

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Ульяновский государственный университет»
Факультет математики и информационных технологий
Кафедра математического моделирования технических систем**

Пикалов А.А.

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ
ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

**«Технологии изготовления деталей и конструкций из
композиционных материалов»**

для студентов по направлениям 27.04.03 Системный анализ и управление,
24.03.04 Авиационное строительство»
15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств

Составитель:

старший преподаватель кафедры «Математическое
моделирование технических систем»

Пикалов Антон Александрович

Методические указания для самостоятельной работы разработано для студентов направлений 27.04.03 Системный анализ и управление, 24.03.04 Авиастроение, 15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств факультета математики и информационных технологий Ульяновского государственного университета с целью получения теоретической базы, а так же, реализации профессиональных компетенций, связанных с дисциплиной «Технологии изготовления деталей и конструкций из композиционных материалов».

Рекомендовано к использованию Ученым советом факультета математики и информационных технологий УлГУ (протокол 2/19 от 19 марта 2019 г.).

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 ВИДЫ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИХ КОМПОНЕНТЫ.....	5
1.1 ВВЕДЕНИЕ. ПРЕДМЕТ И ОБЪЕКТЫ ИЗУЧЕНИЯ. ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ.....	5
1.2 КЛАССИФИКАЦИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПО ВИДУ МАТРИЦЫ И НАПОЛНИТЕЛЯ. ВИДЫ ПКМ. КЛАССИФИКАЦИЯ ПКМ.....	6
1.3 ВОЛОКНИСТЫЕ НАПОЛНИТЕЛИ. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ.....	10
ВОЛОКНИСТЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ	10
1.4 ПОЛИМЕРНЫЕ СВЯЗУЮЩИЕ.....	15
ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКИ.....	15
2 ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ И ОБОРУДОВАНИЕ ...	17
2.1 СОВМЕЩЕНИЕ СВЯЗУЮЩЕГО С ВОЛОКНИСТЫМ НАПОЛНИТЕЛЕМ	17
2.2 СПОСОБЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПАКЕТА ЗАГОТОВКИ	20
СБОРКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПАКЕТА	20
2.3 МЕТОДЫ ФОРМОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ.....	23
2.4 МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДЕТАЛЕЙ ИЗ ПКМ.....	28
НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ	28
3 ТЕХНОЛОГИЯ ВЫПОЛНЕНИЯ СОЕДИНЕНИЙ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	38
3.1 ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРИМЕНЯЕМЫХ В САМОЛЁТСТРОЕНИИ СОЕДИНЕНИЙ	38
3.2 КЛАССИФИКАЦИЯ СОЕДИНЕНИЙ В САМОЛЁТСТРОЕНИИ ПО КОНСТРУКТИВНО- ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРИЗНАКАМ.....	38
3.3 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАКЛЁПЧОГО СОЕДИНЕНИЯ. СПОСОБЫ ОБРАЗОВАНИЯ И ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЙ ПОД БОЛТЫ И ЗАКЛЁПКИ	39
4 ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ.....	43
4.1 АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ И КЛЮЧЕВЫЕ ПОНЯТИЯ	43
4.2 КЛАССИФИКАЦИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПО МЕТОДУ ФОРМИРОВАНИЯ ГЕОМЕТРИИ	43
4.3 КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ. ХАРАКТЕРНЫЕ ЧЕРТЫ.....	44
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	52

ВВЕДЕНИЕ

Данные методические указания для самостоятельной работы разработано для студентов направлений 27.04.03 Системный анализ и управление, 24.03.04 Авиастроение, 15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств Основные задачи изучения дисциплины:

Основные задачи изучения дисциплины:

- 1) Ознакомление с основными сведениями о процессах получения композиционных материалов различной природы (сырьё, технология изготовления);
- 2) Изучение основных методов механической обработки деталей и конструкций из композиционных материалов, в том числе смешанных пакетов (металл + композит);
- 3) Изучение основных методов разработки технологических процессов изготовления и сборки агрегатов ЛА из композиционных материалов;
- 4) Введение в направление «Аддитивные технологии».

1 ВИДЫ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИХ КОМПОНЕНТЫ

1.1 Введение. Предмет и объекты изучения. Общие понятия и определения.

Предмет и объекты изучения

Целью изучения дисциплины «Технологии изготовления деталей и конструкций из композиционных материалов» является получение теоретических знаний и практических умений и навыков в области разработки конструкций из композиционных материалов, применяемых для изготовления деталей и агрегатов летательных аппаратов (ЛА).

Общие понятия и определения

- **Композиционный материал (КМ)** – материал, состоящий из двух или более фаз, имеющих между собой границу раздела. В случае двух фаз одна фаза – непрерывная (матрица), вторая - дискретная (наполнитель).
- **Полимерный композиционный материал (ПКМ, пластик)** – композиционный материал, в котором в качестве непрерывной фазы (матрицы) выступает полимерный материал (связующее), прошедший полный процесс отверждения.
- **Матрица** – непрерывная составляющая композиционного материала, окружающая дисперсный или армирующий наполнитель. Матрица связывает отдельные элементы наполнителя в единый монолит.
- **Препрег** – ткани или ленты, пропитанные связующим или с нанесенным связующим (клеем).
- **Преформа** – предварительно выложенный и уплотнённый с помощью давления и повышенной температуры сухой армирующий наполнитель, принимающий форму будущего изделия. Давление для уплотнения может создаваться от усилия прикаточного ролика при автоматической выкладке или вакуума при ручной выкладке.
- **Связующий компонент (биндер)** – компонент, нанесённый на ленту в малом объёме, в основном служащий для скрепления армирующего наполнителя в преформе (заготовке изделия). Биндеры должны быть полностью совместимы со связующим и равномерно распределяться в пластике. Должен отсутствовать эффект вымывания, т. е. смещение биндера по направлению движения связующего в процессе пропитки преформы.

- **Реактопласты** – пластики на основе реактивных и термореактивных связующих. Реактивные связующие – это такие материалы, у которых при определённых условиях (без нагрева или с нагревом, с давлением) или при определённом составе (наличие отвердителя-катализатора) необратимо меняется структура в процессе химических превращений. Процесс превращения смолы в высокомолекулярный полимер называется отверждением.
- **Термопласты** – пластики на основе термопластичных связующих. Термопластичные материалы – это такие материалы, которые при нагревании размягчаются и при охлаждении затвердевают без проведения химических реакций, могут неоднократно при последующем нагревании менять форму.

1.2 Классификация композиционных материалов по виду матрицы и наполнителя. Виды ПКМ. Классификация ПКМ.

В зависимости от материала матрицы композиционные материалы можно разделить на два вида – металлические и не металлические (рисунок 1):



Рисунок 1 - Классификация КМ по виду матрицы

А по виду наполнителя все композиционные материалы можно классифицировать следующим образом (рисунок 2 и 3):



Рисунок 2 - Классификация КМ по виду наполнителя



a – с зернистым наполнителем

б – с дискретным волокнистым наполнителем

в – с непрерывным волокнистым наполнителем

Рисунок 3 – Структура наполнителя КМ

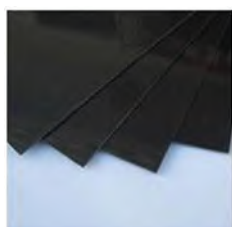
Классификация видов ПКМ

- по типу наполнителя:
 - Волокнистые
 - Чешуйчатые
 - Ленточные
 - Сферопласты
- по типу связующего:
 - Термопласты
 - Реактопласты

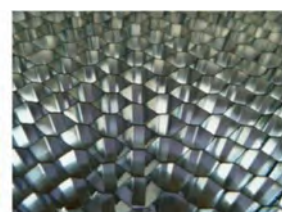
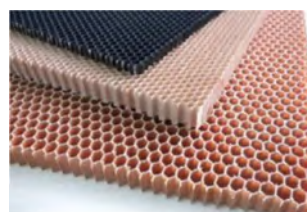
● **по названию волокнистого наполнителя:**

- Стеклопластики
 - Углепластики
 - Органопластики
 - Боропластики
 - Гибридные
- и другие.

● **по строению и наличию наполнителя (рисунок 4):**



а) Монолитные



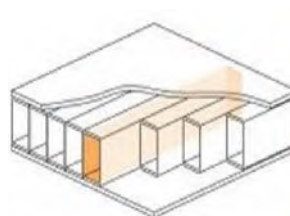
Бумажные и стеклотканные

Алюминиевые

б) Сотовые наполнители



в) Ячеистые



г) Трубочатые

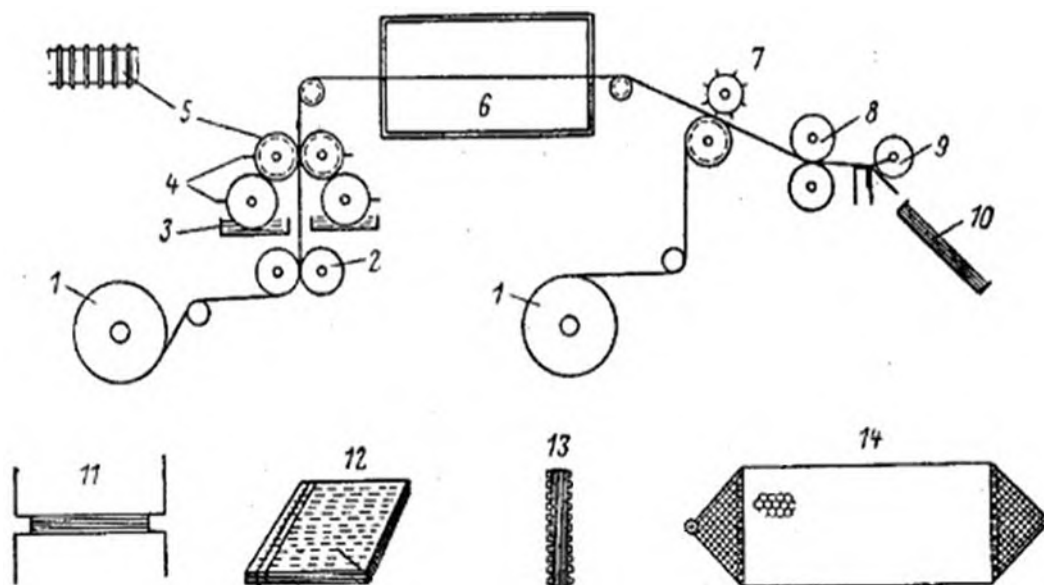


Образец наполнителя типа z-гофр из органопластика

д) Складчатые

Рисунок 4 – Классификация ПКМ по типу наполнителя

Схема изготовления сотового наполнителя



- 1 – катушка с фольгой (бумагой, стеклотканью)
- 2, 8 – направляющие ролики
- 3 – ванна с клеем
- 4 – отжимные валики для удаления избытка клея
- 5 – валики для нанесения клея
- 6 – сушильная камера
- 7 – перфоратор
- 9 – гильотинные ножницы
- 10 – ящик для нарезанных листов
- 11 – пресс для склеивания листов
- 12 – склеенные пакеты перед механической обработкой
- 13 – обработанные полосы с торцевыми накладками
- 14 – приспособление для растяжения клеевых полос

Рисунок 5 - Схема изготовления сотового наполнителя

Способ включает:

- нанесение в продольном направлении клеевых полос на полотно материала
- разрезку полотна материала на заготовки в направлении, перпендикулярном клеевым полосам
- сборку сотового пакета путем укладки заготовок со смещением каждой заготовки относительно другой на половину шага клеевых полос
- склеивание заготовок сотового пакета по заданному режиму

- получение сотового блока путем растяжения сотового пакета
- пропитку сотового блока полимерным связующим с последующим термоотверждением

1.3 Волокнистые наполнители. Технология изготовления волокнистых наполнителей

Виды волокнистых наполнителей (ткани, ленты, жгуты, вуали, маты)

- **Однонаправленные** - материалы, в которых волокна расположены в анизотропном направлении - параллельно друг другу (рисунок 6). Для скрепления волокон используют полиэфирную нить (в качестве утка) или вейл (тонкий нетканый материал), зафиксированный при помощи биндера (ленты, жгуты).



Рисунок 6 – Однонаправленные волокнистые наполнители

- **Нетканые** – материалы с хаотичным расположением волокон, например вуали, маты (рисунок 7).



Рисунок 7 – Нетканые волокнистые наполнители

- **Плетёные** - материалы, которые имеют основу и уток (ткани, ленты, оплётка для жгутов). Плетение может быть полотняное, сатиновое, атласное, дизайнерское и т. д. (рисунок 8).

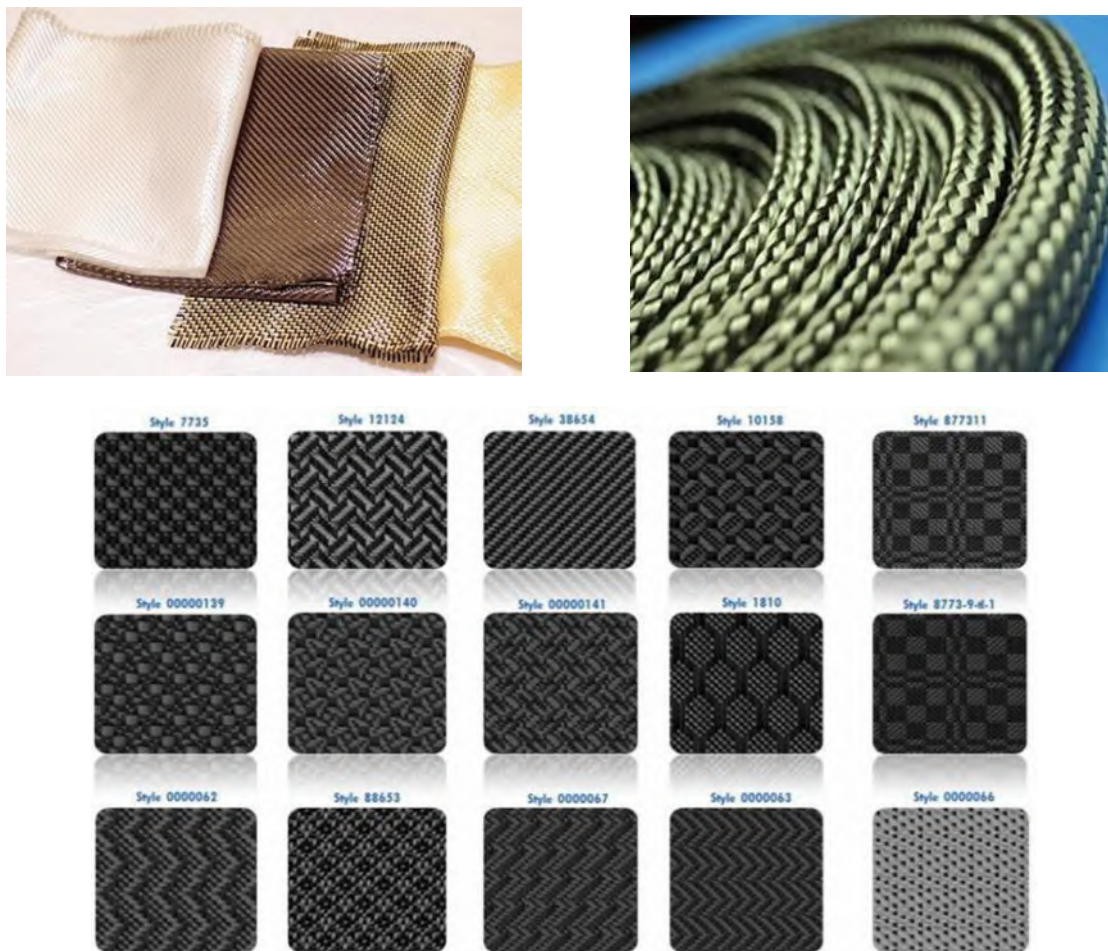


Рисунок 8 – Плетёные волокнистые наполнители

- **Мультиаксиальные** (рисунок 9 и 10) - производятся из двух и более слоев однонаправленных волокон (стеклянных, углеродных, арамидных), сшитых полиэфирной нитью (маты).

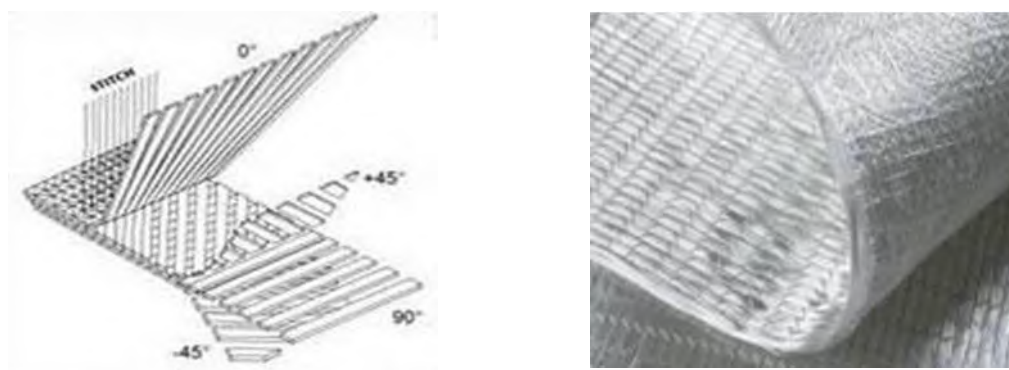


Рисунок 9 – Биаксиальная стеклоткань

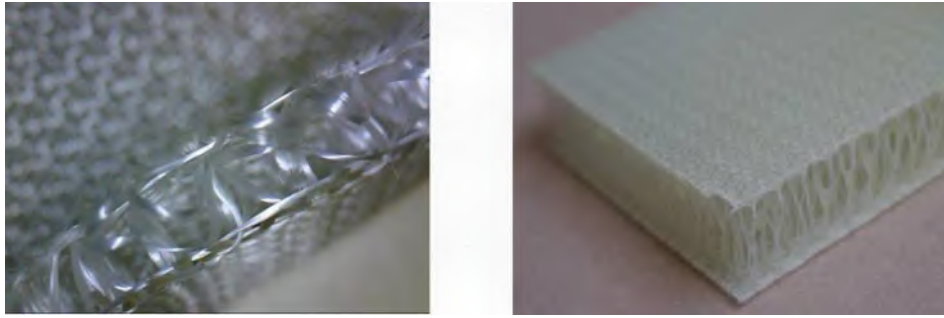


Рисунок 10 – Ткань трёхмерного плетения

Стеклённые волокна

Стекловолокна изготавливают из расплавленного стекла (из природного – базальта или синтетического). Стеклопластики обладают высокой механической прочностью, имеют низкую стоимость. Диэлектрик. *Недостаток* – большая плотность.

Способы производства:

- вытягивание из струек, вытекающих из отверстий фильеры
- дутьевой – вытягивание капелек стекла в волокна в струе газа, выходящего из сопла
- штабиковый – вытягивание нити из стеклянных стержней, конец которых размягчается пламенем горелки
- ротационный – вытягивание волокон с помощью центробежной силы из расплавленного стекла, находящегося во вращающемся открытом сосуде

Базальтовые волокна

Базальт - природное стекло, получалось там, где обычные минералы подвергались высоким температурам, особенно у вулканов. В России самые легко размягчающиеся базальты добываются на Камчатке. Температура их размягчения около 1200 °С.

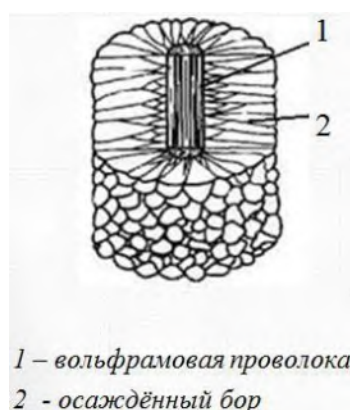
Преимущество – готовое сырьё (рисунок 11), устойчивое к кислотам и щелочам, высокий модуль упругости.



Рисунок 11 – Базальтовая ткань

Борные волокна

Волокно изготавливают насаждением бора на вольфрамовую нить диаметром 10 - 12 мкм при температуре от 1000 до 2000 °С. Получается очень толстое волокно диаметром 100 мкм, внешним видом похоже на початок кукурузы (рисунок 12), т. к. бор осаждается в виде капель. Эти волокна очень хорошо работают на сжатие. Часто используются для изготовления металлических композиционных материалов под названием борсик. *Недостатки* – очень высокая стоимость. Используются для производства космической техники.



Поверхность борного волокна

Рисунок 12 – Борное волокно

Арамидные волокна

Пластики на их основе называются органопластиками. Одним из основных показателей работоспособности органопластиков является ползучесть, и являются самыми легкими среди пластиков. Устойчивы к действию ударных и знакопеременных нагрузок.

Диэлектрики. Не горят, не плавятся – при высоких температурах медленно обугливаются. Недостатки – впитывают влагу из окружающей среды, высокая стоимость.

В США аналогом являются пара-арамиды под торговым названием Kevlar®. В СССР были разработаны волокна под названием СВМ (синтетические высокомодульные волокна), превосходящие *Кевлар* по ряду показателей. Ткань *Русар* используется в производстве индивидуальной защиты и признана специалистами одной из лучших в мире.

Три основных типа коммерческих арамидных волокон:

- *Пара-арамиды* (Kevlar®, Twaron®, СВМ и т. д.). Прочность волокон не уступает прочности стали, при этом в пять раз легче. Температура обугливания 425 °С. Используются при изготовлении органопластиков.

- *Мета-арамиды* (Nomex®, Teijinconex®, Арселон и т. д.)
Температура обугливания 400 °С. Используются для изготовления защитной одежды.
- *Сополимеры полиамида* (полиамид-имидные - Kermel®)
Обладают очень низкой теплопроводностью, выдерживают температуру до 1000 °С в течение нескольких секунд. Используются для изготовления защитной одежды от термических рисков, а также современных изоляционных материалов.

Углеродные волокна

Разделяются на:

- высокомодульные
- высокопрочные
- монокристаллические

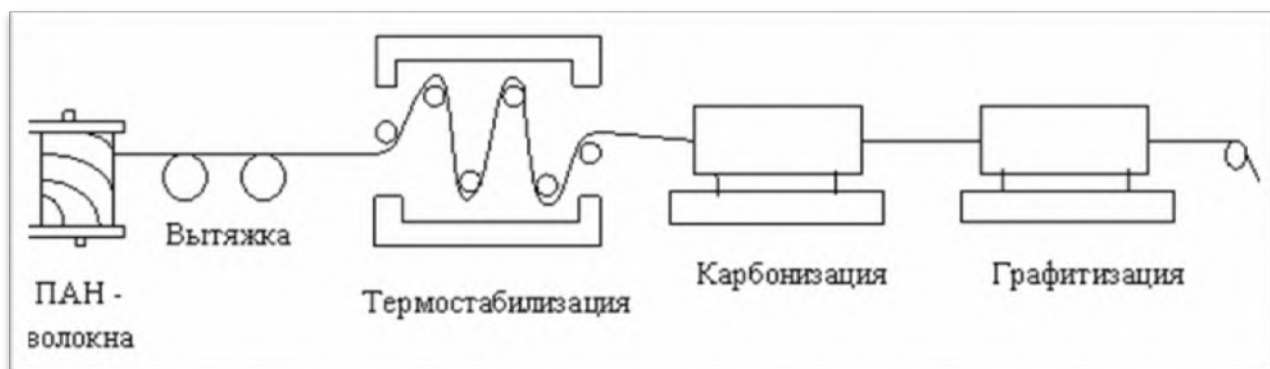
УВ обычно получают термической обработкой химических или природных органических волокон, при которой в материале волокна остаются главным образом атомы углерода.

Исходным материалом являются ПАН-волокна или волокна из нефтяных и каменно-угольных пеков. Температурная обработка состоит из нескольких этапов. Первый из них представляет собой окисление исходного волокна на воздухе при температуре 250 °С в течение 24 часов. После окисления следует стадия карбонизации - нагрева волокна в среде азота или аргона при температурах от 800 до 1500 °С. В результате карбонизации происходит образование графитоподобных структур. Процесс термической обработки заканчивается графитизацией при температуре 1600-3000 °С, которая также проходит в инертной среде. В результате графитизации количество углерода в волокне доводится до 99 % (рисунок 13).

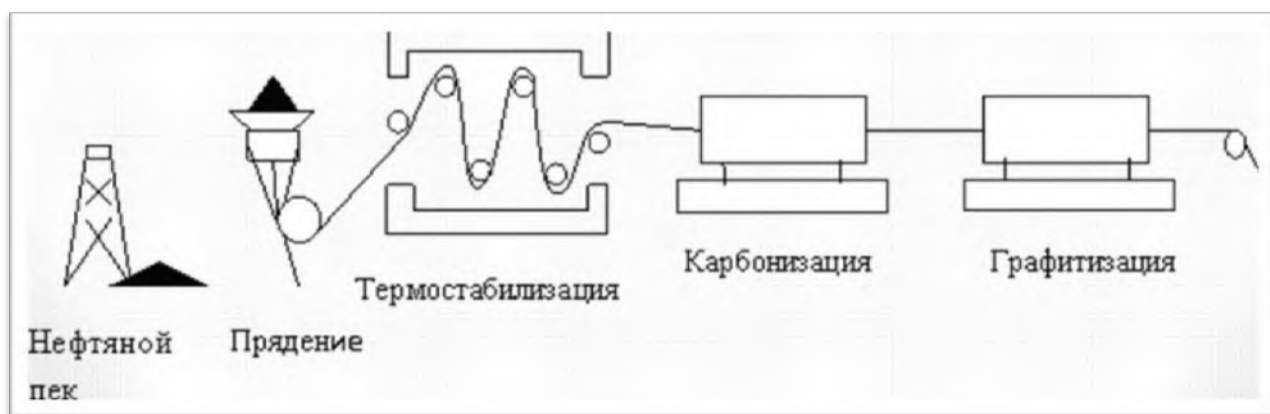
Углепластики имеют малую плотность, высокое статическое сопротивление усталости, жёсткость, сопротивляемость коррозии, износо- и абразивостойкость, теплостойкость, малый КТР и электрическую проводимость (полупроводники).

Свойства определяются степенью термообработки исходного материала и разнообразием дополнительной обработки углеродного волокна. Вследствие высокой хрупкости готовые УВ перерабатываются с большим трудом, поэтому текстильные материалы и изделия (ленты, шнуры,

трикотаж, ткани, нетканые материалы и др.) сначала изготавливают из исходных волокон или нитей, а затем подвергают термообработке.



а) Схема получения углеродного волокна из ПАН-волокон



б) Схема получения углеродного волокна из нефтяного пека

Рисунок 13 – Процесс получения углеродного волокна

1.4 Полимерные связующие. Основные сведения и характеристики

Реактопласты:

- Эпоксидные
- Фенолформальдегидные
- Полиимидные
- Полиэфирные
- Кремнийорганические
- Поликарбосилановые (керамообразующие)
- Комбинированные

Термопласты:

- Полиэфирэфиркетонные

Эпоксидная смола - олигомеры, содержащие эпоксидные группы и способные под действием отвердителей (полиаминов и др.) образовывать сшитые полимеры.

Наиболее распространённые эпоксидные смолы - продукты поликонденсации эпихлоргидрина с фенолами, чаще всего — с бисфенолом А. Впервые эпоксидная смола была получена в 1936 году.

Эпоксидные смолы - наиболее широко применяемые в авиационной технике, на их основе изготавливаются пропиточные связующие, клея, краски, лаки, заливочные компаунды, прессматериалы, пенопласты, полимербетоны.

Фенолформальдегидные смолы (фенолоформальдегидные) — синтетические смолы из группы фенолоальдегидных смол со свойствами реактопластов или терморектопластов.

Являются жидкими или твёрдыми олигомерными продуктами поликонденсации фенола с формальдегидом в щелочной или кислой среде, новолачные и резольные смолы (бакелиты, карболиты), что соответственно влияет на их свойства. Впервые была получена в 1907 году.

Фенолформальдегидные смолы используются в качестве пропиточных связующих, клеёв, пропиточных композиций для древесных материалов.

Фенолформальдегидные связующие имеют самое низкое тепло - и дымовыделение при горении, поэтому используются при изготовлении элементов интерьера самолётов.

Полиимидные смолы – на их основе изготавливают самое огнестойкое и нетоксичное связующее, поэтому используется в конструкциях трубопроводов системы кондиционирования воздуха и в конструкциях шумоглушения в корпусе мотогондолы, кожухах и экранах двигателя.

Недостаток – высокая температура переработки.

Кремнийорганические смолы – полимер разветвлённой и частично сшитой и циклической структуры, получают гидролизом смесей хлорсиланов.

Кремнийорганическое связующее - это гидрофобный, т. е. водоотталкивающий материал. Используется для изготовления конструкций подводных лодок. Имеет высокие диэлектрические свойства даже при 250 – 300 °С и используется при изготовлении радиотехнических пластиков.

Недостаток – очень высокий КТР, высокая температура переработки.

2 ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ И ОБОРУДОВАНИЕ

При производстве изделий из полимерных композиционных волокнистых материалов (ПКВМ) необходимо уделить особое внимание выбору технологии производства. От данного решения зависит не только экономическая составляющая, но и качество конечного изделия.

2.1 Совмещение связующего с волокнистым наполнителем

Основные методы совмещения связующего с волокнистым наполнителем:

- жидкофазный (растворный, расплавный или с использованием жидких олигомеров)
- твёрдофазный (порошковый, плёночный и волоконный)

Пропитка без давления (свободная)

- **Окунание** – происходит за счёт смачивания поверхности наполнителя, диффузии связующего в поры и дефекты поверхности наполнителя и его приповерхностного слоя и фильтрации в межволоконное пространство (рисунок 14).

- 1 – рулон наполнителя
2 – камера сушки наполнителя
3 – направляющие ролики
4 – пропиточная ванна
5 – отжимные ролики
6 – камера сушки препрега
7 – рулон готового препрега

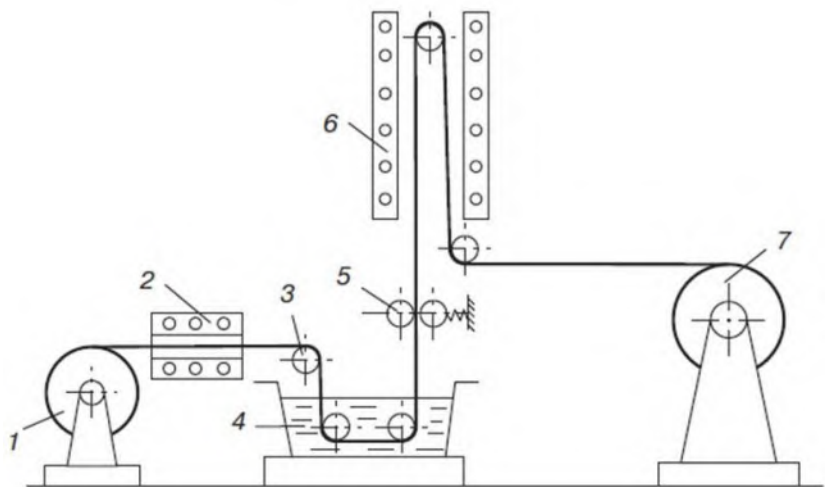


Рисунок 14 – Пропитка методом окунания

Содержание связующего регулируется скоростью движения материала, вязкостью связующего, зазором между отжимными роликами.

- **Контактная пропитка** – осуществляется под действием капиллярных сил и давления от натяжения наполнителя (рисунок 15), применяется при пропитке жёстких волокон (например, борных).

1 – наполнитель
2 – ролик
3 – связующее
4 – пропиточная ванна

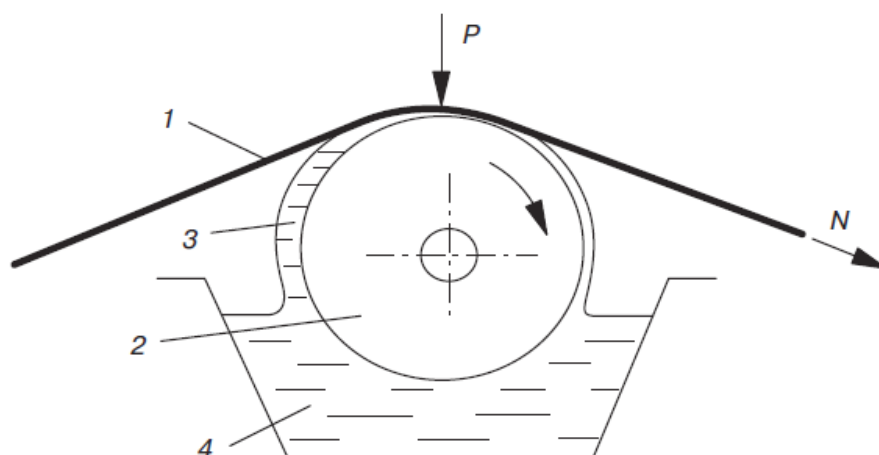
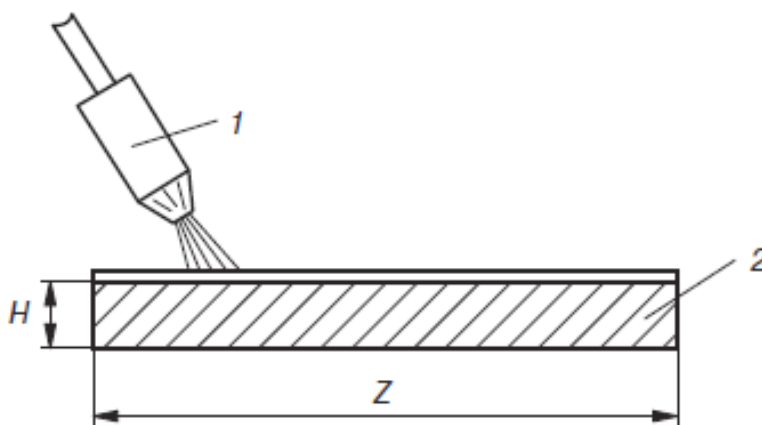


Рисунок 15 – Контактная пропитка

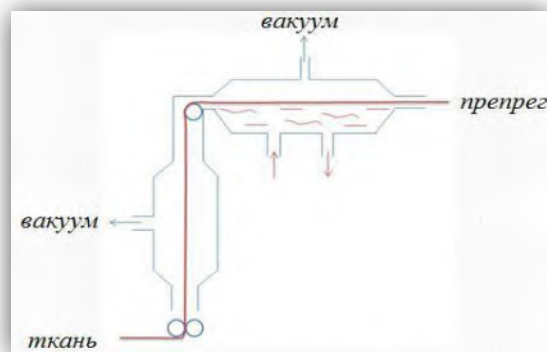
- **Напыление (полив, орошение)** – пропитка осуществляется под действием капиллярных сил (рисунок 16).



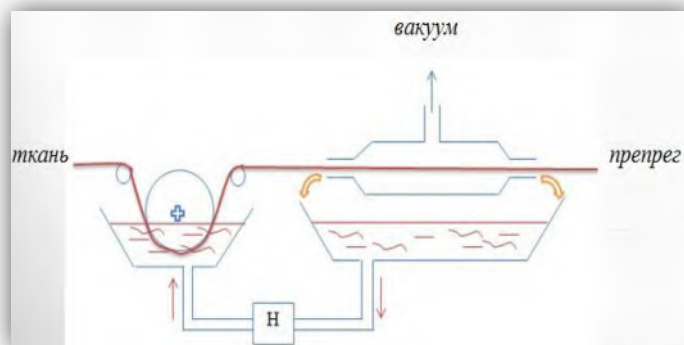
1 – распылитель (фильера, экструдер)
2 – пакет

Рисунок 16 – Пропитка методом напыления

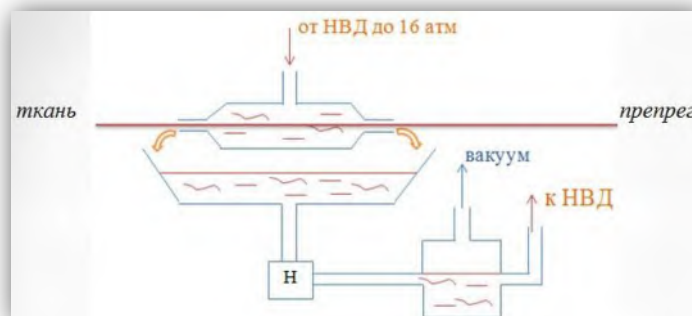
Пропитка под давлением (принудительная)



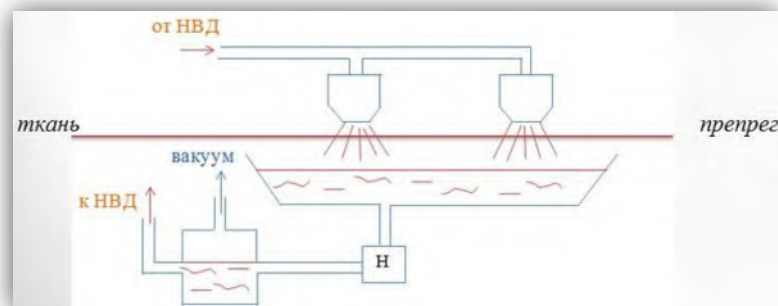
а) с предварительным вакуумированием наполнителя



б) с вакуумированием пропитанного материала



в) с гидростатическим давлением



г) с гидродинамическим давлением

Рисунок 17 – Разновидности принудительной пропитка

- **С ультразвуковой вибрацией**

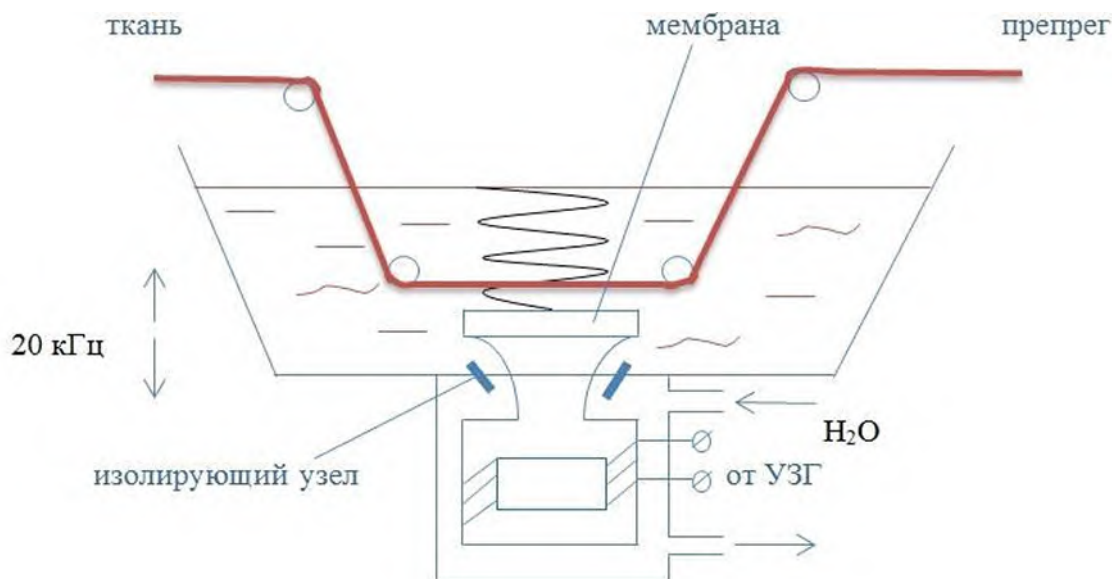


Рисунок 18 – Схема пропитки волокнистого наполнителя с помощью ультразвуковой вибрации

- **Комбинированные**

2.2 Способы формирования пакета заготовки. Сборка технологического пакета

Послойная выкладка

- **Ручная выкладка с ручным раскроем заготовок (рисунок 19)**
- **Ручная выкладка с автоматизированным раскроем заготовок (рисунок 20)**
- **Автоматизированная выкладка (рисунок 21)**

При выкладке необходимо соблюдать:

- ориентацию основы наполнителя в слое согласно схеме армирования
- допуск на ориентацию основы наполнителя
- целостность заготовки вдоль основы наполнителя
- величину зазора или нахлёста между заготовками
- время разрыва в процессе выкладки и до формования (для препрегов)
- не допускать образования складок

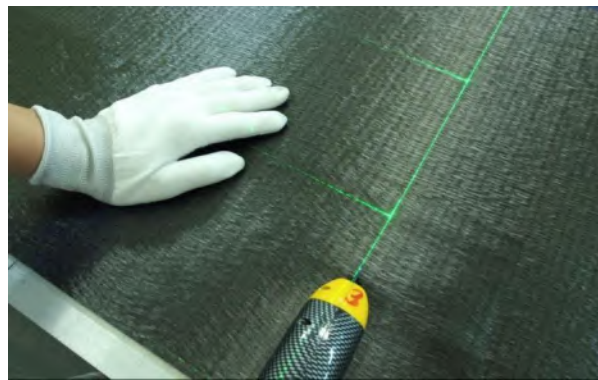


Рисунок 19 – Ручной раскрой



Рисунок 20 – Автоматизированный раскрой



Рисунок 21 – Автоматизированная выкладка

Достоинства - высокая производительность на прямолинейных участках, равномерность усилия натяжения и прикатки наполнителя, высокая точность ориентации наполнителя.

Недостаток – отсутствие возможности выкладки деталей большой кривизны с малыми радиусами.

Намотка

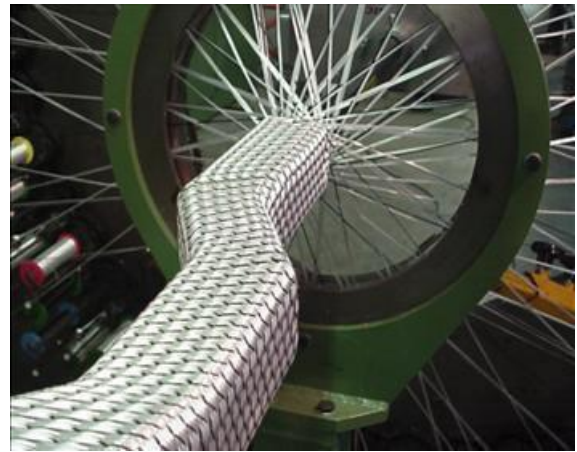


Рисунок 22 – Упрощённая схема намотки и визуализация процесса

Сборка технологического пакета

- Для пакета-заготовки из препрега

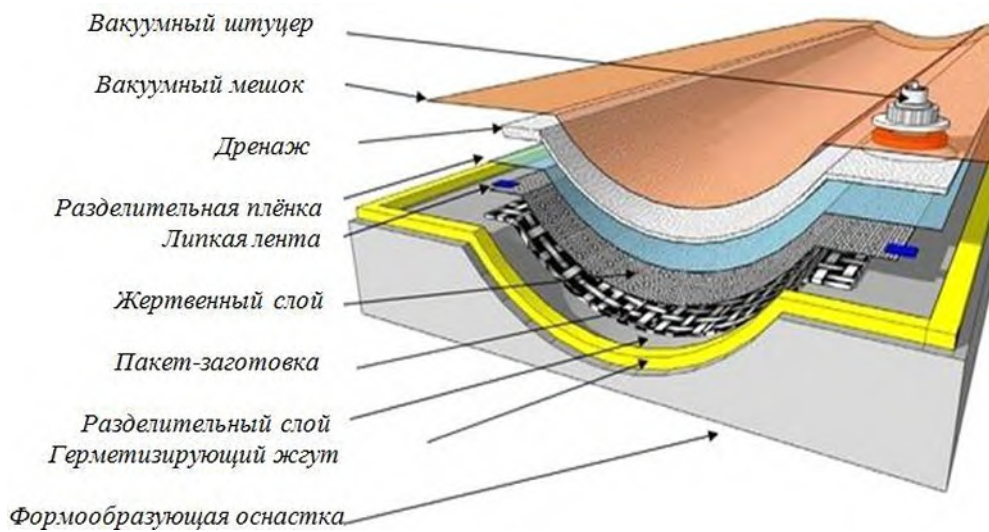


Рисунок 23 – Схема сборки пакета из препрега

- Для пакета-заготовки в виде преформы

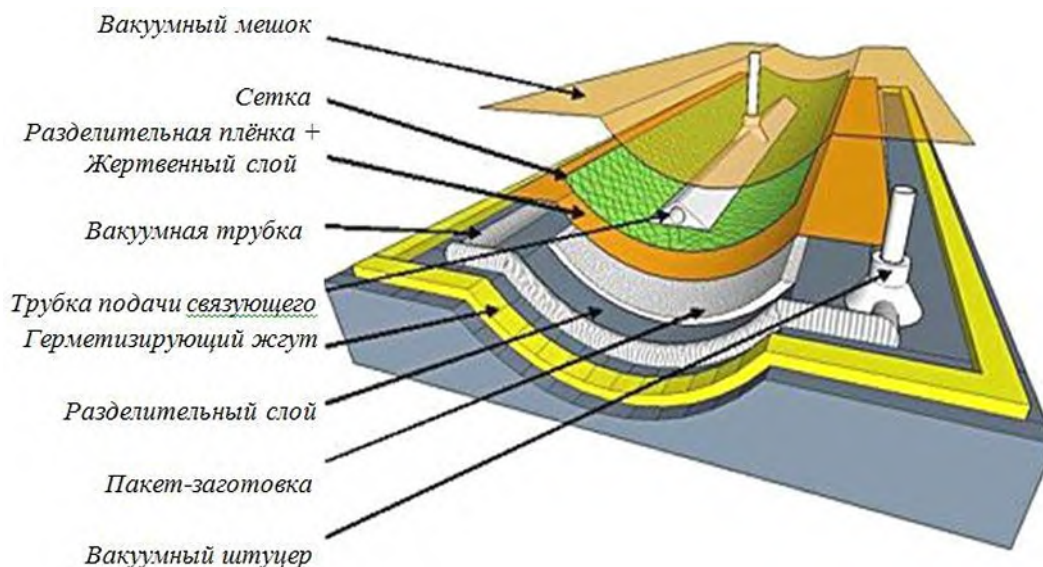


Рисунок 24 – Схема сборки пакета из заготовки в виде преформы

2.3 Методы формования деталей

Вакуумное

За счет создаваемого вакуумным насосом разряжения из пакета-заготовки удаляются пузырьки воздуха перед формованием и в процессе отверждения связующего, что позволяет получить высокое качество конечного изделия.

- при комнатной температуре
- при повышенной температуре в печи

К преимуществам данного метода можно отнести простоту технологии и минимальные затраты на подготовку и проведение процесса формования (нет необходимости в покупке дорогостоящего оборудования).

Недостаток - ограниченное время на создание вакуумного мешка и, как следствие, высокие требования к квалификации персонала.

Вакуумно-автоклавное формование

Процесс производства деталей автоклавным методом проходит при высоком давлении и температуре, что позволяет получить изделия высокой прочности. Предварительно раскрытый многослойный пакет-заготовку из

препрега укладывают в форму, к которой при помощи термостойкого герметизирующего жгута крепят вакуумный мешок. За счет использования вакуумного насоса в вакуумном мешке создается разрежение и удаление воздушных включений из пакета-заготовки.

Далее, изделие на специальной тележке, перемещающейся по рельсам, загружается в автоклав (рисунок 25). Не отключая вакуум, в автоклаве создают избыточное давление и нагрев до температуры отверждения препрега. Использование вакуумного насоса позволяет свести пористость изделия к минимуму, что гарантирует высокое качество конечного изделия.

Использование автоклавной технологии позволяет производить крупногабаритные изделия, к которым предъявляются самые высокие требования по качеству.

Данный метод малоприменим для крупносерийного производства и находит большее применение в производстве небольших партий высококачественных изделий.



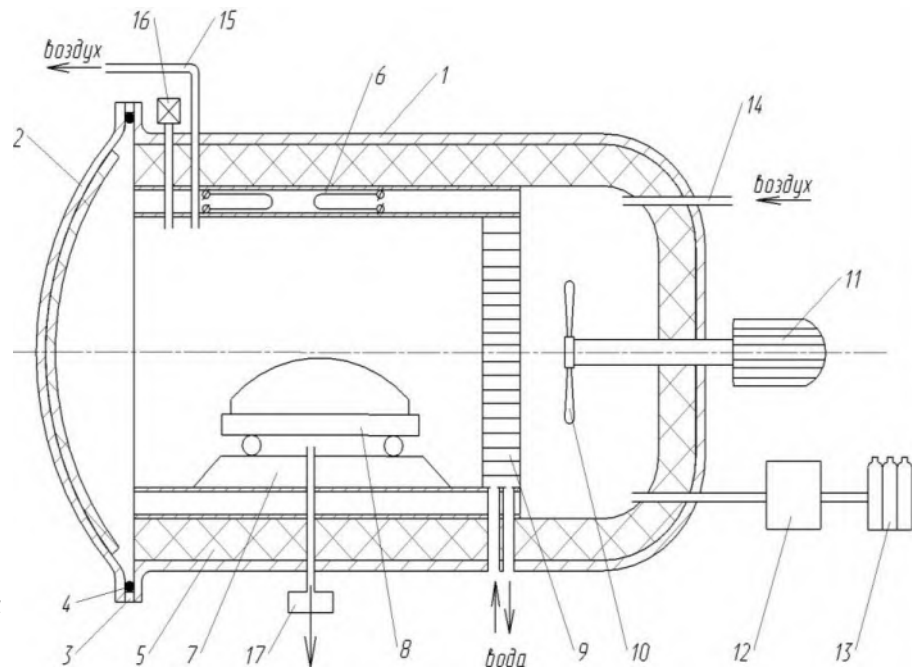
Рисунок 25 – Камера автоклава

Недостатки:

- ограниченное время на создание вакуумного мешка и, как следствие, высокие требования к квалификации персонала
- высокая стоимость самого автоклава

Схема подключения автоклава

- 1 – корпус автоклава
- 2 – крышка
- 3 – байонетный затвор
- 4 – уплотнение
- 5 – изоляция
- 6 – ТЭНы
- 7 – пол
- 8 – оснастка
- 9 – радиатор охлаждения
- 10 – вентилятор
- 11 – двигатель
- 12 – компрессор
- 13 – баллоны с газовой смесью (азот)
- 14 – вход воздуха от компрессора через ресивер
- 15 – сброс воздуха
- 16 – аварийный клапан
- 17 – вакуумная система



$T = 380\text{ }^{\circ}\text{C}$

$P = 16\text{ атм.}$

Вакуумная инфузия

На подготовленную оснастку укладывается предварительно раскроенный армирующий материал. Набор толщины конечного изделия осуществляется сразу на этапе выкладки в соответствии с требуемым количеством слоев. Вместе с армирующим материалом укладывается набор вспомогательных материалов.

Будущее изделие накрывается вакуумным мешком, который крепится к оснастке при помощи герметизирующего жгута. К вакуумному мешку через вакуумные трубки подключают вакуумный насос, чтобы убедиться в правильной сборке пакета и отсутствии утечек воздуха. Обнаруженные утечки необходимо устранить на данном этапе, так как после подачи смолы процесс будет необратим.

Благодаря созданному разрежению, предварительно дегазированная смола, по вакуумной трубке поступает в вакуумный мешок. При использовании проводящей сетки смола наиболее быстро и равномерно пропитывает слои армирующего материала. После пропитки всех слоев линию подачи смолы перекрывают, при этом вакуум оставляют включенным. Таким образом, исключается наличие воздушных включений в конечном

изделии. В зависимости от типа эпоксидной смолы и требуемого конструктива, изделие после пропитки может быть отверждено:

- при комнатной температуре
- при повышенной температуре в печи
- при повышенной температуре и давлении в автоклаве



Рисунок 26 – Современные камеры автоклавов

Достоинство - нет ограничений по времени выкладки пакета-заготовки и сборки технологического пакета.

RTM-процесс

RTM-процесс (Resin Transfer Molding) — процесс подачи (инъекции) смолы в закрытую форму. Классический RTM подразумевает использование алюминиевых матрицы (нижняя часть) и пуансона (ответная часть). При производстве по RTM-технологии обеспечивается глянцевая поверхность с обеих сторон.

Предварительно раскроенный сухой армирующий материал укладывается в подготовленную форму. Закрытие формы фиксируется либо крепежными болтами, либо смыкание формы происходит в прессе. В последнем варианте целесообразно использование прессы с плитами нагрева, для равномерного прогрева связующего в процессе инжестирования смолы.

Для подачи смолы используется специальное инъекционное оборудование, обеспечивающее качественное смешение компонентов,

подогрев подающих магистралей и необходимое давление смолы на выходе (рисунок 27).

Преимуществом данной технологии является возможность производства изделий различной геометрической формы за одну инъекцию, что позволяет исключить необходимость склеивания высоконагруженных элементов, и, как следствие, повысить физико-механические свойства изделия.

Данная технология применима при среднесерийном производстве высоконагруженных конструктивных элементов.

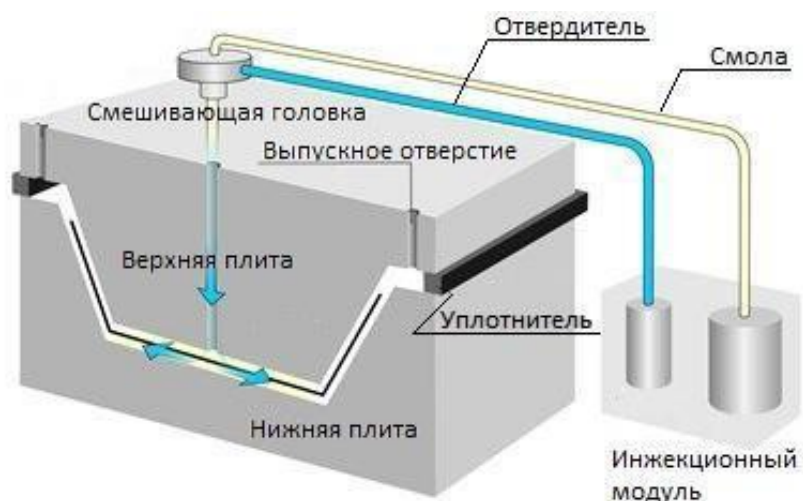


Рисунок 27 – Схема RTM-процесса

Пултрузия

Пултрузия - процесс, который используется для производства непрерывного армированного композиционного материала с постоянным поперечным сечением (рисунок 28).



Рисунок 28 – Схема процесса пултрузии

Непрерывный армирующий материал (мат, нить, ткань или вуаль) разматываются со шпулярика, и помещается в ванну со смолой. Пропитанный армирующий материал проходит через специальные валки на выходе из ванны, для удаления излишков смолы.

Далее материал проходит через нагреваемую формообразующую фильеру для получения требуемой геометрии изделия. В фильере происходит полимеризация профиля, благодаря нагреву, осуществляемого электрическими ТЭНами. Тянущее устройство (захваты) обеспечивает непрерывное вытягивание профиля из фильеры. Полученное изделие разрезают с помощью пилы (резака), установленной в конце пултрузионной линии.

Pullwinding: нидлтрузия, плейнтрузия, дельтатрузия; **роллформинг;** **pullforming** – сочетание пултрузии с другими методами (с обмоткой, образуя рельеф различной формы; с прокаткой не отверждённой заготовки через обогреваемые ролики для изменения формы; с последующим отверждением заготовки в прессе).

2.4 Механическая обработка деталей из ПКВМ. Неразрушающий контроль

Группа способов обработки	Достоинства	Недостатки
Механическая	Низкая шероховатость обработанных поверхностей, высокая точность обработки	Высокий износ инструмента и его влияние на качество обработки, расслоение, вырывание волокон, вероятность термической деструкции матрицы
Струйно-абразивная (гидроабразивная)	Отсутствует термическая деструкция матрицы, возможность резки конструкций большой толщины, высокая производительность	Высокая шероховатость поверхности, опасность насыщения композита водой
Лазерная	Малая ширина реза, высокая скорость резки, обработка маложестких деталей	Термическая деструкция матрицы, выделение дыма и пыли
Ультразвуковая	Высокая точность обработки, низкая шероховатость, отсутствие или минимальное расслоение материала	Низкая производительность, износ инструмента

Основными дефектами, возникающими при механической обработке, являются:

- растрескивание матрицы
- расслоение
- выдергивание волокон
- непрорез волокон
- термическая деструкция матрицы

Происхождение этих дефектов обусловлено особенностями лезвийной обработки КМ. Режущая кромка обычно хрупко разрушает матрицу и срезает армирующие волокна. Для устранения этих дефектов используют специальные конструкции инструментов, оптимизируют их геометрию, технологические режимы и условия обработки, используют специальные приспособления.

В отличие от металлов КМ на полимерной матрице обладают низкой теплопроводностью и теплостойкостью.

При температурах выше 300-350 °С начинается термодеструкция связующего. Это приводит к резкому ухудшению качества обработанной поверхности, появлению прижогов, дефектного слоя. Следует отметить также, что при обработке многих КМ недопустимо применение смазочно-охлаждающих жидкостей из-за опасности набухания и расслоения.

Перспективным является инструмент с алмазными и алмазоподобными покрытиями.

Рекомендуемые параметры инструмента и режимов обработки при использовании и резании резцами из спеченного поликристаллического алмаза

Параметр режущей части или обработки	Стеклопластик	Углепластик
Радиус режущей кромки, мм	0,001...0,003	0,0007...0.0025
Задний угол, град.	5...20	5...20
Передний угол, град.	0...5	0...5
Скорость резания, м/мин	150...1000	150...500
Глубина резания, мм	от 0,01	от 0,001
Величина подачи, мм/об	0,05...0,25	0,01...0,15

Алмазный инструмент для обработки композитов



Рисунок 29 – Режущий инструмент с алмазным напылением для обработки КОМПОЗИТОВ

Инструмент для обработки сотовых конструкций



Рисунок 30 – Режущий инструмент применяемый при обработке сотовых конструкций

При сверлении композиционных материалов часто возникают дефекты на входе и выходе отверстия, обусловленные особенностями силового воздействия сверла на заготовку.

На входе наблюдают расслоение материала, вызванное действием крутящего момента, а на выходе - расслоение и непрорез волокон (рисунок 31).

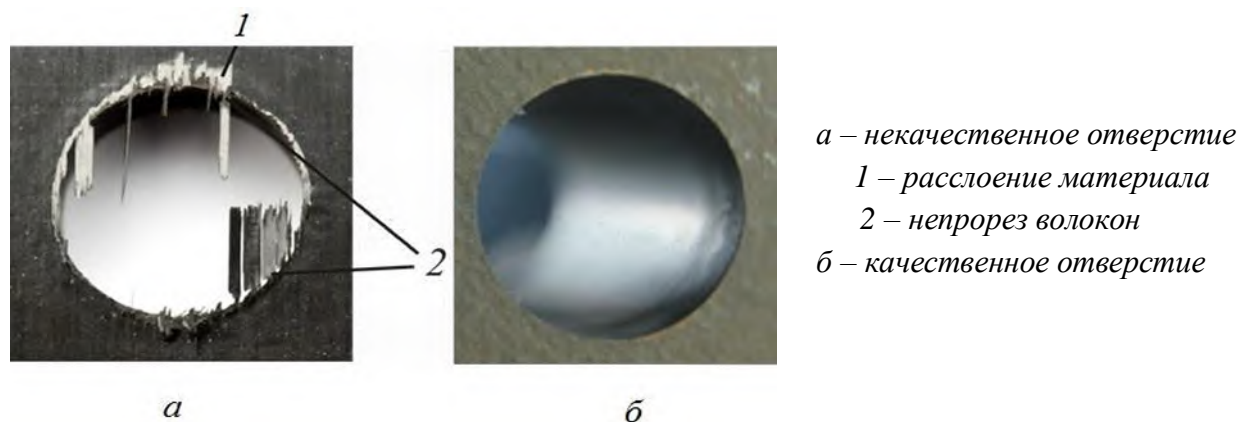


Рисунок 31 – Деламинация – расслоение и непрорез волокон на выходе режущего инструмента

Для уменьшения расслоения на входе отверстия используют сверла с двойной заточкой, а для устранения непрореза волокон – сверла с острыми кромками на периферии (рисунок 32).

Для того чтобы избежать расслоения иногда приходится использовать кондукторы и подложки, прижимаемые к поверхности с силой, достаточной для предотвращения расслаивания. Сверление обычно осуществляют со скоростями резания 100-200 м/мин при низких подачах в диапазоне 0,02-0,1 мм/об. На входе и выходе сверла для устранения расслаивания снижают величину подачи.

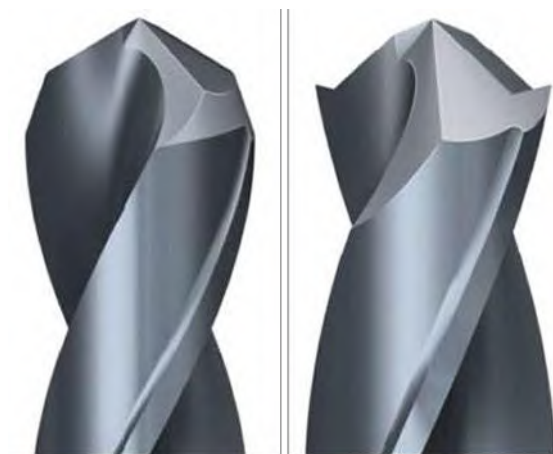


Рисунок 32 – Режущий инструмент для исключения деламинации

Для повышения качества обработки отверстий используют технологию орбитального сверления, которая имеет следующие преимущества:

- уменьшение расслоения вследствие снижения сил резания
- уменьшение температуры резания и, как следствие риска термодеструкции матрицы
- лучшие условия отвода тепла даже при отсутствии охлаждающей жидкости
- облегчение условий удаления стружки из отверстия вследствие уменьшения ее размера и наличия свободного пространства между сверлом и стенками отверстия
- возможность использования одного инструмента для обработки отверстий разного диаметра
- облегчение условий обработки наклонных отверстий и устранение увода оси отверстия

Орбитальное сверление выполняют концевыми фрезами:

а – борфреза с перекрестной насечкой

б – борфреза с перекрестной насечкой и сверлом

в – фреза с разнонаправленными спиральными канавками

г – многозубая фреза с большим углом наклона стружечных канавок

д – борфреза с обратным режущим торцом

е – концевая фреза с прямым зубом и стружкоразделительными канавками

ж – сферическая концевая фреза с перекрестной насечкой

з – концевая фреза $Z=1$ прямой зуб для высокоскоростной чистовой обработки

и – однозубая концевая фреза для высокоскоростной обработки $Z=1$ правая спираль, прерывистая режущая кромка

к – концевая фреза $Z=3$ спираль 45° с неравномерным шагом режущих кромок



Рисунок 33 – Режущий инструмент для выполнения орбитального сверления

Специализированное оборудование для механической обработки изделий из ПКВМ

- **Пневматические СМАП**

СМАП - сверлильные машины с автоматической подачей режущего инструмента (рисунок 34), предназначенные для разделки отверстий в смешанных пакетах материалов (ПКМ+Ti+Al) за один проход. Оснащены автоматическими системами подачи смазки в зону резания и пыле-стружкоудаления



Рисунок 34 – СМАП установленный в кондукторе

Способы фиксации СМАП на обрабатываемой поверхности

- а - цанговый механизм*
- б – байонетный механизм*
- в – механизм фиксации за соседнее отверстие*
- г – клещевой механизм фиксации*
- д – вакуумная траверса*

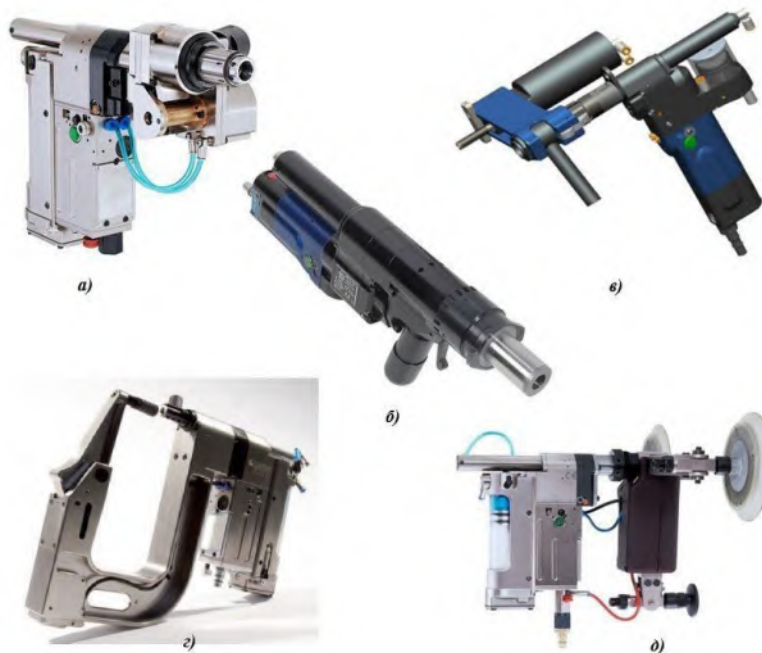
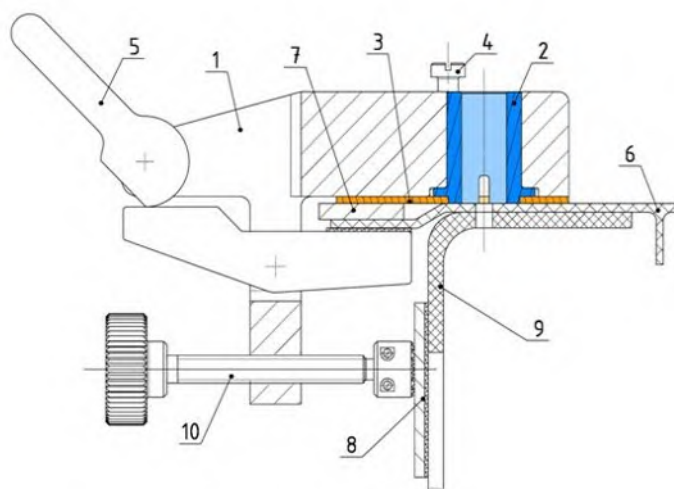
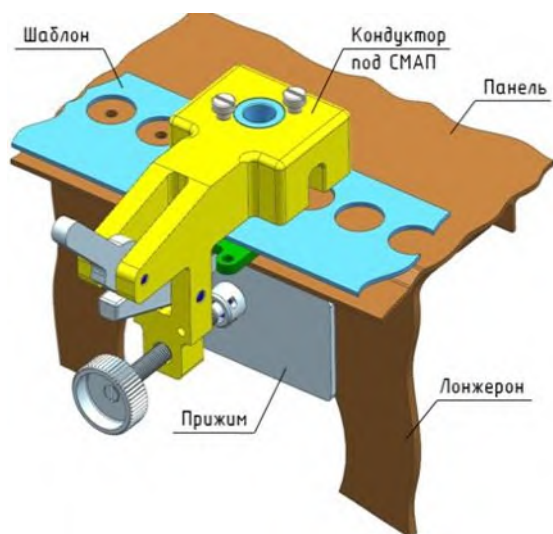


Рисунок 35 – Способы фиксации СМАП



В кондуктор (1) устанавливается втулка (2), которая в свою очередь имеющимся на ней буртиком входит в отверстие в тонкостенном шаблоне (3). Кондуктор закрепляется эксцентриковым замком (5) на панели (6). Зазор в месте подсечки компенсируется прокладкой (7). В вертикальной плоскости кондуктор дополнительно фиксируется прижимом (8) к лонжерону (9) при помощи нажимного винта (10). Через кондукторную втулку устанавливается СМАП и производится разделка отверстия.

- **Фрезерные центры с ЧПУ**



Рисунок 36 -Фрезерование на оснастке



Рисунок 37 - Фрезерование на гибком столе (вакуумных актуаторах)

- **Станки гидроабразивной резки**

Процесс резания происходит в результате воздействия на материал струи воды с твердыми абразивными частицами, подающейся под сверхвысоким давлением.

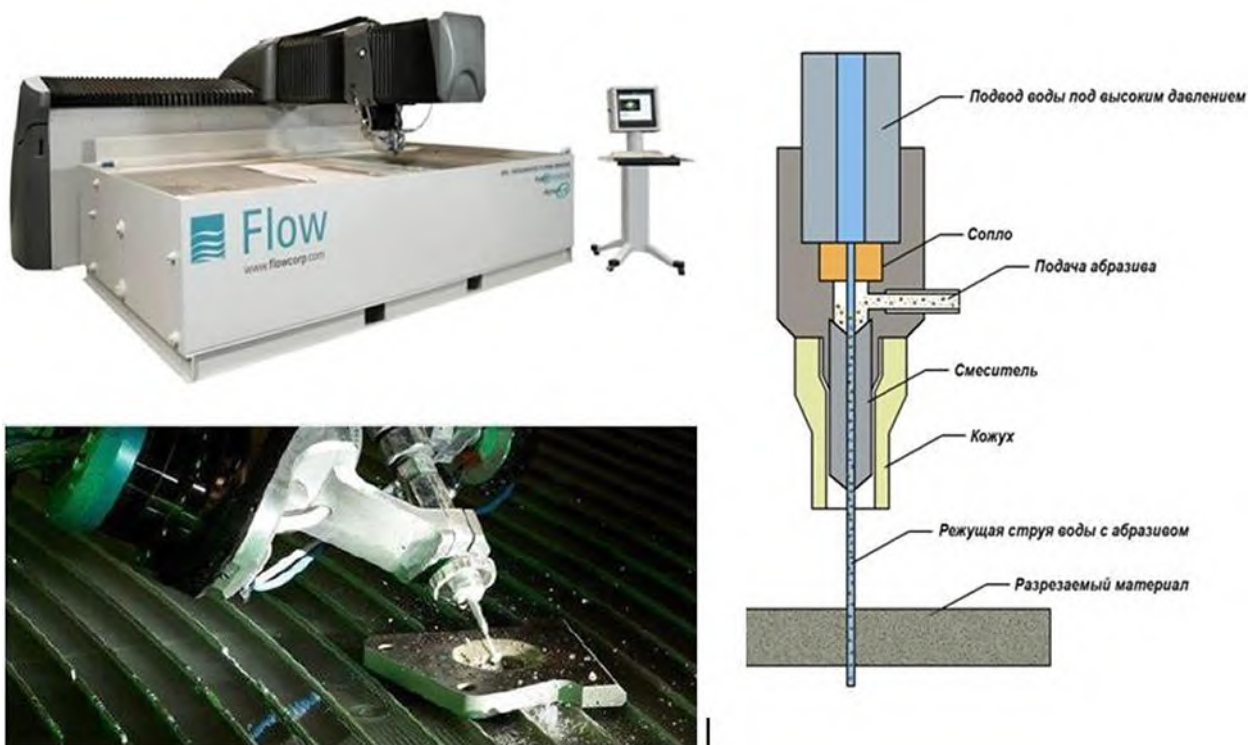


Рисунок 38 – Схема установки для гидроабразивной резки

Преимущества гидроабразивной резки над традиционными видами механической обработки, а также современными технологиями, такими, как плазменная и лазерная резка, позволяют:

- уменьшить отход обрабатываемого материала за счет уменьшения ширины реза – диаметр струи составляет 0,5-1,5 мм, в зависимости от типа используемых дюзов и смешивающих трубок (для сравнения, ширина реза на фрезерном станке составляет от 5 до 10 мм). Рез можно начинать в любой точке по контуру и любой сложности
- отсутствует тепловое и деформирующее воздействие на материал, таким образом, физико-механические характеристики материала остаются без изменений
- процесс гидроабразивной резки абсолютно чист и пожаробезопасен
- диапазон толщин обрабатываемых материалов варьируется от 0,1 до 300 мм и выше

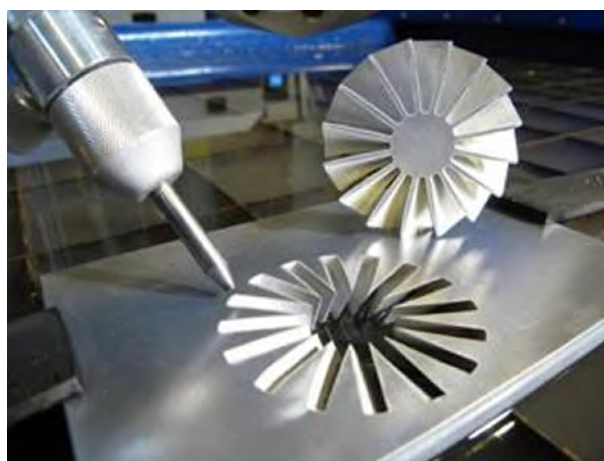


Рисунок 39 – Изделия гидроабразивной резкой

Неразрушающий контроль

- **Акустический (ультразвуковой)** – наиболее распространённый метод неразрушающего контроля (60 %).

Ультразвуковая дефектоскопия — метод, предложенный С.Я. Соколовым в 1928 году и основанный на исследовании процесса распространения ультразвуковых колебаний с частотой 0,1 - 25 МГц в контролируемых изделиях с помощью специального оборудования — ультразвукового дефектоскопа. Является одним из самых распространенных методов неразрушающего контроля. Существуют следующие разновидности акустического метода неразрушающего контроля:

- Импедансный
- Велосиметрический
- Свободных колебаний
- Теневой
- Эхо-импульсный
- Метод фазированных решёток и др.

- **Оптический**
- **Радиационный** (рентгеновский метод, метод радиоактивных изотопов и др.)
- **Магнитный** (ядерно-магнитная резонансная томография)
- **Тепловой**
- **Голографический**
- **Микрорадиоволновой**
- **Комбинированный** (оптико-акустический) и др.

3 ТЕХНОЛОГИЯ ВЫПОЛНЕНИЯ СОЕДИНЕНИЙ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

3.1 Общая характеристика применяемых в самолётостроении соединений

Соединение деталей, узлов, панелей и агрегатов самолетов при сборке производится различными способами. Применяемые в самолетостроении соединения разделяют на:

- неподвижные неразъемные (клепка, сварка, пайка, склеивание)
- неподвижные разъемные (болтовые и винтовые)
- подвижные разъемные (шарнирные соединения, болтовые, валы и подшипники)

Неподвижные неразъемные соединения и неподвижные разъемные соединения обеспечивают неизменное положение собираемых деталей и узлов друг относительно друга. Подвижные соединения допускают такие перемещения.

3.2 Классификация соединений в самолетостроении по конструктивно-технологическим признакам

- соединения, выполняемые силовыми точками (заклепками, болтами, сварными точками). Характерными признаками таких соединений являются: ослабление соединяемых деталей из-за отверстий под заклепки и болты и нагрева деталей в зоне постановки сварных точек; концентрация напряжений в детали в зоне постановки силовой точки при нагружении конструкции; невысокая производительность труда при постановке силовых точек вследствие прерывистости выполнения соединений
- соединение непрерывным швом (сварка роликовая и плавлением, склеивание, пайка). Характерные признаки таких соединений: ослабление соединяемых деталей при их нагреве в процессе сварки, склеивания, пайки; значительная концентрация напряжений в детали в зоне шва; непрерывность процесса соединения, облегчающая механизацию и автоматизацию
- комбинированные соединения (точечная сварка + склеивание, клепка + склеивание, клепано-болтовое соединение). Такие соединения обладают всеми признаками соединений силовыми точками и непрерывным швом.

Выбор того или иного вида соединения зависит от конструкции самолета и материалов, из которых изготовлены его отсеки, узлы и детали.

В конструкциях самолетов преобладающим видом соединения является клепка. При изготовлении самолетов из сталей и титана (имеется в виду обшивка) соединения выполняют электроконтактной и дуговой сваркой.

При применении в конструкции самолета монолитных панелей и узлов количество клепаных и сварных соединений уменьшается, но увеличивается количество болтовых соединений. Монолитные узлы и панели в этих случаях соединяют между собой и с обшивкой болтами.

Для конструкций из композиционных материалов наибольшее применение находят клепаные, клееклепаные и штифто-болтовые соединения. Для соединения пакетов больших толщин и смешанных пакетов (КМ + металл) эффективно использовать болты и болт-заклепки.

3.3 Технологический процесс выполнения заклёпочного соединения. Способы образования и обработки отверстий под болты и заклёпки

При сборке узлов, панелей и агрегатов самолётов клёпка до настоящего времени остается наиболее распространенным видом неразъемного соединения, так как она обеспечивает требуемую надежность и ресурс работы агрегатов планера.

В самолетостроении применяется большое количество различных типов заклепок. Для открытых мест конструкции, где возможен двухсторонний подход в зону клепки, применяют обычные стержневые заклепки. При клепке закрытых мест, когда подход к одной из головок заклепок невозможен, применяют специальные заклепки для односторонней клепки.

Обычные — стержневые заклепки изготавливают из легких сплавов и сталей с потайными или выступающими закладными головками. Все применяемые в самолетостроении заклепки стандартизированы, имеют шифр, указывающий форму закладной головки, марку материала, диаметр и длину.

Наиболее распространенные типы заклепок

- 1 — с плоской закладной головкой — ЗП
2 — с потайной закладной головкой ЗУ — 90°
или ЗУ — 120°
3 — с компенсатором ЗУК
4 — стержневая
5 — компенсатор
6 — маркировка материала Д18 на головке заклепки
7 — маркировка материала Д19П на головке заклепки

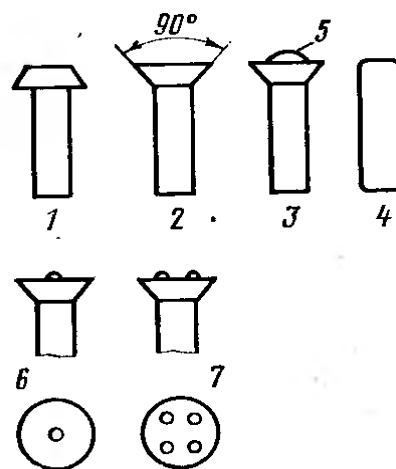


Рисунок 40 – Типы заклёпок в авиастроении

Технологический процесс клепки конструкций из КМ включает в себя известную последовательность операций:

- образование отверстий и гнезд
- вставку заклепок
- образование замыкающих головок
- контроль

Технологический процесс клепки, состав операций и их последовательность во многом определяются требованиями обеспечения ресурса и герметичности, типом заклепок, методом сборки. Однако специфические свойства КМ — гетерогенность структуры, малое относительное удлинение при разрушениях, значительное абразивное воздействие армирующих волокон — существенно изменяют процесс резания и формообразования заклепок при выполнении клепаных соединений. Поэтому для обеспечения требуемого качества клепаных соединений КМ технологический процесс, оборудование, инструмент, заклепки проектируются с учетом особенностей механических свойств КМ.

Способы образования и обработки отверстий под болты и заклёпки

- Сверление отверстий
- Зенкерование отверстий
- Развертывание отверстий
- Протягивание отверстий

Основными способами образования отверстий в КМ являются сверление, пробивка и формование. Для КМ, обладающих повышенным абразивным воздействием, например, КМ, армированных волокнами бора, целесообразно применять пробивку.

В элементах конструкции из КМ, получаемых методом выкладки или намотки, возможно, получать отверстия и гнезда формованием на стадии, предшествующей полному отверждению КМ. Некоторое снижение прочности КМ на смятие для формованных отверстий компенсируется отсутствием перерезания волокон КМ.

Сверление отверстий производят сверлами из твердых сплавов. Сверла из быстрорежущей стали используются в порядке исключения в труднодоступных местах, когда требуются удлиненные или специальные сверла, так как значительное абразивное воздействие армирующих волокон на инструмент приводит к его интенсивному износу и снижению качества отверстий.

Упругость КМ приводит к возникновению упругого последствия при резании, что увеличивает площадь контакта и силы трения по задней поверхности инструмента, а также приводит к усадке отверстий при сверлении и зенковании. Поэтому режущие части инструмента должны иметь увеличенные задние углы, а диаметр мерных сверл и зенковок должен быть несколько больше диаметра отверстия.

В целях повышения качества гнезд и снижения износа инструмента целесообразно использовать шестизубые зенковки.

При сверлении отверстий в деталях из КМ принято назначать несколько меньшие скорости резания V и особенно подачи S , чем при сверлении отверстий в деталях из легких сплавов. Для образования отверстий и гнезд в деталях из КМ можно использовать в основном существующее сверлильно-зенковальное оборудование. Предпочтение следует отдавать оборудованию с регулируемой подачей инструмента, что имеет большое значение при образовании отверстий в смешанных пакетах.

Сверление на станках с ручной подачей и пневмодрелями однородных и смешанных пакетов, имеющих двухсторонний доступ, рекомендуется производить в два прохода: вначале сверлить со стороны более прочной детали, имеющей большую толщину, затем рассверливать со стороны тонкой детали для однородных и со стороны КМ — для смешанных пакетов. Данное требование вызвано разницей в усилиях резания КМ и металла (особенно сталей и титановых сплавов), в результате чего при сверлении со стороны металла из-за невозможности сохранения равномерной подачи инструмента

отверстие в КМ получается типа «проткнутого» с рваными краями и значительной ворсистостью. Сверление на станках с регулируемой подачей однородных пакетов с двухсторонним доступом производится со стороны детали, имеющей большую толщину, а смешанных пакетов — со стороны металлической детали. Для смешанных пакетов, имеющих односторонний доступ, следует предусматривать разборку пакета и удаление заусенцев на кромках отверстий.

4 ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ










4.1 Аддитивные технологии. Определение и ключевые понятия понятия

ASTM International (American Society for Testing and Materials) в своём стандарте ASTM F2792.1549323-1 так определяет аддитивные технологии: «Процесс объединения материала с целью создания объекта из данных 3D-модели, как правило, слой за слоем, в отличие от субтрактивных (вычитающих) производственных технологий».

Ключевые понятия: 3D-модель и послойное создание изделия.

Важно отметить, что послойность нанесения материала характерна лишь на текущем этапе развития технической мысли. Теоретически модели можно создавать методом отличным от послойного.

4.2 Классификация аддитивных технологий по методу формирования геометрии

 SL - Стереолитография	SLA; DLP; SGC; CLIP распространены мало
 PJ - Распыление фотополимера	SLA; MJM; PolyJet
 BJ - Распыление клея	CJP; ZDP
 LM - Плавление лазером	SLM; DMLS; DMD
 EBM - Плавление электронным лучем	EBM
 LS - Лазерное спекание	SLS
 MJ - Распыление материала с остыванием	MJM; PolyJet
 FDM - Послойное наплавление материала	FDM; FFF
 Неклассифицируемые методы печати	LOM; SDL;

4.3 Краткое описание аддитивных технологий. Характерные черты



Лазерное спекание (LS – Laser Sintering)

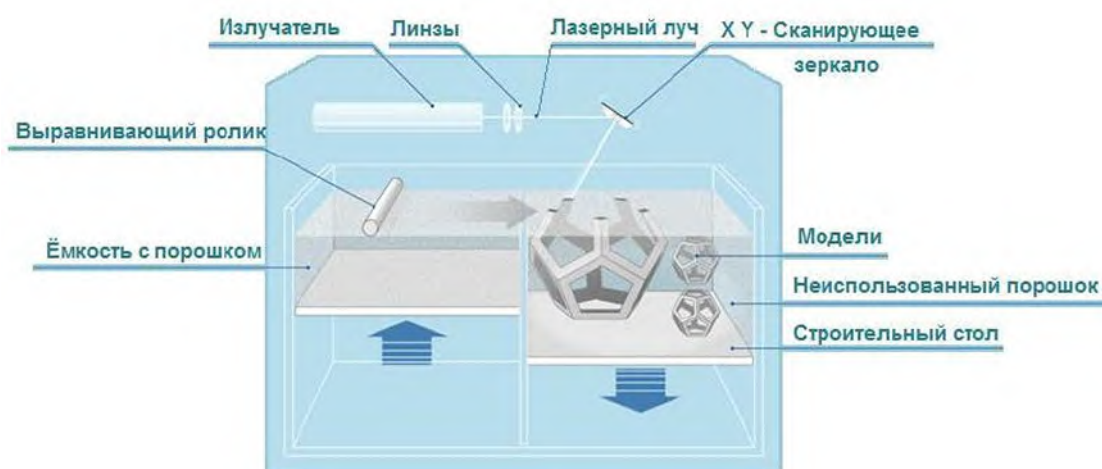


Рисунок 41 – Схема процесса LS

● **Selective Laser Sintering (SLS)** – Выборочное лазерное спекание. Суть технологии заключается в послойном спекании частиц порошкообразного материала до образования физического объекта по заданной CAD-модели. Спекание материала происходит под воздействием луча одного или нескольких лазеров. Перед началом процесса построения

расходный материал разогревается до температуры чуть ниже точки плавления, чтобы облегчить и ускорить процесс спекания.

Специальный выравнивающий механизм подаёт порошок из камеры с расходным материалом в камеру построения. Затем лазер «прожигает» слой изделия на основе компьютерной модели. После этого в камеру построения подаётся следующий слой материала. Процесс повторяется до тех пор, пока объект не будет полностью построен. В ходе печати платформа построения постоянно опускается вниз (шаг равен толщине печатного слоя). Таким образом, зона взаимодействия материала и луча лазера всегда находится на одном уровне.

В качестве опорных структур для строящейся модели здесь выступает неиспользованный порошок, который после извлечения готового объекта очищается и снова используется для печати.

- **Direct Metal Laser Sintering (DMLS)** – прямое лазерное спекание металлов

Характерным отличием DMLS от SLS является затекание расплава-связки под действием капиллярных сил в пустоты между частицами. Для успешного процесса печати в порошковую смесь добавляют соединения с фосфором. Они снижают поверхностное натяжение, вязкость и степень окисления расплава, таким образом, улучшая смачиваемость. Порошок, используемый в качестве связки, обычно имеет меньший размер, чем порошок основы, поскольку это позволяет увеличить насыпную плотность порошковой смеси и ускорить процесс образования расплава.

Лазерное плавление (LM – Laser Melting)

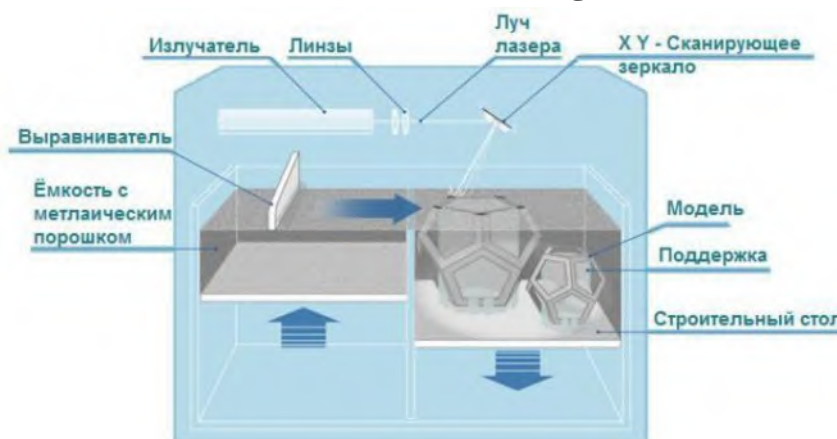


Рисунок 42 – Схема процесса LM

- **Selected Laser Melting (SLM)** – выборочная плавка лазером

Производственный цикл состоит из нанесения слоя порошка на рабочую поверхность – как правило, металлический стол, способный передвигаться в вертикальном направлении. Отсутствие кислорода позволяет избегать оксидации расходного материала, что делает возможной печать такими материалами, как титан. Плавка производится с помощью лазерного луча, направляемого по осям X и Y двумя зеркалами с высокой скоростью отклонения. Мощность лазерного излучателя достаточно высока для плавки частиц порошка в гомогенный материал.

Плавление электронным лучом (EBM – Electron Beam Melting)



Рисунок 43 – Схема процесса EBM

Электроны испускаются нитью накала, разогретой до 2500°C , и далее, проходя через анод, разгоняются до 0,5 скорости света. При достижении электронами порошка кинетическая энергия превращается в тепло и металлический порошок сплавляется. Мощность регулируют количеством электронов. Процесс построения детали происходит в вакуумной камере.

В сравнении с SLS, SLM и DMLS, EBM обладает более высокой скоростью построения за счёт более высокой мощности излучателей и электронного, а не электромеханического, отклонения пучков.

Выборочное тепловое спекание (SHS – Selected Heat Sintering)

Технология основана на плавке слоёв термопластического или металлического порошка с помощью теплового излучателя. Относительно не

высокие энергетические затраты позволяют создавать настольные SHS принтеры.

SHS схоже с SLS - единственное существенное отличие заключается в использовании печатающей головки с инфракрасным излучателем вместо лазерного луча.

Такое решение позволяет снизить стоимость и габариты устройств, вплоть до возможности создания настольных принтеров. С другой стороны, энергетическая отдача SHS-принтеров мала по сравнению с SLS устройствами, что ограничивает выбор материалов. Как правило, в качестве расходных материалов используются пластики или достаточно легкоплавкие металлы. В последнем случае модели зачастую требуют дополнительного обжига для повышения прочности.

Послойное наплавление материала (FDM – Fused Deposition Modeling, FFF – Filament Fused Fabrication)

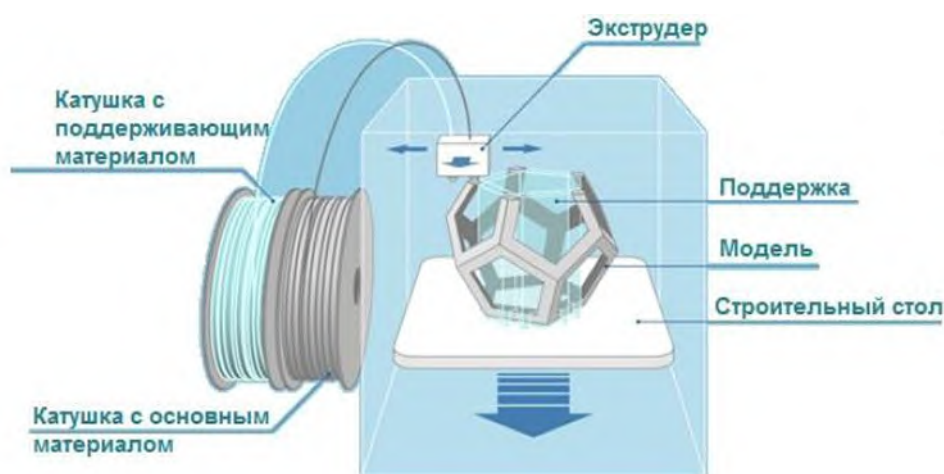


Рисунок 44 – Схема процесса FDM

FDM и FFF – самые распространённые технологии 3D-печати в мире. С их помощью выращивают изделия, как на дешёвых домашних принтерах, так и на промышленных системах высокоточной 3D-печати. Принцип построения по технологии FDM заключается в послойном построении изделия из предварительно расплавленной пластиковой нити или гранул. Использование гранулированного материала уступает по себестоимости только SDL и LOM-печати.

3D-модель в формате STL передаётся в программное обеспечение 3D-принтера. Программа автоматически (или оператор вручную) располагает модель в виртуальном пространстве рабочей камеры. Затем программа

автоматически генерирует элементы вспомогательных конструкций (из специального материала поддержки) и проводит расчёт количества расходных материалов, а также времени выращивания прототипа. Перед запуском процесса печати модель автоматически разделяется на горизонтальные слои и производится расчёт путей перемещения печатающей головки.

Затем запускается процесс непосредственной 3D-печати: нагревающая головка (экструдер) расплавляет материал в виде лески или гранул и послойно укладывает её согласно данным 3D-модели.

Распыление материала с остужением (MJ – Multi Jetting)

Технологии PolyJet и Multi Jet Modeling (MJM) запатентованы разными компаниями и подобны друг другу по качеству, но материалы для PolyJet доступнее.

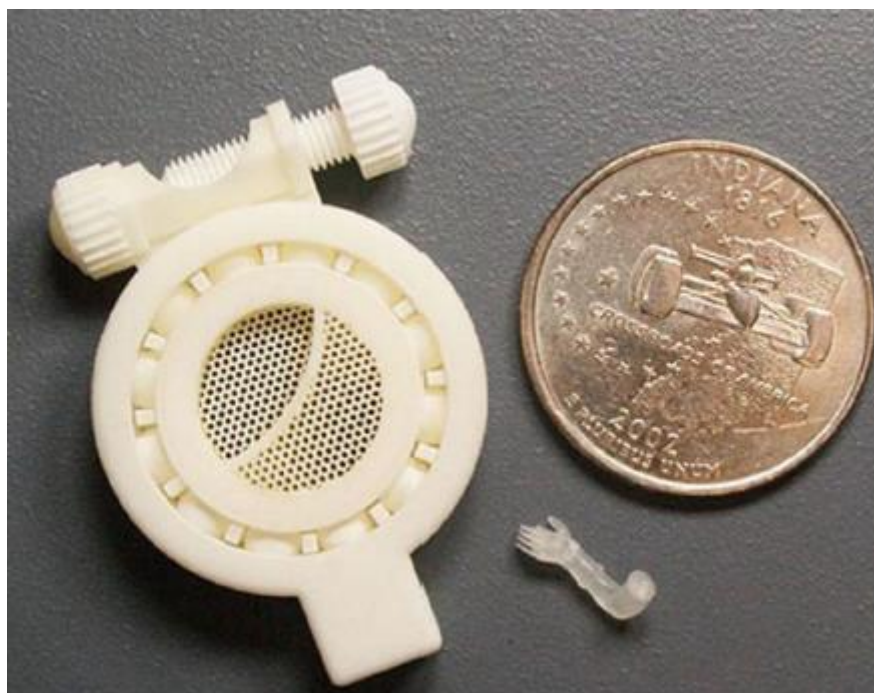


Рисунок 45 – Изделия, полученные в процессе MJ

MJM-технология 3D-печати основана на многоструйном моделировании с помощью фотополимерного или воскового материала.

Принцип PolyJet и MJM-печати подобен струйному. В основе технологий – печатающая головка с массивом мельчайших сопел, расположенных линейно в несколько рядов. Количество сопел варьируется в зависимости от стоимости принтера и объёма его камеры. Одно сопло – одна капля модельного материала для построения изделия.

Печатающий блок движется вдоль рабочей поверхности и наносит слой жидкого полимера. Следом за печатным блоком следует ультрафиолетовая лампа, которая засвечивает только что нанесённые частицы материала, в результате чего тот затвердевает, формируя заданное изделие.

Кроме основного материала в процессе печати используется вспомогательный (или материал поддержки). Это восковая структура, служащая опорой для навесных элементов будущей модели. После окончания печати восковые поддержки выплавляются в специальной печи.

Распыление клея (BJ – Binder Jetting)

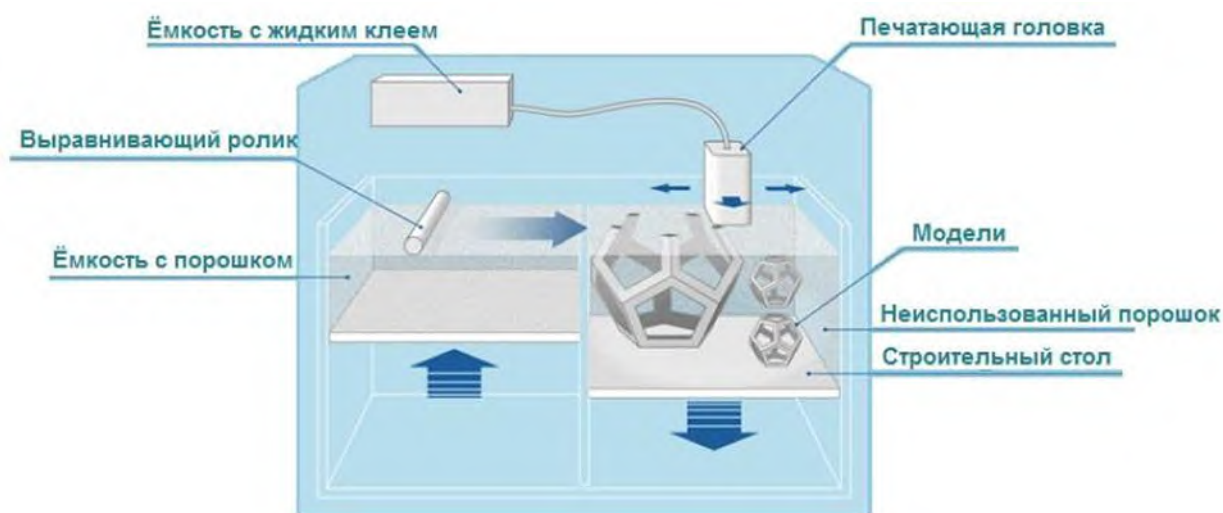


Рисунок 46 – Схема процесса BJ

На специальную платформу роликом наносится тонкий слой порошкообразного материала (гипс, полимеры, песок, металл). С помощью печатающей головки происходит распыление связующего вещества (клей, вода, специальная смесь) по координатам границ первого слоя, полученным с компьютера.

После этого платформа с моделью опускается на толщину слоя вниз, а камера со строительным веществом на такое же расстояние вверх. Далее, ролик раскатывает следующий слой и процесс повторяется. После окончания 3D-печати изделие извлекают из слоя порошка и тщательно очищают его от остатков.

В случае металлической печати, изделие помещают в печь, наполненной защитным газом, обычно азотом. При повышении температуры до 1000-1100 °С связующее вещество удаляется, а свободное место вокруг

частишек порошка пропитывает бронза (или другой металл) предварительно помещённый рядом с «сырой» моделью.

Стереолитография (SL – Stereo Lithography)



Рисунок 47 – Схема процесса SL

Лазерная стереолитография (SLA) – технология 3D-печати, основанная на послойном отверждении жидкого материала под действием луча лазера.

Фотополимер – это вещество, изменяющее свои свойства под воздействием ультрафиолетового света. В обычном состоянии фотополимер жидкий, а при попадании под УФ-излучение приобретает прочность. Продолжительность облучения и длина волны рассчитывается в зависимости от конкретного материала, размеров объекта и условий окружающей среды.

Принцип работы:

В ёмкость с жидким фотополимером помещается сетчатая платформа, на которой будет происходить выращивание модели. Изначально платформа устанавливается на уровень равный толщине одного слоя. Далее лазер воздействует на участки полимера, которые соответствуют стенкам заданного объекта, вызывая их отверждение.

После этого вся платформа погружается ровно на один слой, то есть на глубину и процесс повторяется для контура следующего слоя.

По завершению построения объект погружают в ванну со специальным составом для удаления лишних элементов и полной очистки, и финальное облучение светом для окончательного отвердевания. Как и многие другие методы 3D-прототипирования, SLA требует возведения поддерживающих структур, которые вручную удаляются по завершении строительства.

Распыление фотополимера (PPJ – Photo Polymer Jetting)



Рисунок 47 – Схема процесса PPJ

PolyJet-технология 3D-печати основана на послойном отверждении жидкого фотополимерного материала под воздействием ультрафиолетового излучения. В остальном процессы построения аналогичны MJ-методу.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Основная литература

1. Абибов А.Л., Бирюков Н.М., Бойцов В.В. и др. Технология самолётостроения: Учебник для авиационных вузов. М: Машиностроение, 1982. 551 с.
2. Берлин А.А. , Вольфсон С.А., Ошмян В.Г. Ениколопов Н.С. Принципы создания композиционных материалов. М.: Химия, 1990. - 238 с.
3. Бушуев Ю.Г., Персин М.И., Соколов В.А. Углерод-углеродные композиционные материалы: Справочник. - М.: Металлургия, 1994. - 138 с.
4. Ершов В.И., Павлов В.В., Каширин М.Ф., В., Кухорев В.С. Технология сборки самолётов: Учебник для студентов авиационных специальностей вузов. М.: Машиностроение, 1986. - 456 с.
5. Кербер М.Л., Виноградов В.М., Головкин Г.С. и др. Полимерные композиционные материалы. СПб.: Профессия, 2009. - 560 с.
6. Крысин В.Н., Крысин М.В. Технологические процессы формования, намотки и склеивания конструкций. — М.: Машиностроение, 1989. - 240 с.
7. Мэттьюз Ф. Роллингс Р. Композитные материалы. Механика и технология, М.: Техносфера, 2004, - 407 с.
8. Николаев А.Ф., Крыжановский В.К., Бурлов В.В. и др. Технология полимерных материалов. СПб.: Профессия, 2008. - 544 с.

Дополнительная литература

9. Аддитивные технологии Лекция 1: Введение. Классификация аддитивных технологий / Презентация филиал ПАО «Корпорация «Иркут» 2016 г.
10. Аддитивные технологии Лекция 2: Оборудование для аддитивных технологий. Мировые лидеры производства / Презентация филиал ПАО «Корпорация «Иркут» 2016 г.
11. Аддитивные технологии Лекция 3: Материалы для аддитивных технологий, их классификация и особенности / Презентация филиал ПАО «Корпорация «Иркут» 2016 г.
12. Композиционные материалы Часть 1: Виды, технологии изготовления и оборудование / Презентация доклада филиал ПАО «Корпорация «Иркут» 2015 г.
13. Композиционные материалы Часть 2: Виды, технологии изготовления и оборудование / Презентация доклада филиал ПАО «Корпорация «Иркут» 2015 г.
14. Композиционные материалы Часть 3: Перспективные технологии / Презентация доклада филиал ПАО «Корпорация «Иркут» 2015 г.