выполняется конструкторская и технологическая проработка детали. На данном этапе и принимается решение о выборе технологии изготовления и способов адаптации формы и конструкции детали под данную технологию. Такая адаптация и проработка требуются как при использовании традиционных технологий, так и при изготовлении методами АМ (с целью обеспечения прочностных характеристик и минимизации поддерживающих структур). Ключевым фактором в данном случае является себестоимость изготовления деталей, а также объёмы производства. АМ в первую очередь эффективно для изготовления деталей сложной формы при небольшом объёме производства и сжатых сроках поставки.

На основе одной и той же бионической концепции можно выполнить конструкторскую и технологическую проработку изделия с помощью разных технологий и изготовить полученную деталь как традиционными методами (например, электроэрозией), так и при помощи АМ. Таким образом, грань между применением АМ и традиционными технологиями производства при реализации моделей с бионическим дизайном достаточно тонка и зависит от особенностей каждого конкретного проекта. Часто эффективным решением является некоторое упрощение и утяжеление конструкции при условии существенного выигрыша в её себестоимости. Условия конструирования постоянно меняются. Появляющиеся технологии позволяют отбросить некоторые ограничения и в то же время создают новые. Помимо новых возможностей производства конструкторы должны учитывать техническую спецификацию продуктов, принимать во внимание аспекты эксплуатационной технологичности и ремонтпригодности, собираемости, также как и обычные ограничения, связанные со статической и динамической прочностью, аэродинамикой, термикой, живучестью, должны осуществлять анализ видов и последствий потенциальных отказов и т. п. Зачастую эти ограничения должны быть полностью пересмотрены с учётом новых технологий производства. Также необходимо отслеживать, не проявляются ли под действием различных ситуаций, возникающих на протяжении жизненного цикла продукта, какие-либо новые явления, вызванные новыми параметрами, связанными с использованием нового способа производства или нового материала.

Аддитивные технологии в полной мере предоставляют возможность реализовать преимущества, которые несёт в себе топологическая оптимизация. Однако во многих случаях возможно применение и традиционных производственных технологий, например литья (как в

случае с опорой РКП) или ЧПУ-обработки.

Но используя ЧПУ-обработку, следует помнить, что её применение снижает стоимость изделия, при этом одновременно снижаются и технические характеристики изделия, в то время как его эксплуатация удорожается.

Благодаря применению бионического подхода, включающего компьютерный инжиниринг, топологическую оптимизацию и аддитивные технологии, массу детали удалось снизить в 4,39 раза по сравнению с оригинальным изделием на основе традиционных для отрасли решений (с 1,046 до 0,238 кг). Далее, для одной из геометрий кронштейна в рамках проекта была выполнена адаптация под субтрактивное производство – обработку на станке с ЧПУ. Проигрыш в массе детали, изготовленной с помощью традиционной механообработки, по сравнению с произведённой аддитивным методом, составил около 30 %. С другой стороны, выигрыш по сравнению с оригинальным изделием оказался существенным – масса детали была снижена в 3,35 раза.

Что касается инструментов, необходимых для применения принципов бионического дизайна, то если речь идёт о стадии проектирования, – это по крайней мере базовый набор высокотехнологичного инженерного ПО, в первую очередь технологий компьютерной оптимизации, так как эти технологии являются основой бионического дизайна.

Наибольшую выгоду от применения принципов бионического дизайна можно извлечь в таких высокотехнологичных отраслях, как автомобилестроение, авиастроение, ракетостроение, где крайне важно обеспечить минимальный вес изделия при сохранении (или повышении) всех его технико-эксплуатационных параметров. На сегодняшний день уже есть примеры изготовления изделий подобного рода – заделы в этой области уже имеют GE, Lockheed Martin и другие мировые лидеры высокотехнологичных отраслей промышленности.

В силу относительной новизны и в то же время востребованности технологии проблема сертификации бионических изделий, равно как и изделий, изготовленных при помощи 3D-печати, действительно стоит достаточно остро, на данный момент ею занимаются многие мировые лидеры в различных отраслях, такие как Airbus, GE, Boeing.

Смысл цифровой сертификации, заключается в проведении тысяч виртуальных испытаний как отдельных компонентов, так и всей системы в целом, что даёт возможность радикально снизить количество натуральных испытаний.

Сегодня бионическое моделирование – это пока ещё, скорее, тенденция или модное направление в конструировании. Очевидными

преимуществами оптимизированных конструкций являются уменьшение веса и экономия материала, что определяет, соответственно, и области применения, учитывая ограничения со стороны технологии.

Если говорить о преимуществах изделий, выполненных в бионическом стиле, в денежном выражении, то самой «выгодной» является сфера дизайна эксклюзивных вещей, так как здесь может быть самая большая добавочная стоимость и нет никакой сертификации. Если же говорить о более практических применениях, то, конечно, на первом месте космическая и авиационная отрасли, где достигается самый большой выигрыш за счёт уменьшения массы изделия, каковые цели и преследуют технологии оптимизации и другие новые технологии производства.

Сегодня на некоторых предприятиях большая номенклатура деталей традиционной конструкции изготавливается методами АМ с целью сокращения сроков производства. Для авиационной техники это в основном неотчетливые детали (кронштейны, элементы механизации, детали, которые не входят в силовую схему двигателя и не несут значительных нагрузок). Одно из преимуществ, которое предоставляет бионический дизайн, – это снижение себестоимости производства за счёт оптимизации конструкции детали под технологический процесс при сохранении её эксплуатационных характеристик. Например, с помощью топологической оптимизации можно добиться снижения количества металлопорошковой композиции, необходимой для изготовления детали. Другим актуальным направлением топологической оптимизации является создание концепции массивных конструкций на ранней стадии проектирования. При наличии такой концепции конструктору понадобится меньше времени на доводку узла. Технологии изготовления при этом используются традиционные.

Процесс сертификации в авиационной отрасли является очень длительным и трудоёмким. Однако произведённая один раз сертификация новых технологий производства и методов оптимизации в будущем обеспечит индустриальный успех. Основное преимущество применения таких изделий очевидно – это снижение веса готовых продуктов и как следствие – экономия топлива. Например, компания Airbus использовала ПО Autodesk для создания сверхлёгкой перегородки в своих самолётах. Получившаяся конструкция на 45 % легче, чем традиционная перегородка. Это в свою очередь позволило снизить вес самолёта и сократить объём выбросов CO₂ в атмосферу. Также перспективным направлением является медицина. Проблема с сертификацией таких изделий безусловно существует, и она очевидна,

однако переход к использованию бионических изделий в конструировании, на мой взгляд, только вопрос времени.

В сфере производства применение бионических, принципов ограничивается пока достаточно прозаическими задачами — оптимизацией уже существующих деталей и элементов конструкций с целью сделать их более лёгкими, прочными и экономичными. Соответственно, наибольшее практическое значение на сегодняшний день бионическое моделирование имеет для таких отраслей, как авиакосмическая, автомобильная, а также двигателестроение, то есть там, где облегчение деталей с сохранением или увеличением прочности имеет большое значение. Отдельным развивающимся направлением, востребованным в рамках небольших объёмов производства, является изготовление в связке с аддитивными технологиями «бионически» спроектированных деталей сложной геометрии, которые невозможно получить иным способом. Тем не менее, использование бионических принципов для проектирования и создания продукции нового поколения является набирающим силу технологическим трендом, постепенно проникающим в самые разные, в том числе высокотехнологичные, отрасли промышленности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В пособии приведены основные сведения о современных технологиях в области аддитивного производства, которые с полным правом можно отнести к инновационным и которые в полной мере соответствуют задачам создания инновационной экономики.

В приложении к области литейного производства аддитивные технологии можно рассматривать и как вспомогательную отрасль и как одного из главных конкурентов за рынок деталей из металла.

Хорошее владение базовыми знаниями и навыками в области методов и технологий трёхмерного прототипирования даёт возможность инженерам совершенствовать существующие процессы и технологии.

Несомненно, что быстрое прототипирование – это основа для формирования новой промышленности в XXI веке. Именно в этой сфере, с активным применением компьютерных технологий инженерии, закладываются условия для создания прорывных направлений производства будущего.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агеев О.А., Беляев А.Е., Болтовец Н.С. и др. Карбид кремния: технология, свойства, применение. – Харьков: ИСМА, 2010.

2. Баничук, Н.В. Введение в оптимизацию конструкций / Н.В. Баничук – М.: Наука, 1986. – 303 с.

3. Бахвалов, Н.С. Численные методы / Н.С. Бахвалов, Н.П. Жидков, Г.М. Кобельков. – М.: Наука, 1987. – 600 с.

4. Бионический дизайн и аддитивные технологии. Инженеры компаний Toyota и Materialise представили прототип бионического автомобильного кресла, напечатанного на 3D-принтере. 2. О работах сотрудников CompMechLab® в области бионического дизайна. – Электрон. дан. – Режим доступа: <http://fea.ru/news/6266>.

5. Боровков А.И., Марусева В.М., Рябов Ю.А., Щербина Л.А. Бионический дизайн / А.И. Боровков [и др.]. – СПб. : Изд-во Политехн. унта, 2015. – 92 с.

6. Боровков, А.И. Компьютерный инжиниринг [Текст]: учебное пособие – СПб.: Изд-во СПбПУ, 2012. – 93 с.

7. Валетов В.А. Аддитивные технологии (состояние и перспективы): учебное пособие. – СПб.: Университет ИТМО, 2015. – 63 с.

8. Васильев, Ф.П. Численные методы решения экстремальных задач: Учеб. пособие для вузов. / Ф.П. Васильев -2-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, 1988. – 552 с.

9. Волосова М.А., Окунькова А.А. Пути оптимизации процесса селективного лазерного плавления при помощи выбора стратегии обработки лазерным лучом // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Т. 14. – №4(2). – С. 587-591.

10. Гаршин А.П., Гропянов В.М., Зайцев Г.П., Семенов С.С. Керамика для машиностроения. – М.: ООО «Научтехлитиздат», 2003. – 384 с.

11. Гибсон Я., Розен Д., Стакер Б. Технологии аддитивного производства. Трехмерная печать, быстрое прототипирование и прямое циф-

ровое производство / Пер. с англ. под ред И.В. Шишковского. – М.: Техносфера, 2016. – С. 656.

12. Голод В.М., Денисов В.А., Теория, компьютерный анализ и технология стального литья. – СПб.: ИПЦ СПбГУТД, 2007. – 610 с.

13. Довбыш В. М., Забеднов П. В., Зленко М. А. «Аддитивные технологии и изделия из металла», ФГУП «НАМИ». – Электрон. дан. – Режим доступа: http://www.nami.ru/upload/AT_metall.pdf.

14. Дульнев Г.Н., Заричняк Ю.П., Теплопроводность смесей и композиционных материалов. – Л.: Энергия, 1974. – 264 с.

15. Захаров, М.Г. Моделирование и оптимизация динамических систем: учеб. пособие/ М.Г. Захаров [и др.]; под общ. ред. В.А. Полянского. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – 202 с.

16. Зленко М., Попович А.А., Мутылина И.Н. Аддитивные технологии в машиностроении. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – 222 с.

17. Зорин С. Технологии быстрого прототипирования. – Электрон. дан. – Режим доступа: http://www.vzrt.ru/rp_tec.php, 2006.

18. Комаров, В.А. Проектирование силовых аддитивных конструкций: теоретические основы / В.А. Комаров // Онтология проектирования. – 2017. – Т. 7, № 2(24). – С. 191–206.

19. Контроль качества аддитивного производства в реальном времени с системой QMmeltpool 3D. Лихтенфельс, 2 июля 2015 г. – Электрон. дан. – Режим доступа: <http://3dtoday.ru/blogs/digispace/quality-control-of-additive-manufacturing-in-real-time-with-the-system/>.

20. Курц У., Фишер Д. Фундаментальные основы затвердевания. – М.-Ижевск: Институт Компьютерных исследований. – 2013. – 300 с.

21. Марченко, П.А. Топологическая оптимизация модели кронштейна под установку звёздного датчика/ П.А. Марченко, А.Д. Новокшенов // XLIV Неделя науки СПбПУ: материалы научного форума с международным участием. Институт прикладной математики и механики – СПб.: Изд-во Поли – техн. ун-та, 2015. – Часть V. – С. 97–100.

22. Моделирование методом послойного наплавления (FDM) 3D Today – Электрон. дан. – Режим доступа: http://3dtoday.ru/wiki/FDM_print.

23. Назаров А.С. Фотограмметрия. – Мн.: ТетраСистемс. 2006. – 368 с.

24. Новости аддитивных технологий. Дочерняя компания Airbus – APWorks представила электромотоцикл с бионической рамой, «напечатанной» на 3D-принтере. – Электрон. дан. – Режим доступа: <http://fea.ru/news/6412>.

25. Новости компьютерного инжиниринга. Бионический дизайн. Компьютерная технология топологической оптимизации Altair® OptiStruct® революционно изменяет процесс разработки ячеистых/решетчатых структур для аддитивного производства (3D печати). – Электрон. дан. – Режим доступа: <http://fea.ru/news/6156>.

26. Новости компьютерного инжиниринга. Лучшие компьютерные технологии топологической оптимизации и промышленного дизайна - solidThinking Inspire и Evolve - в России! Американская фирма-разработчик SOLIDTHINKING, Inc. и CompMechLab" заключили договор о сотрудничестве. – Электрон. дан. – Режим доступа: <http://fea.ru/news/6026>.

27. Павлов В.А., Воронцов-Вельяминов П.Н. Зависимость температуры плавления от размеров нанокристаллов на примере простого вещества // Ультрадисперсные порошки, наноструктуры, материалы: получение, свойства, применение. V Ставеровские чтения: Тр. научн.-техн. конф. – Красноярск, 2009. – С. 16-17.

28. Первозванский, А.А. Курс теории автоматического управления. Учебное пособие/ А.А. Первозванский – СПб.: Лань, 2010 – 624 с.

29. Публичный аналитический доклад по направлению «Новые производственные технологии» // Сколковский институт науки и технологий, 2015.

30. Рейтман, М.И. Методы оптимального проектирования деформируемых тел (постановки и способы решения задач оптимизации параметров элементов конструкций) / М.И. Рейтман, Г.С. Шапиро. М.: Наука, 1976. 258 с.

31. Руководство для учащихся по изучению программного обеспечения SolidWorks [Текст]: Dassault Systemes SolidWorks Corporation, 2010

32. Смольников, Б.А. Механика в истории науки и общества /Борис Смольников – НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика». 2014–608 с.

33. Таова Т.М. и др. Температура плавления малоразмерных металлических частиц // Фазовые переходы, упорядоченные состояния и новые материалы. – 2009. – С. 1-7.

34. Шваб, К. Четвёртая промышленная революция./ К. Шваб, Эксмо, 2016, 475 с.

35. Шишковский И.В. Лазерный синтез функциональных мезоструктур и объемных изделий. – М.: Физматлит, 2009. – 424 с.

36. Additive Manufacturing at Ceralink. – Электрон. дан. – Режим доступа: <http://www.ceralink.com/AMproducts>.

37. Additive Manufacturing Study Shows Cuts in Material Consumption and Reduced CO2 Emissions // Powder Metall Rev. – Электрон. дан. – 2013. – Режим доступа: <http://www.ipmd.net/articles/002490.html>.

38. Altair HyperWorks Documentaion, version 13.0[Текст]: Altair Engineering, Inc., 2014

39. Amato K.N. et al. Microstructures and mechanical behavior of Inconel 718 fabricated by selective laser melting // Acta Mater. Inc. – 2012. – V. 60/ – № 5. – P. 2229-2239.

40. ANSYS Documentation Release 15.0 [Текст]: SAS IP, Inc

41. Barnatt Ch. 3D printing: The next industrial revolution. Nottingham, CreateSpace Independent Publishing Platform, 2013. – 276 p.

42. Beam Machines – laser metallic deposition – Электрон. дан. – Режим доступа: <http://www.beam-machines.fr/uk/en/>.

43. Bendsoe, M. P Generating Optimal Topologies in Struct Design Using a Homogenization Method/M.P. Bendsoe and N. Kikuchi // Computer Methods in Applied chanics and Engineering, Vol. 71, pp. 197–224, 1988.

44. Bendsoe, M.P. Topology Optimization. Theory, Methods and Applications / M.P. Bendsoe, O. Sigmund – Springer, 2003

45. Casati R., Vedani M. Metal Matrix Composites Reinforced by Nanoparticles // A Review. Metals. – 2014. – 4. – P. 65-83.

46. Chu T.M.G., Orton D.G., Hollister S.J., Feinberg S.E., Halloran J.W. Mechanical and in vivo performance of hydroxyapatite implants with controlled architectures. Biomaterials. – 2002. – 23(5). – P. 1283-1293.

47. Clijsters S. et al. In situ quality control of the selective laser melting process using a high-speed, real-time melt pool monitoring system // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2014. – V. 75. – №. 5-8. – P. 1089-1101.

48. Collins S. Laser and Electron Beam Powder Bed Fusion, in Measurement Science Roadmap for Metal-Based Additive Manufacturing. – Электрон. дан. – 2013. – Режим доступа: http://www.nist.gov/el/isd/upload/NISTAdd_Mfg_Report_FINAL-2.pdf.

49. Direct Metal Printers. – Электрон. дан. – Режим доступа: http://www.3dsystems.com/sites/www.3dsystems.com/files/dmp_specsheet_0216_usen_web_0.pdf.

50. EDAG Light Cocoon: The ultimate in lightweight construction. – Электрон. дан. – Режим доступа: <http://www.edag.de/en/edag/news-detail/getarticle/News/detail/edag-light-cocoon-the-ultimate-in-lightweight-construction.html>.

51. Evolutionary Light Structure Engineering. – Электрон. дан. – Режим доступа: http://elise.de/documents/ELiSE_Brochure_web_EN.pdf.

52. Heynick M., Stotz L. 3D CAD, CAM and rapid prototyping. – Электрон. дан. – Режим доступа: <http://enac-oc.epfl.ch>.

53. Mühler T., Gomes C., Ascheri M. E., Nicolaidis D., Heinrich J.G., Günster J. Slurry-based powder beds for the selective laser sintering of silicate ceramics // Journal of ceramic science and technology. – 2015. – 6(2). – P. 113-117.

54. MX3D Bridge – Электрон. дан. – Режим доступа: <http://mx3d.com/projects/bridge/>.

55. NASA – Электрон. дан. – Режим доступа: http://www.nasa.gov/exploration/systems/sls/selective_melting.html.

56. New «WaterBone» lightweight vehicle design could increase EV battery range. – Электрон. дан. – Режим доступа: <http://cleantechnica.com/2015/04/27/new-waterbone-lightweight-vehicle-design-increase-ev-battery-range>.

57. Otoinşa Teknolojileri – Электрон. дан. – Режим доступа: <http://www.turkcadcam.net/rapor/otoinsa/tek-harc-yigma-puskurterek.html>.

58. Pelovitz J. Modeling for industrial design. – Электрон. дан. – Режим доступа: <http://jordanpelovitz.com/?p=775>.

59. Phenix PX – Электрон. дан. – Режим доступа: <http://www.3dsystems.com/files/phenix-metal-3d-printers-usen.pdf>.

60. ProMaker V600 – Электрон. дан. – Режим доступа: <http://www.prodways.com/en/printer/promaker-v6000/>.

61. PSeven Core 6.11 User Manual [Электронный ресурс]: Режим доступа: <https://www.datadvance.net/product/pseven-core/manual/6.11/index.html>, свободный

62. PTC Help Center: Creo. [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://support.ptc.com/apps/help_center/brand=Creo, свободный

63. Spheroidization Equipment - Tekna Plasma Systems – Электрон. дан. – Режим доступа: <http://tekna.com/equipment/products/plasma-equipment/spheroidization-equipment/>.

64. Spierings A.B., Herres N., Levy G. Influence of the particle size distribution on surface quality and mechanical properties in AM steel parts // Rapid Prototyping Journal. – 2011. – Т. 17. – №. 3. – P. 195-202.

65. The world leading knowledge source for product weight reduction. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://altairenlighten.com/>, свободный

66. Toyota Technological Institute [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.toyota-ti.ac.jp>, свободный

67. Use of solidThinking InspireÒ revolutionizes the additive manufacturing design process for the world's first 3D printed bike frame. - URL: http://www.altair.com/newsdetail.aspx?news_id=10983&news_country=en-US.

68. Voxeljet – Электрон. дан. – Режим доступа: <http://www.voxeljet.de/en/systems/>.

69. Voxeljet 3D printers: Fast, precise and economical. – Электрон. дан. – Режим доступа: <http://www.voxeljet.de/en/systems>.

ГЛОССАРИЙ

Термин	Определение
Additive fabrication (AF)	стандартизированное обобщающее англоязычное название аддитивных технологий; аддитивные технологии.
Additive manufacturing (AM)	то же, что и Additive fabrication (AF).
Additive processes	аддитивный процесс.
Additive systems	машины и оборудование, обеспечивающие аддитивный процесс изготовления изделия.
AMF - Additive Manufacturing File	формат компьютерных данных, альтернативный формату Stl., применяемому с 1987 г. в качестве базового для передачи данных компьютерной 3D-модели в аддитивную машину для построения физической модели. AMF базируется на языке XML (Extensible Markup Language – расширяемый язык разметки) и поддерживает размерности, цвета, текстуры, триангуляцию, сетчатые структуры, которые Stl-формат не поддерживает; более компактный, чем Stl-файл.
Bed Deposition	один из основных видов аддитивных технологий; предполагает предварительное формирование слоя построения в виде равномерно распределенного по всей поверхности рабочей платформы сыпучего или жидкого строительного материала, а затем селективное отверждение фрагментов сформированного слоя в соответствии с текущим сечением CAD-модели, например, путем спекания, сплавления, склеивания или полимеризации частиц модельного материала.
Binder jetting	стандартизированное название одного из аддитивных процессов, согласно которому построение изделия ведется посредством связующего состава, селективно связывающего частицы сыпучего модельного материала.
CAD\CAM\CAE	- сочетание, подразумевающее использование всего комплекса цифровых технологий: CAD – проектирование (Computer-Aided Design), CAM - материализация на технологическом оборудовании посредством числового программного управления (Computer-Aided Manufacturing), CAE – расчет и анализ посредством специализированного программного обеспечения (Computer-Aided Engineering).
CIM-технологии - Ceramic Injection Molding	Разновидность PIM-технологий, одно из направлений порошковых технологий; предполагает последовательное выполнение следующих операций: смешение керамического порошка со связующим-пластификатором (обычно полимером), формование (обычно в машине типа термопласт-автомата), получение таким образом «грин-модели» с последующим удалением связующего и спеканием в специальных печах.
Direct Deposition	«непосредственное нанесение материала», один из основных видов аддитивных технологий; предполагает подачу строительного материала (в виде прутка, пасты, вдуваемого порошка) непосредственно в то место, где в данный момент времени происходит процесс послойного синтеза.
Directed energy deposition	стандартизированное название одного из аддитивных процессов, согласно которому строительный материал и энергия для его сплавления подводятся одновременно в место построения изделия.

EIGA-технология - Electrode induction guide inert gas atomi- zation	разновидность технологии газовой атомизации для получения порошков реактивных и жаропрочных сплавом посредством индукционной плавки и распылением инертным газом.
EBM – Electron Beam Melting	аббревиатура название аддитивного процесса, в котором сплавление модельного материала производят посредством электронного луча (компания Arcam, Sciaky).
FDM - Fused Deposi- tion Modeling	название AM-технологии компании Stratasys; относится к категории Material extrusion.
HIP - Hot Isostatic Pressure	горячее изостатическое прессования; технология, применяемая для пост-обработки синтезированных изделий, в частности, из алюминия и титановых сплавов с целью устранения внутренней микропористости.
Material extrusion	стандартизованное название одного из аддитивных процессов, согласно которому построение изделия ведется посредством экструзии пластифицированного тем или иным способом строительного материала.
MJS - Multiphase Jet Solidification	название одной из AM-технологий, в соответствии с которой модельный материал в виде пластифицированного с помощью полимерной пасты металлического порошка подают через экструдер в зону построения.
MIM-технология – Metal Injection Mold- ing	разновидность PIM-технологий, одно из направлений порошковых технологий;; предполагает последовательное выполнение следующих операций: смешение металлопорошковой композиции со связующим-пластификатором (обычно полимером), формование (обычно в машине типа термопласт-автомата), получение таким образом «грин-модели» с последующим удалением связующего и спеканием в специальных печах.
MLS - Micro Laser Sintering	общее название технологий лазерного синтеза изделий с малыми размерами, обычно менее 5 мм.
NIST – National Insti- tute of Standards and Technology	Национальный институт стандартов и технологий, США.
PIM-технологии - Powder Injection Molding	общее название порошковых технологий, предполагающих получение изделий из порошковых материалов методами, похожими на литье пластмасс в термопласт-автоматах. Подразделяются на CIM-технологии (Ceramic Injection Molding) и MIM-технологии (Metal Injection Molding).
PolyJet	название AM-технологии, в соответствии с которой жидкий модельный материал, как правило, фотополимер, подают в зону построения с помощью многоструйной головки.
Powder bed fusion	стандартизованное название аддитивной технологии, согласно которой в процессе построения на рабочей платформе предварительно формируют слой строительного материала и затем часть материала в соответствии с данными текущего сечения CAD-модели связывают (сплавляют, склеивают) тем или иным способом.
Rapid Prototyping, RP-технологии	устаревшее, но еще употребляющееся название аддитивных технологий.
Sheet lamination	название одного из видов AM-технологий; предполагает построение изделия из листовых модельных материалов.

SHS -Selective Heat Sintering	название аддитивной технологии, разработанной компанией Blueprinter (Дания).
SIS - Selective Inhibition Sintering	технология, в соответствии с которой на неотверждаемую в АМ-процессе часть материала наносят ингибитор – раствор соли металла.
SLA – от Stereolithography Apparatus	общее название технологии и машин, работающих по технологии лазерного послойного отверждения фотополимерных смол.
SLM – Selective Laser Melting	селективное лазерное сплавление, название АМ-процесса; SLM Solutions – компания-разработчик SLM-технологии и производитель АМ-машин (Германия).
SLS - Selective Laser Sintering	селективное лазерное спекание, обобщенное название одного из видов АМ-технологий.
SMS - Selective Mask Sintering	название АМ-процесса, в котором спекание сыпучего модельного материала производят за счет теплового воздействия специальными нагревательными приборами, формирующими «маску» (образ, контур) сечения строящегося изделия.
Spray forming	прогрессивная технология в металлургии, позволяющая получать «выращенные» болванки (заготовки для последующих переделов) путем газовой атомизации расплава и осаждения распыливаемого металла на подложку.
Stereolithography	стереолитография (лазерная), название процесса, в соответствии с которым модельный материал в виде жидкого фотополимера отверждают послойно посредством лазерного луча.
Stl-(формат)	сокращение от Stereolithography, формат файлов, применяемый с 1987 г. в качестве базового для передачи данных компьютерной 3D-модели в аддитивную машину для построения физической модели.
Vat photopolymerization	один из основных АМ-процессов, предполагающий полимеризацию жидкого фотополимера, находящегося в открытой ванне в рабочей камере АМ-машины, посредством светового воздействия, например, лазером.
VIGA –Vacuum Induction Melt Inert Gas Atomization	технологический процесс и установки для получения порошков металлов методом газовой атомизации; компания ALD (Германия).
VIM – Vacuum Induction Melting	вакуумная индукционная плавка, процесс, используемый для вакуумного литья жаропрочных и реактивных металлов, а также для получения металлопорошковых композиций путем газовой атомизации.

МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ 3D ПРОТОТИПИРОВАНИЯ

**Пособие
по одноименной дисциплине
для студентов специальности
1-36 02 01 «Машины и технология литейного
производства»
дневной формы обучения**

Составитель **Жаранов** Виталий Александрович

Подписано к размещению в электронную библиотеку
ГГТУ им. П. О. Сухого в качестве электронного
учебно-методического документа 28.01.21.

Рег. № 90Е.

<http://www.gstu.by>