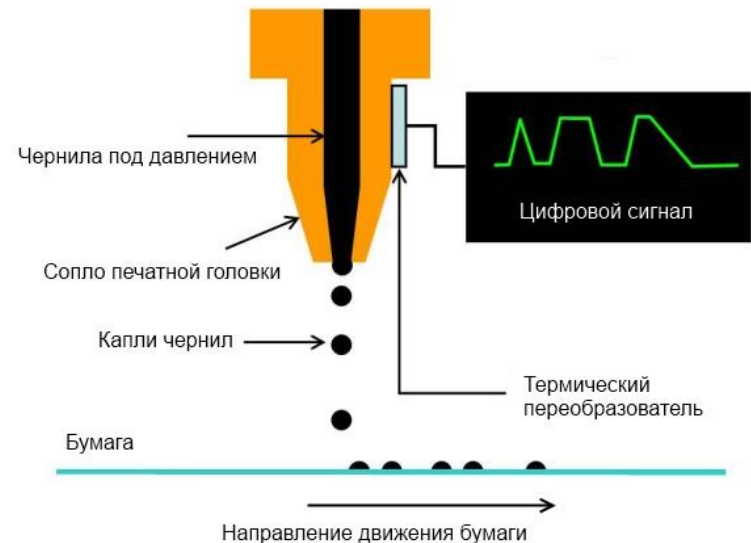
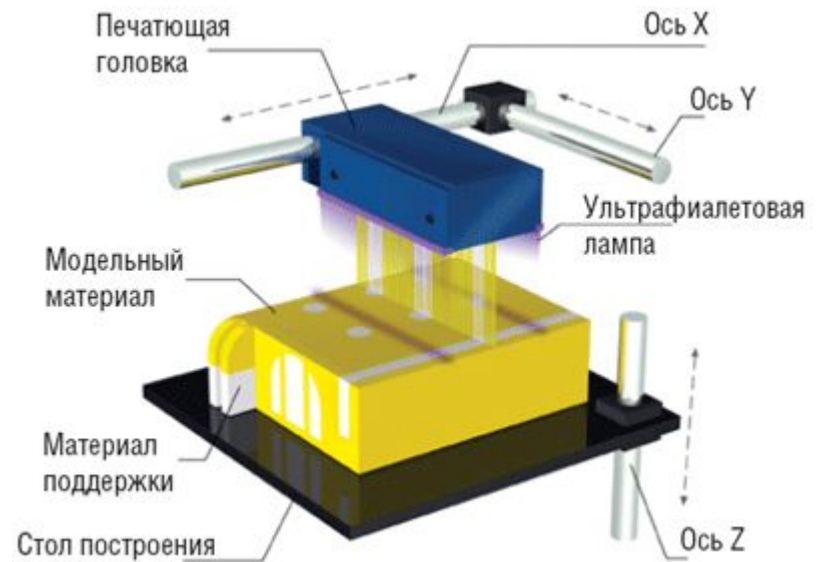


# **ТРЕХМЕРНАЯ ПЕЧАТЬ И ЛАМИНИРОВАНИЕ**

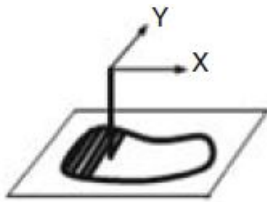
# ТРЕХМЕРНАЯ ПЕЧАТЬ

- Базируется на широко известных принципах струйной 2D печати.
- Ее возникновение (1960е) связано с необходимостью вывода информации с цифровых устройств.

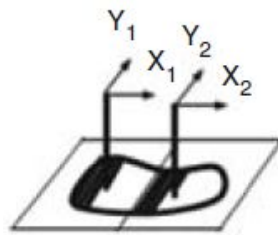


# МЕСТО В КЛАССИФИКАЦИИ

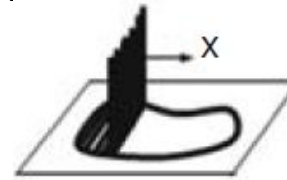
Линейный канал



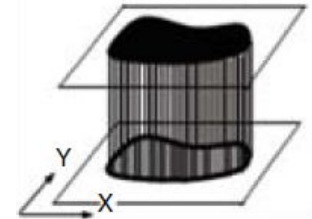
Два линейных канала



Массив линейных каналов



Двумерный (плоский) канал



Жидкий полимер

Стереолитография (SLA)

Двухлучевая стереолитография

Objet

Отверждение на твердом основании

Отдельные частицы

Избирательное лазерное спекание

LST (EOS)

**Трехмерная печать связующего**

DPS

Расплавленный материал

Моделирование методом наплавления

**Прямая трехмерная печать**

Твердые листы

Ламинирование

# ТРЕХМЕРНАЯ ПЕЧАТЬ



## Прямая печать

- «Чернила» - основной материал детали;
- Впервые представлена в патенте в 1980х
- **Материалы:** преимущественно термопласты
- Толщина слоя 0,0005-0,0016 дюйма.

## Печать связующего

- «Чернила» - связующее для порошковой подложки.
- Разработана в МИТ в начале 1990х.
- **Материалы:** широкий диапазон полимеров, металлов и керамики.

# ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССА ПЕЧАТИ

## Преимущества

- Низкая стоимость
- Высокая скорость
- Масштабируемость
- Возможность использования нескольких материалов;
- Возможность печати в цвете.

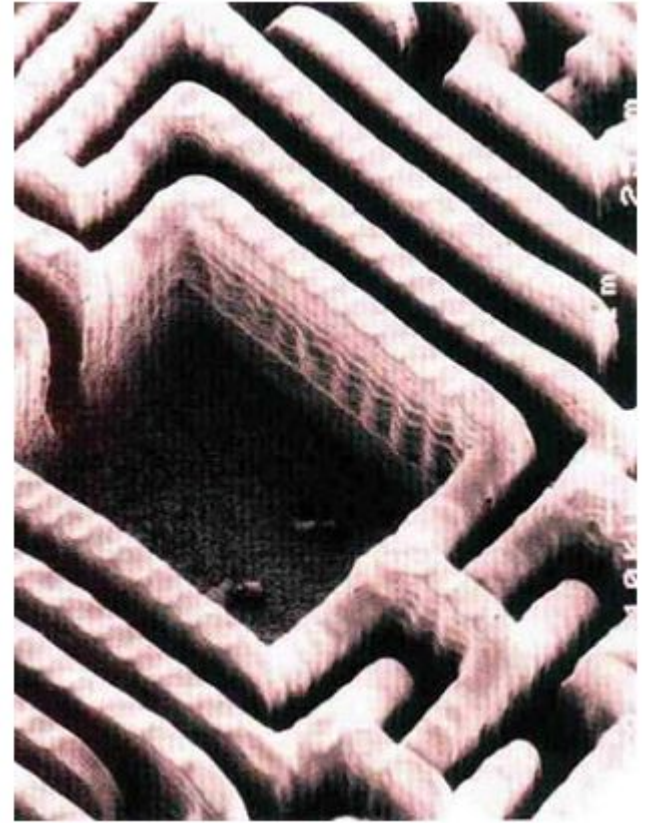
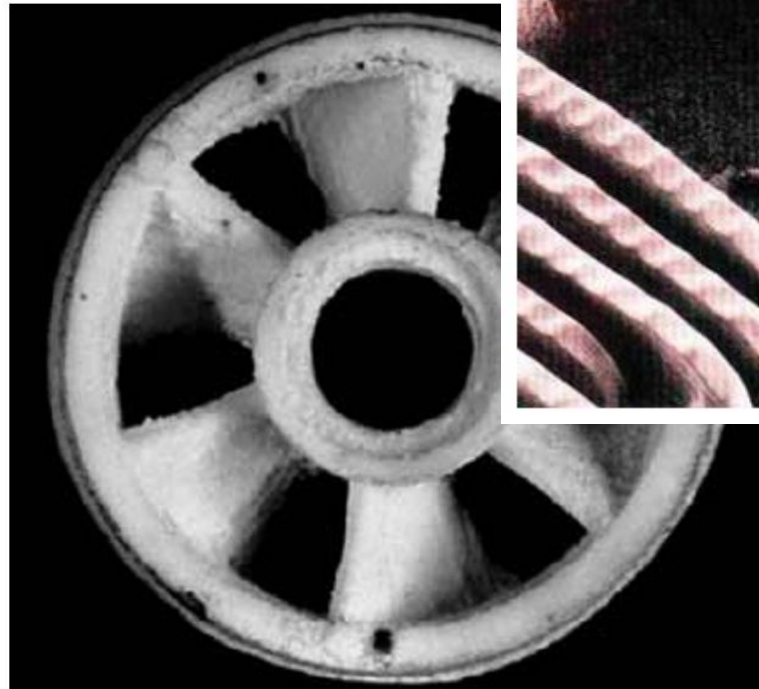
## Недостатки

- Ограниченный выбор материалов.
- Невысокая точность моделей, особенно для крупногабаритных деталей.

# МАТЕРИАЛЫ

- Наиболее часто для 3D печати используются:
- Полимеры,
- Металлы,
- Керамика.

Также возможно использование **органических соединений.**



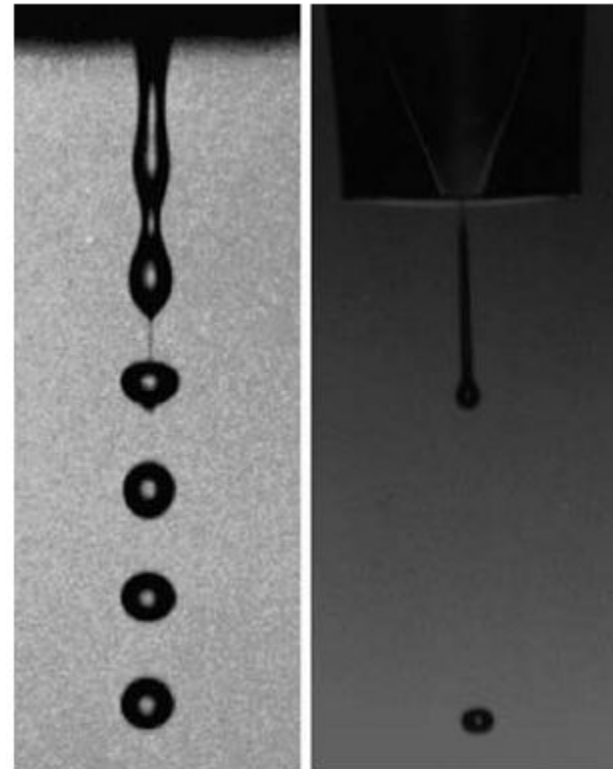
# ТРУДНОСТИ ПРОЦЕССА ПЕЧАТИ

Основные технологические трудности процесса 3D печати связана с **механизмом формирования капель**:

- Необходимо поддерживать материал в **жидком** состоянии.
- Необходимо создавать **дискретные** капли малого объема – для обеспечения разрешения.
- Необходимо **контролировать** процесс осаждения капель и их связывания с подложкой или предыдущим слоем.

# ТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ КАПЕЛЬ

- Выделяют 2 основных механизма формирования капель:
- Непрерывный поток (CS)
- Импульсная (DOD)



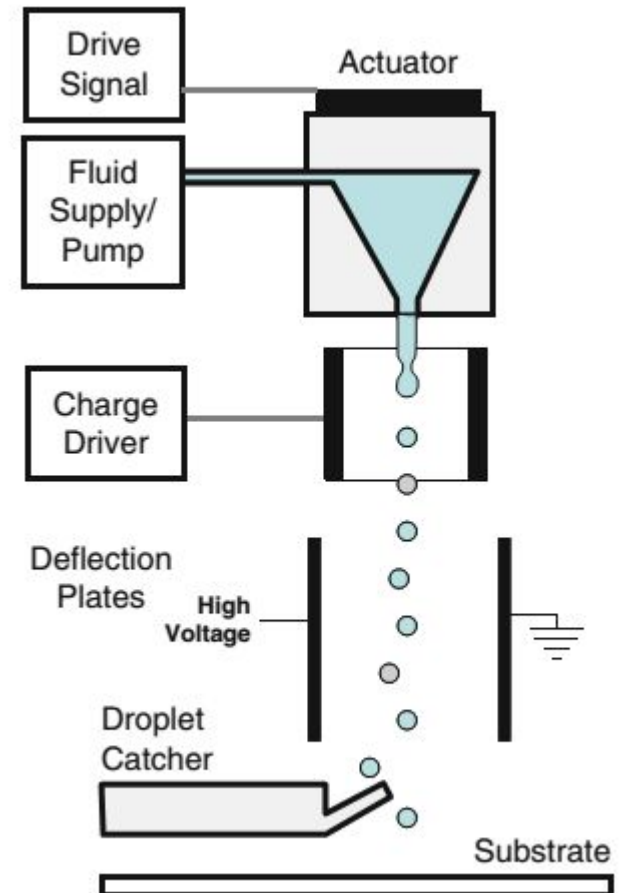
CS

DOD



# НЕПРЕРЫВНЫЙ ПОТОК

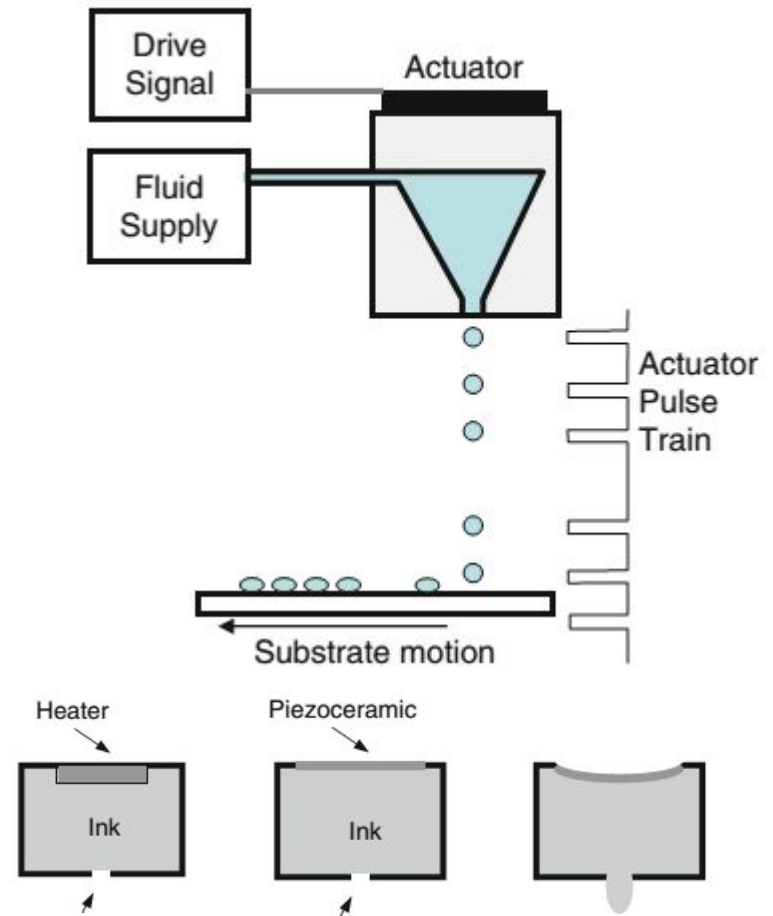
- К емкости с жидкостью применяется **постоянное давление**.
- **Прерывание** потока осуществляется через вибрацию, возмущение или модуляцию частоты воздействия.
- Так капли формируются через **постоянные интервалы**.
- Достигается **высокая производительность**.



Ø капли 150 мкм;  
частота 80-100кГц

# ИМПУЛЬСНО-КАПЕЛЬНАЯ СИСТЕМА

- Капли формируются **индивидуально**.
- Пульсации давления создаются тепловыми, электростатическими, пьезоэлектрическими, акустическими или другими приводами.



Размер капли 25-120 мкм  
До 2000 капель /с.

# ФОРМИРОВАНИЕ КАПЛИ



# МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЕЧАТИ

- Для формирования капли необходимо подвести **энергию** достаточную для компенсации потерь вязкого потока, формирования свободной поверхности и придания требуемой **скорости**

$$E_{\text{imparted}} = E_{\text{loss}} + E_{\text{surface}} + E_{\text{kinetic}}$$

вязкость

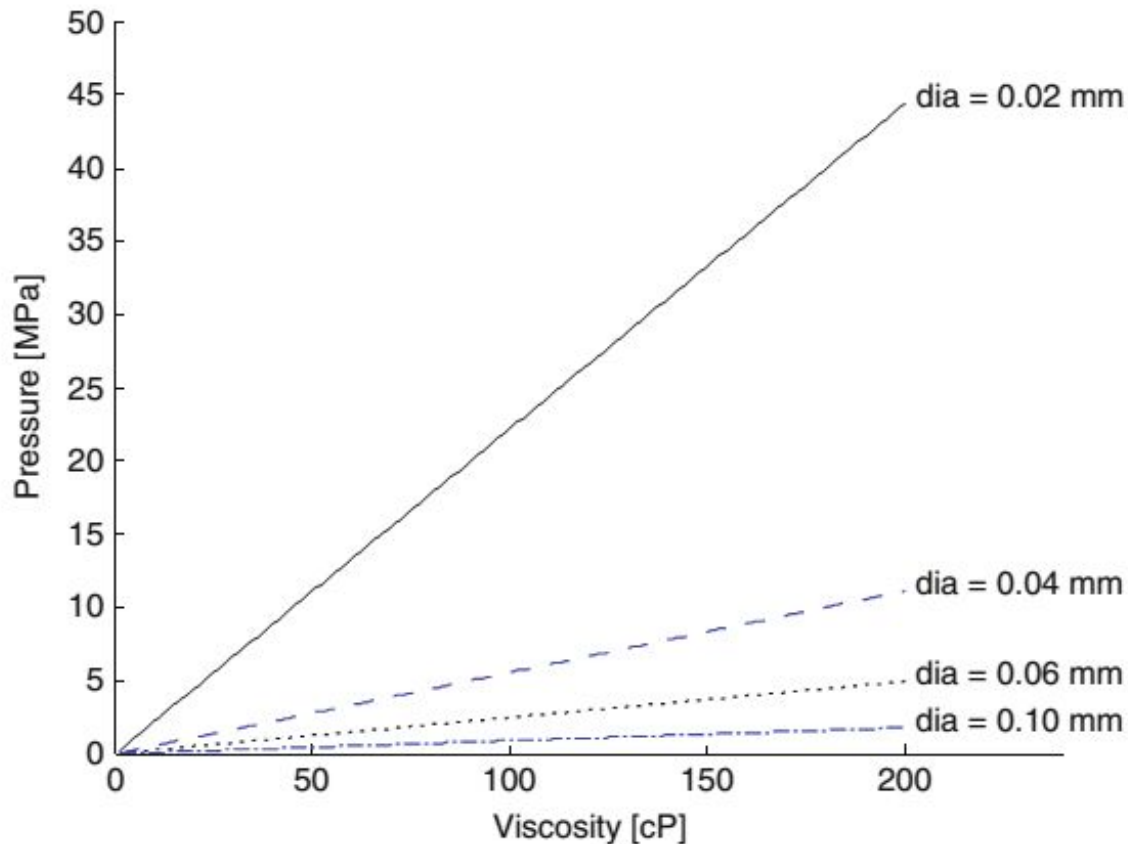
поверхностное  
натяжение

скорост  
ь

$$\Delta p = 32\mu d_j^2 v_j \int_{l_1}^{l_2} \frac{dl}{d_n^4} + \frac{2\sigma}{d_j} + \frac{\rho v_j^2}{2}$$

- Необходимое **избыточное давление** определяется в зависимости от плотности  $\rho$  и вязкости  $\mu$  жидкости, силы поверхностного натяжения  $\sigma$ , диаметра  $d_j$  и скорости  $v_j$  капли, диаметра  $d_n$  и длины  $l$  сопла.

# ДИАГРАММА ТРЕБУЕМОГО ДАВЛЕНИЯ



**1 cP = 1 мПа\*с,**  
единица  
измерения  
вязкости

Используется для оценки давления, требуемого для преодоления вязкости в трубках различного диаметра.

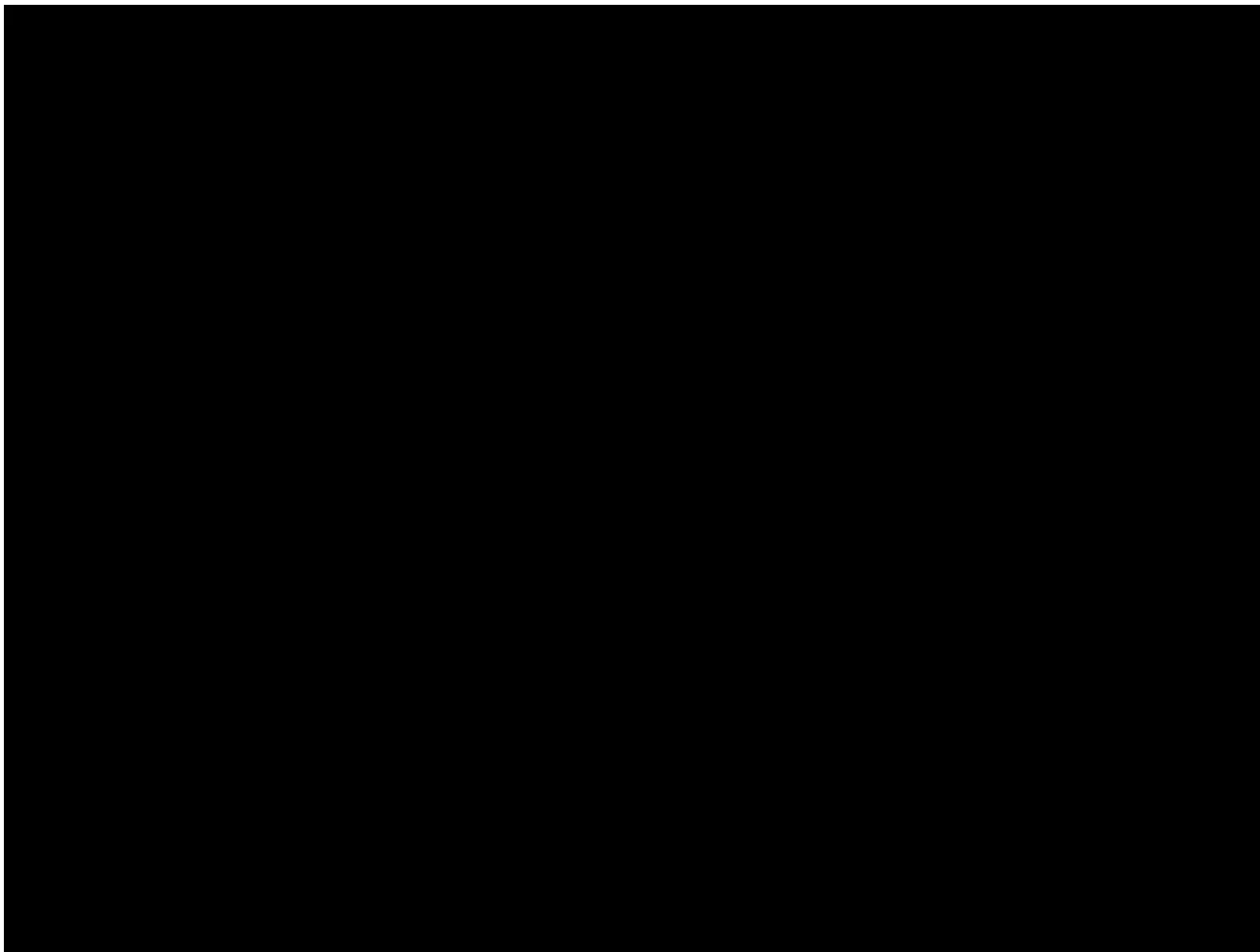
# МЕТОДЫ МОДИФИКАЦИИ МАТЕРИАЛА

- Для наилучшего формирования капель необходимо обеспечить вязкость **20-40 сР** при температуре печати.
- Для **снижения вязкости** наиболее часто используются: нагревание, растворители или смешивание с менее вязкими компонентами.

# ПРЯМАЯ ТРЕХМЕРНАЯ ПЕЧАТЬ

***Solidscap***<sup>®</sup>  
*High Precision 3D Printers*

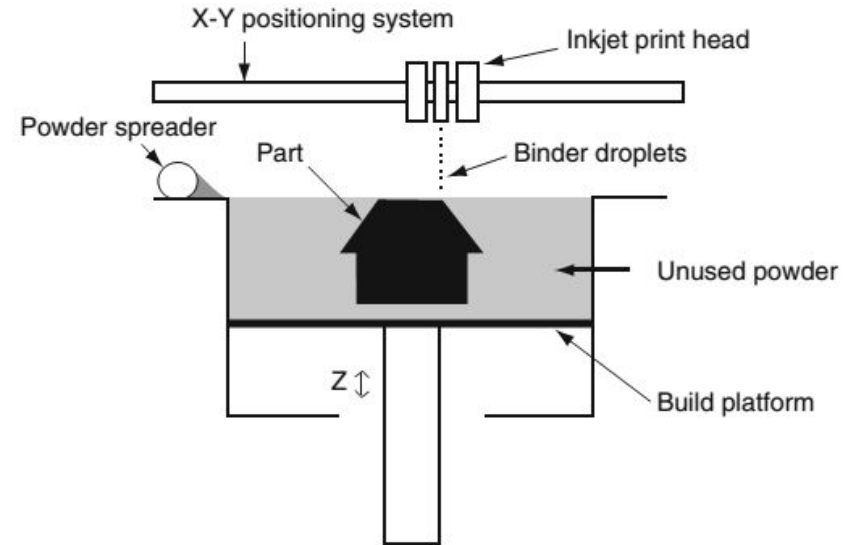
# ПРЯМАЯ ПЕЧАТЬ ФОТОПОЛИМЕРА





# ТРЕХМЕРНАЯ ПЕЧАТЬ СВЯЗУЮЩЕГО

- Основана на формировании **агломераций** из капли связующего и частиц порошковой подложки.
- Процесс легко **масштабируется** путем добавления сопел.
- Несвязанный порошок выполняет роль **поддерживающей структуры**.

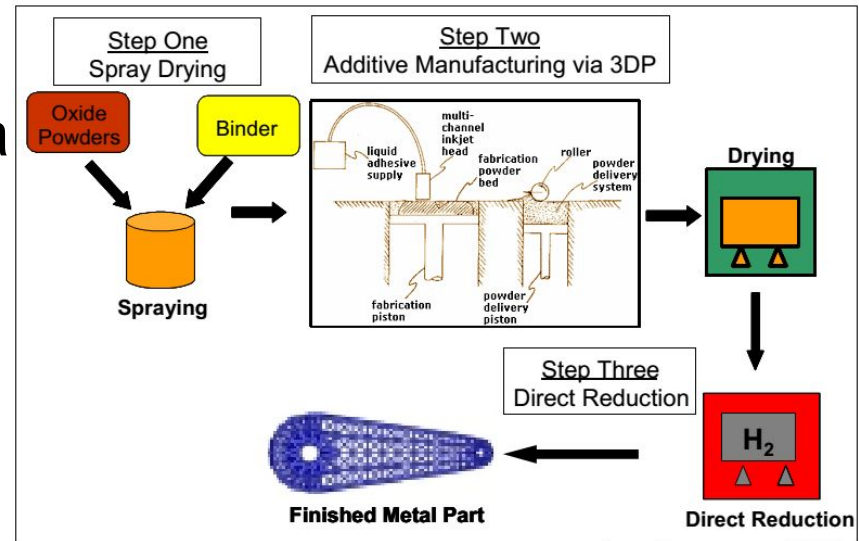


Традиционный материал:  
**керамика.**

Полученная «зеленая»  
деталь нуждается в  
**пропитке** для  
достижения  
механических свойств

# ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

- При использовании в качестве подложки металлического порошка связующим является термически разлагаемый полимер, выжигаемый при обработке «зеленой детали».



- Появляется возможность создания металло-керамического композита и восстановления металлической структуры из оксидного



# ОСОБЕННОСТИ ПЕЧАТИ СВЯЗУЮЩЕГО

- Увеличение **скорости** по сравнению с прямой печатью.
- Возможность использования **компози́тных порошков** и различных включений.
- Больше возможностей печати **в цвете**.
- Ниже точность и качество поверхности детали.
- Дополнительные этапы процесса производства детали.

# ТРЕХМЕРНАЯ ПЕЧАТЬ СВЯЗУЮЩЕГО



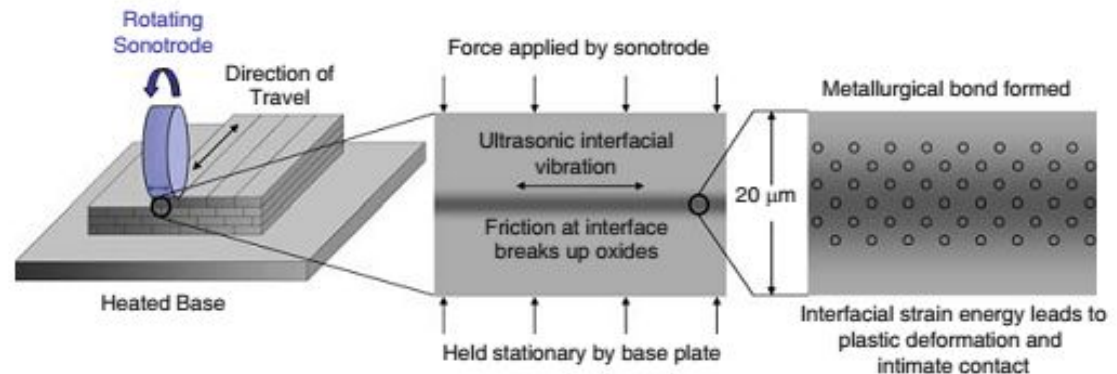
# СВЯЗЫВАНИЕ ПОСЛЕ ФОРМОВАНИЯ



# СОЕДИНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОМ

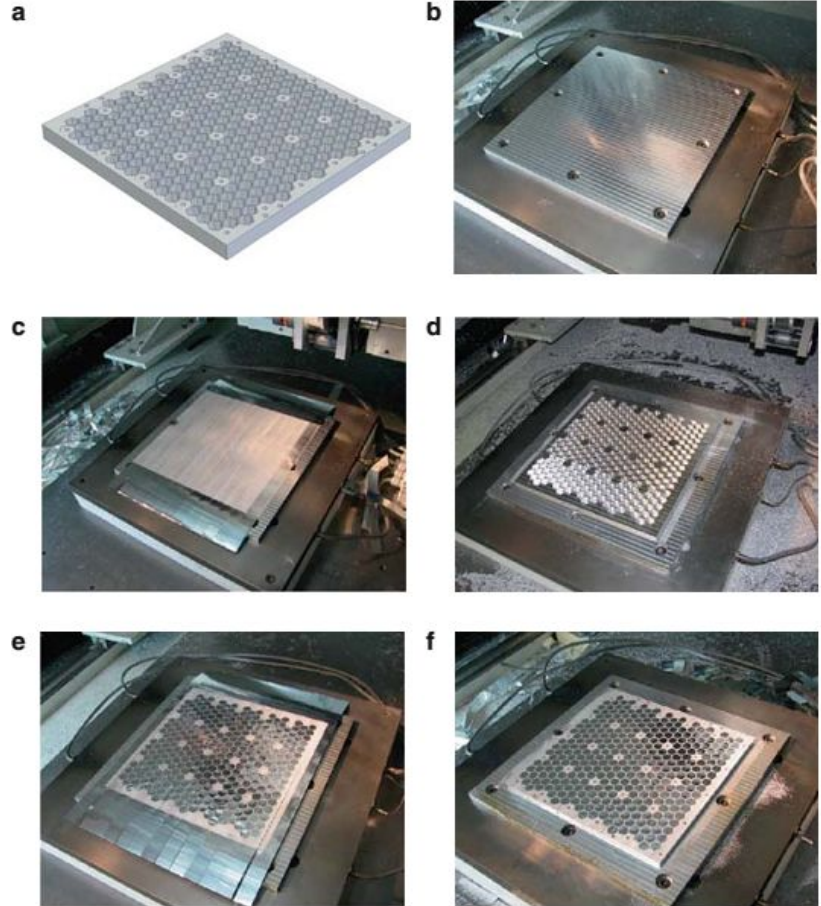
- Гибридный метод, соединяющий **ультразвуковую сварку** и фрезерование с ЧПУ.
- УЗ-волновод приваривает слой **фольги** к нагретой подложке, после чего контур слоя формируется фрезерованием.
- Таким образом, можно формировать **мультиматериальные объекты**, а также включать в структуру провода, оптоволокно, сенсоры и другие инструменты.

Толщина фольги  
100-150 мкм



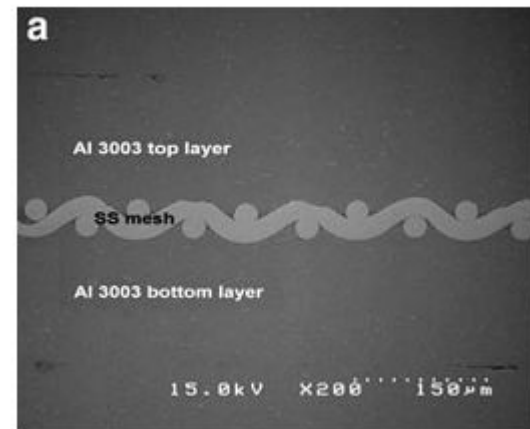
# ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ

- a. CAD модель;
- b. Базовая плита, прикрепленная к нагревателю;
- c. Первый слой фольги;
- d. Нанесение второго слоя на контур, сформированный на первом;
- e. После ряда операций приваривания и обрезки внутренние полости закрываются;
- f. Результирующая деталь.



# ОСНОВЫ ПРОЦЕССА УЗ-СВАРКИ

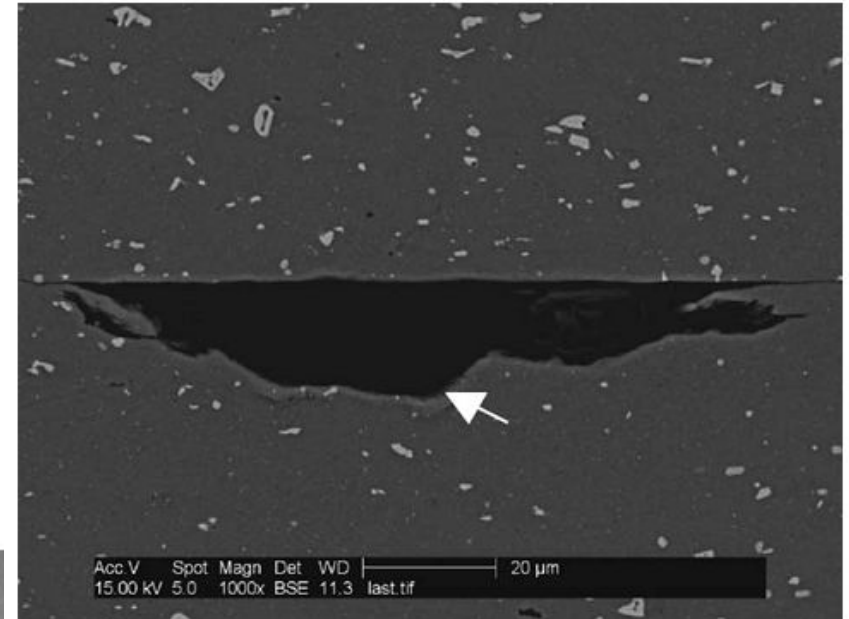
- В отличие от других способов сварки не требует высокой температуры для плавления материала;
- **Связывание** происходит за счет: механического пересечения, плавления поверхностного слоя, диффузии, атомных связей между ювенальными поверхностями.
- Требуется обеспечение плотного контакта и высокой чистоты соединяемых поверхностей.
- **Основные показатели качества:** линейная плотность сварного шва и прочность детали





# МИКРОСТРУКТУРНЫЕ ДЕФЕКТЫ ДЕТАЛЕЙ

- Поры между слоями из-за шероховатости или недостаточной энергии,
- Повреждения слоев,
- Стыки листов в пределах слоя.



# ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА УЗ-СВАРКИ

- **Амплитуда колебаний** - определяет количество подведенной энергии,
- **Нормальная сила** – необходима для формирования устойчивых связей между слоями,
- **Скорость перемещения** – определяет время облучения,
- **Температура** – уменьшает предел пластичности материала.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА УЗ-СВАРКИ

Перемещение волновода по поверхности описывается

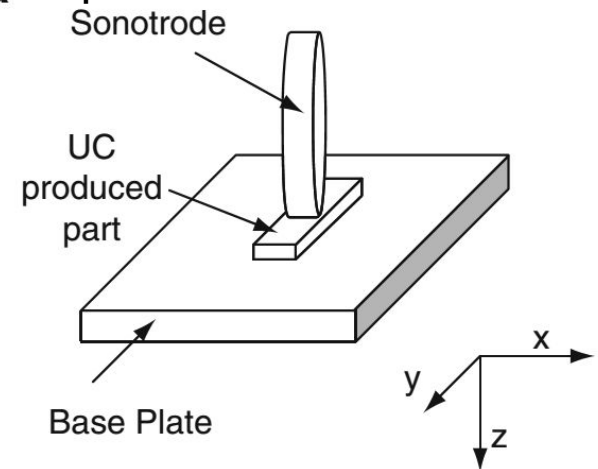
$$y_p \xi(t) = \xi_0 \sin(2\pi ft)$$

Где  $\xi_0$  – амплитуда колебаний;  $f$  – частота (обычно 20кГц)

Тогда ~~перемещение~~ ~~будет описываться~~ ~~как~~ Расчетная схема УЗ-сварки

$$a(t) = \xi''(t) = -(2\pi f)^2 \xi_0 \sin(2\pi ft)$$

Расчетная схема УЗ-сварки



$$D \quad a = \sqrt{\frac{PR}{2\pi} \left( \frac{2(\kappa_1 + 1)(1 + \nu_1)}{E_1} + \frac{2(\kappa_2 + 1)(1 + \nu_2)}{E_2} \right)} \quad T:$$

$\nu$  - коэффициент Пуассона;  $E$  – модуль Юнга

$R$  – радиус волновода;

**Ширина** –  $w$  – ширина фольги



**$A=2aw$**  – зона контакта

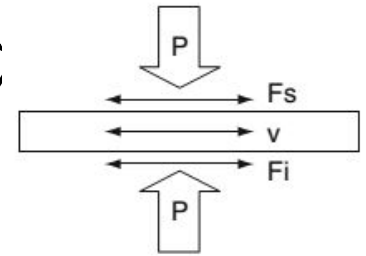
# МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА УЗ-СВАРКИ

Уравнение движения по верхней поверхности заготовки:

$$F_s(t) + F_i(t) = m a(t)$$

$F_s$  – сила трения между волноводом и заготовкой

$F_i$  – сила сдвига между заготовкой и подложкой.



$$F_i(t) = 2awd\rho a(t) - F_s(t)$$

Необходимая энергия одного цикла следовательно  
составляет

$$E_0 = \int_0^T F_i(t) \times v(t) dt$$

$T$  – период одного движения волновода (0,00005 с)

# ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

- Создание **сложных внутренних элементов** в металлических деталях.
- Производство **интеллектуальных структур**
- Управление структурой материала

