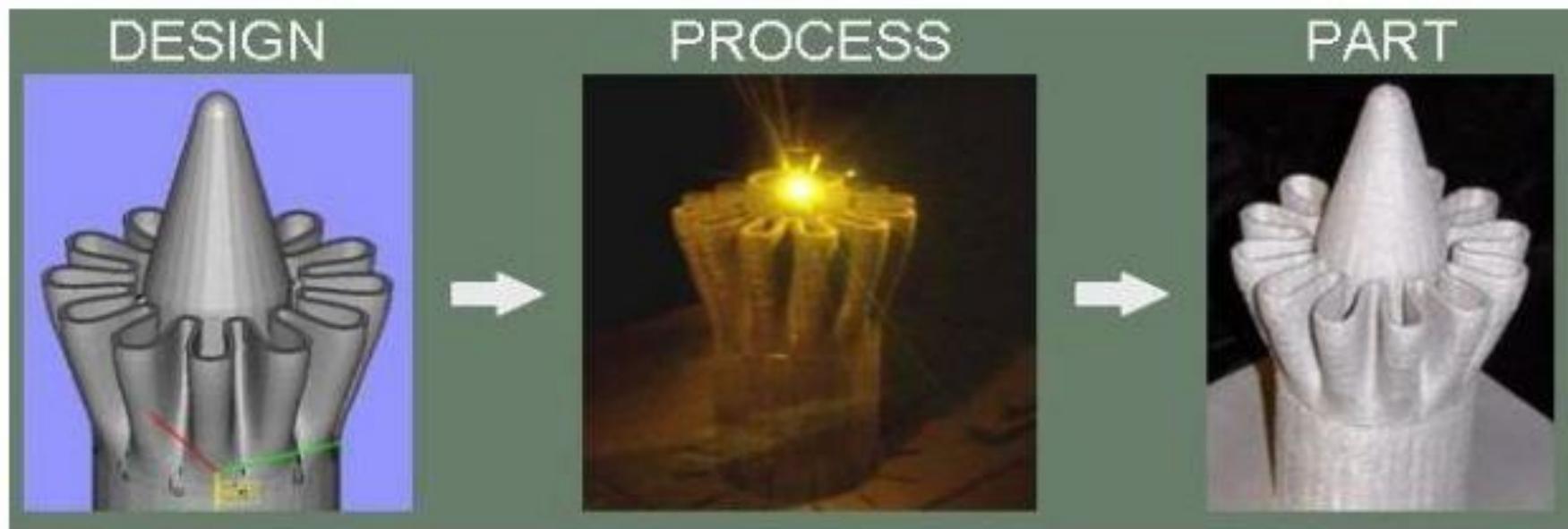
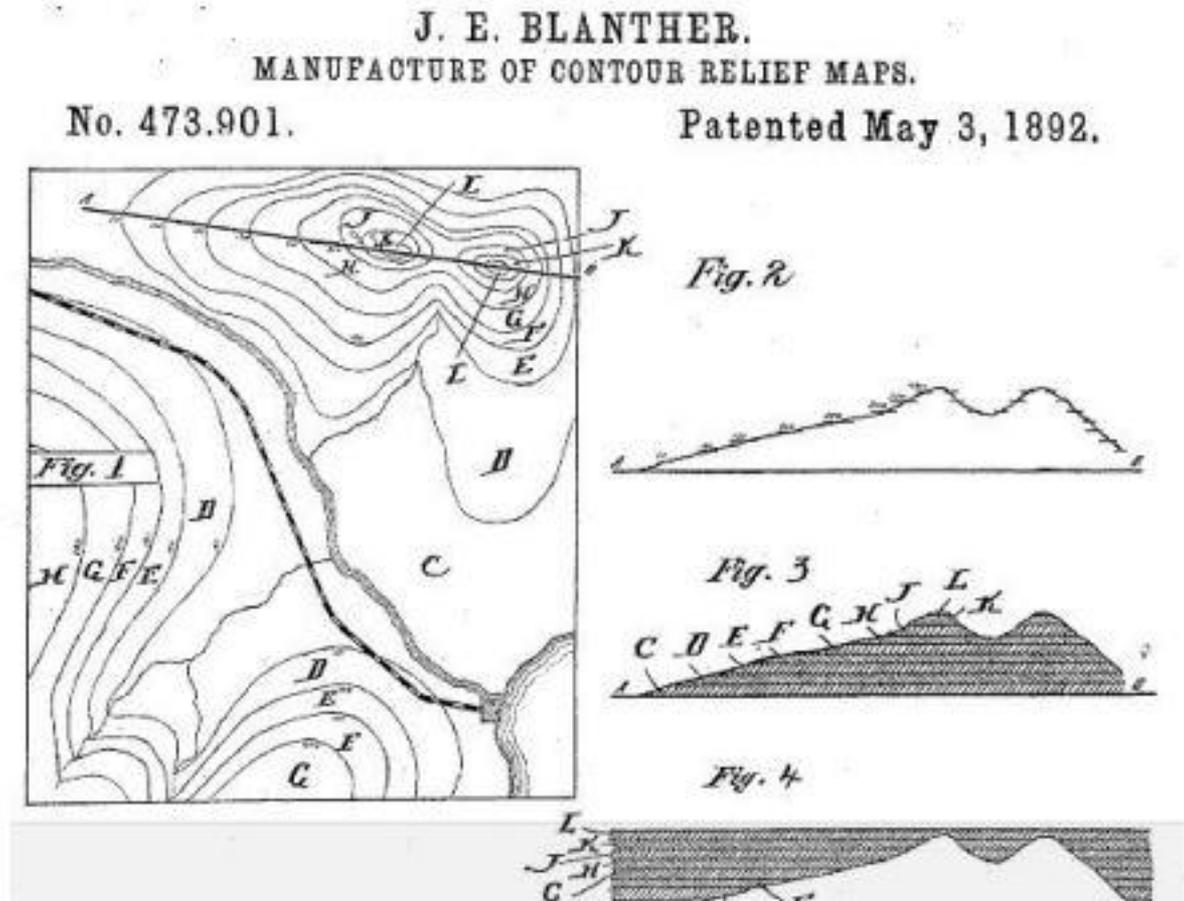


# Технологии аддитивного производства



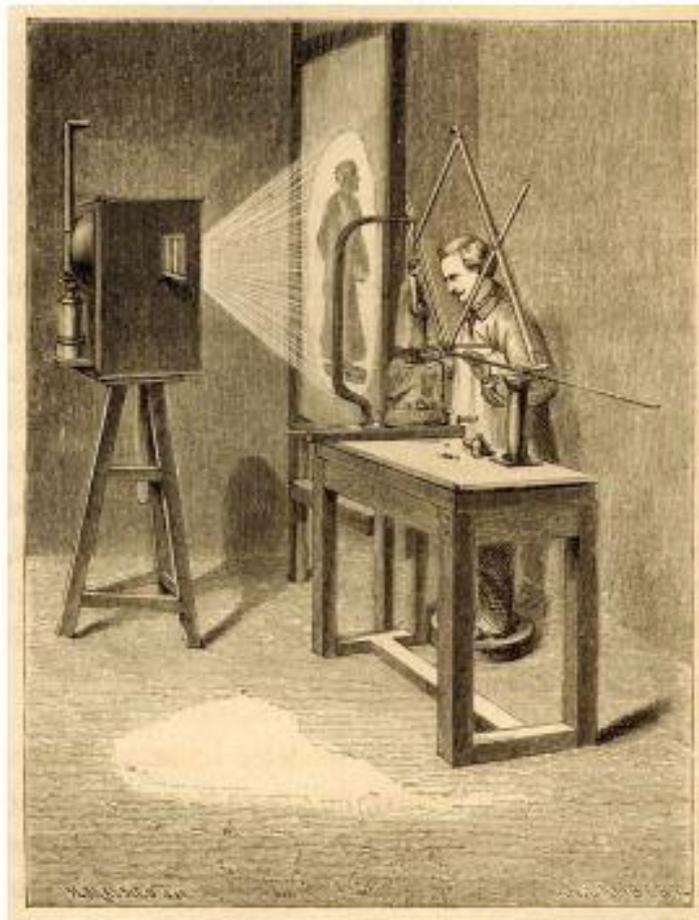
Исходная модель → Аддитивный процесс → Готовое изделие

# Технологии аддитивного производства



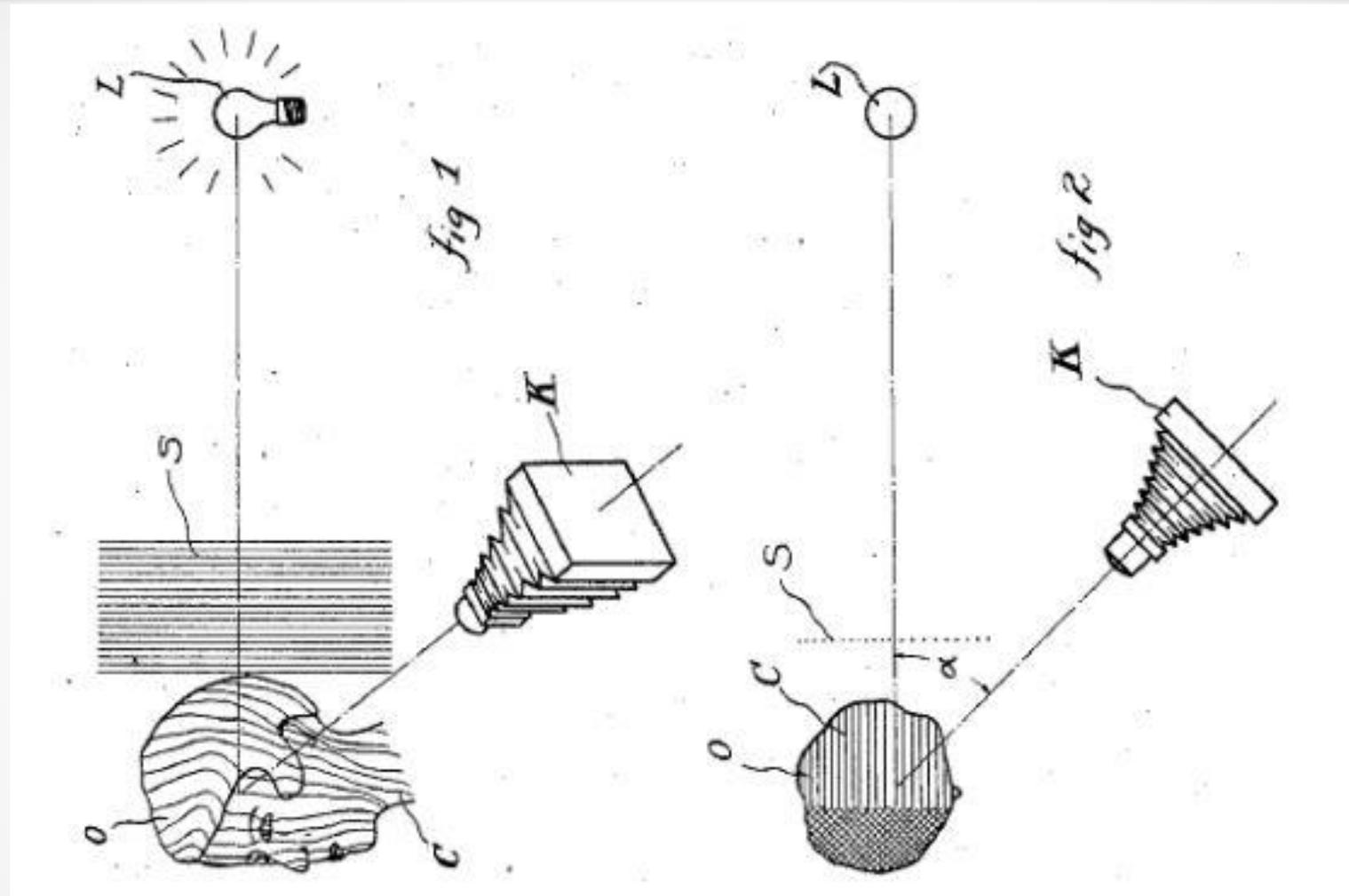
Способ изготовления топографических макетов трёхмерных карт поверхности местности

# Технологии аддитивного производства



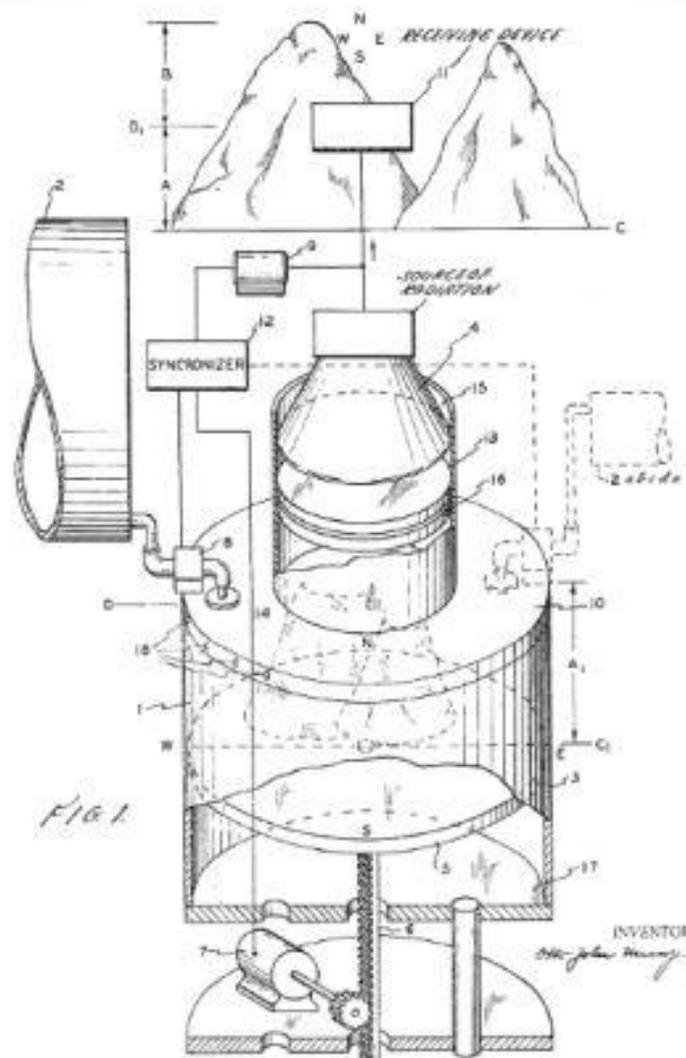
Фотоскульптура на основе  
одномоментного фотографирования

# Технологии аддитивного производства



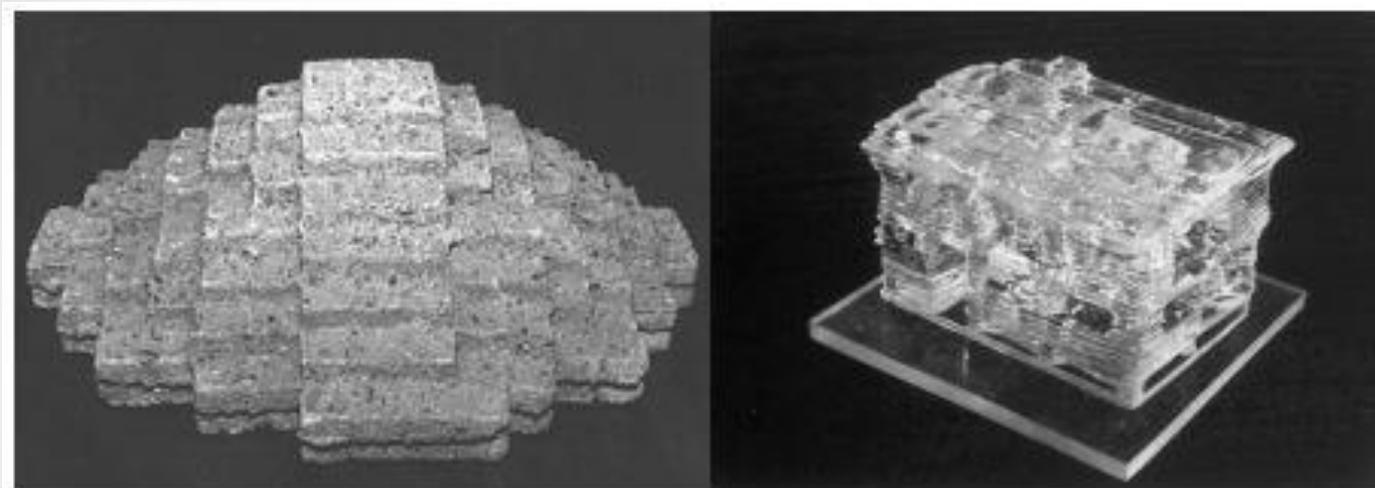
Способ создания рельефа с помощью фотографии

# Технологии аддитивного производства



Способ селективной (послойной) экспозиции прозрачной фотоэмульсии

# Технологии аддитивного производства

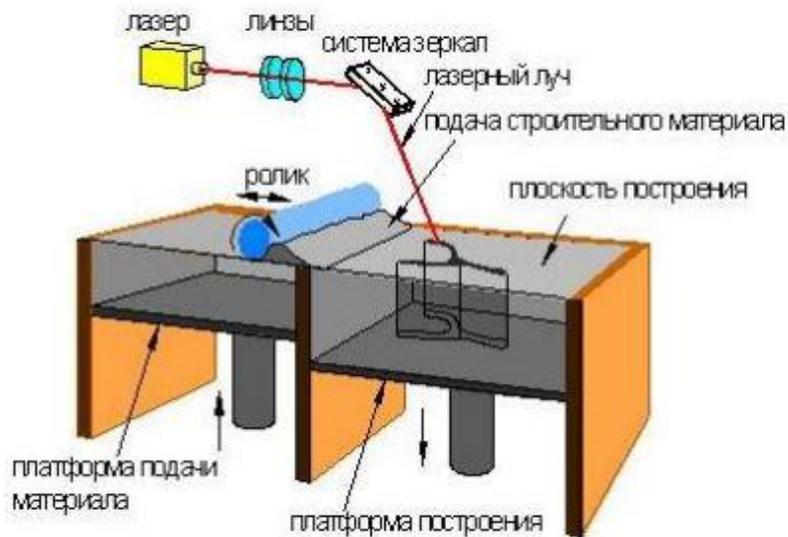


Образцы моделей из фотополимеров

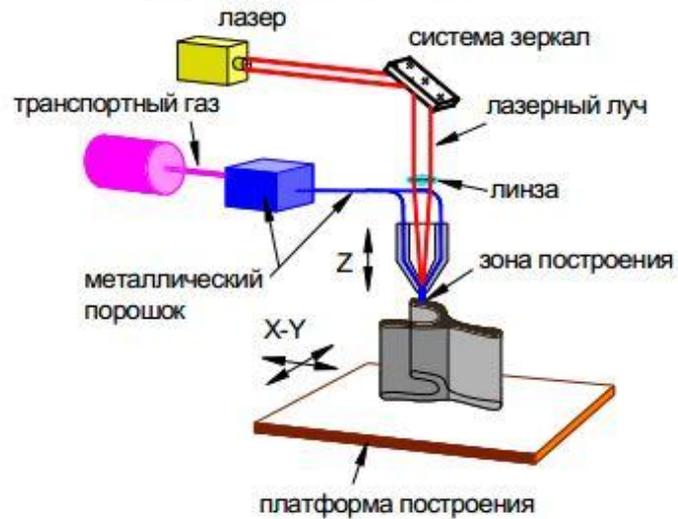
# Технологии аддитивного производства

## Аддитивные технологии

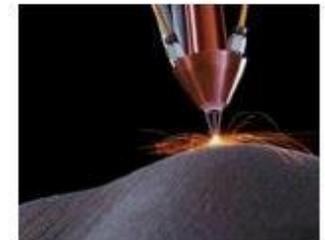
### Классификация: по методу формирования слоя



а – Bed Deposition



б – Direct Deposition



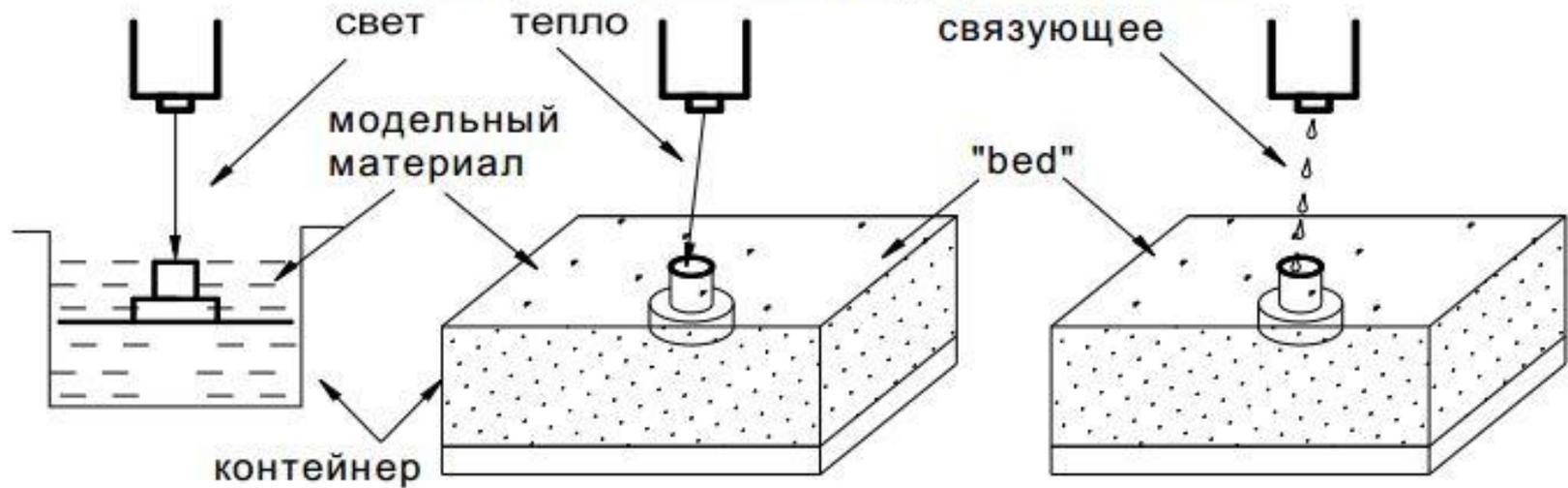
(Источник: [www.ipmd.net](http://www.ipmd.net))

Методы формирования слоя при построении модели

# Технологии аддитивного производства

## Аддитивные технологии

Классификация: по методу фиксации слоя



а – фотополимеризация

«свет»

б – сплавление

«тепло»

в – склеивание

«связующее»

Методы фиксации (отверждения) материала  
в слое при построении модели

# Технологии аддитивного производства

## Аддитивные технологии

Классификация: по типу строительных материалов

жидкие



### Фотополимеры

акриловые (эпоксидные)

сыпучие



### Полимеры

полиамид, полистирол  
PMMA (polymethyl methacrylate)

### Пески

кварцевые, циркониевые

### Металлопорошки

Al, Cu, Ti-Al, Ti, Ag, Au  
Co-Cr, Inconel, Ni-Fe  
инструментальные стали

нитевидные,  
прутковые



### Полимеры

ABS-подобные  
PU-подобные

### Металлы

(feedstock в виде  
прутка или  
проволоки)

листовые,  
плёночные



### Полимеры

ПВХ-плёнки

### Металлы

фольга  
листовой прокат

Строительные (модельные) материалы

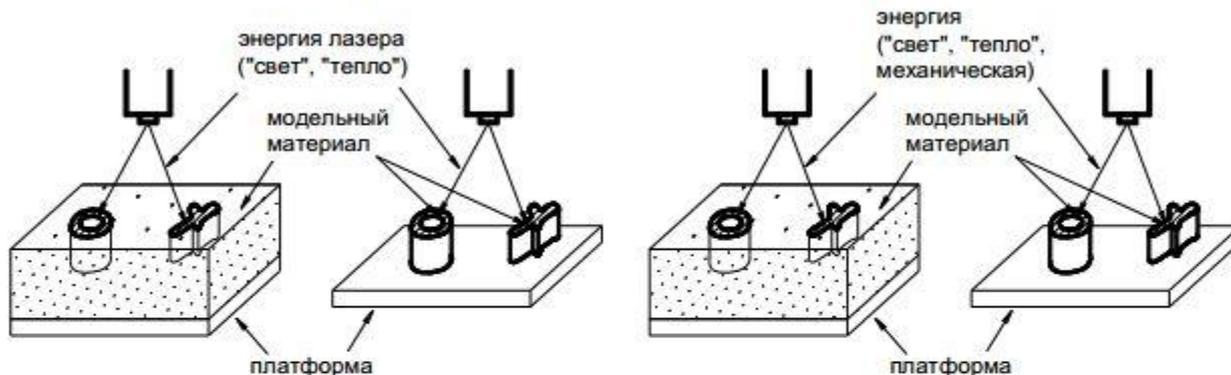
# Технологии аддитивного производства

## Аддитивные технологии

### Классификация: по ключевой технологии

#### лазерные

#### нелазерные



**а**

**б**

**в**

**г**

Bed Deposition

Direct Deposition

Bed Deposition

Direct Deposition

**а**

**б**

**в**

**г**

**жидкости**  
(SLA-технология)  
**сыпучие**  
(SLS-технология)  
**листовые**  
(LOM-технология)

**сыпучие**  
(LENS-, DMD-технология)  
**нитевидные**  
(металл. проволока);  
(Laser based wire-feed process)

**жидкости**  
(DLP-технология)  
**сыпучие**  
(Ink-Jet-технология)  
**Листовые**  
(LOM-технология)

**сыпучие**  
(Poly-Jet-, Ink-Jet-технология)  
**нитевидные**  
(FDM-технология)

Ключевые технологические процессы при построении модели

# Технологии аддитивного производства

По классификации ASTM в версии 2012 г. аддитивные технологии разделены на 7 категорий:

**1. Material Extrusion** – «выдавливание материала» или послойное нанесение расплавленного строительного материала через экструдер;

**2. Material Jetting** – «разбрызгивание (строительного) материала» или послойное струйное нанесение строительного материала;

**3. Binder Jetting** – «разбрызгивание связующего» или послойное струйное нанесение связующего материала;

**4. Sheet Lamination** – «соединение листовых материалов» или послойное формирование изделия из листовых строительных материалов;

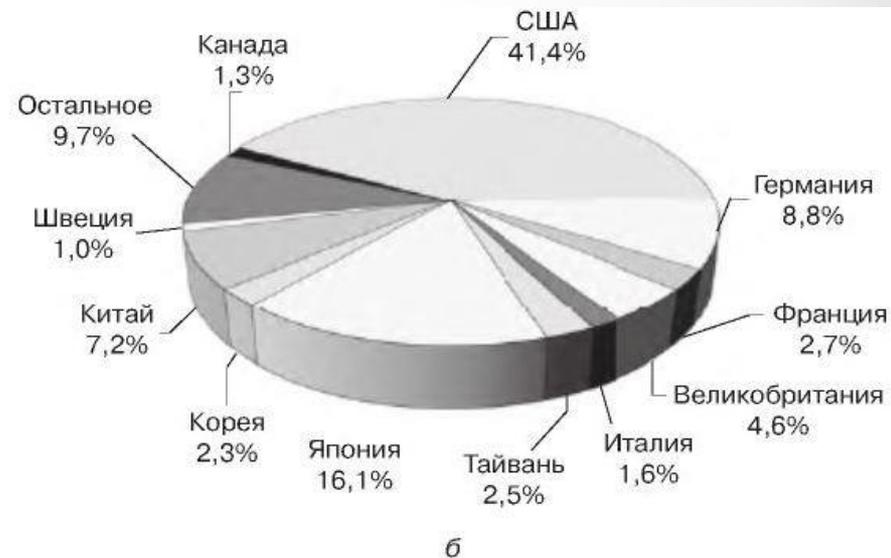
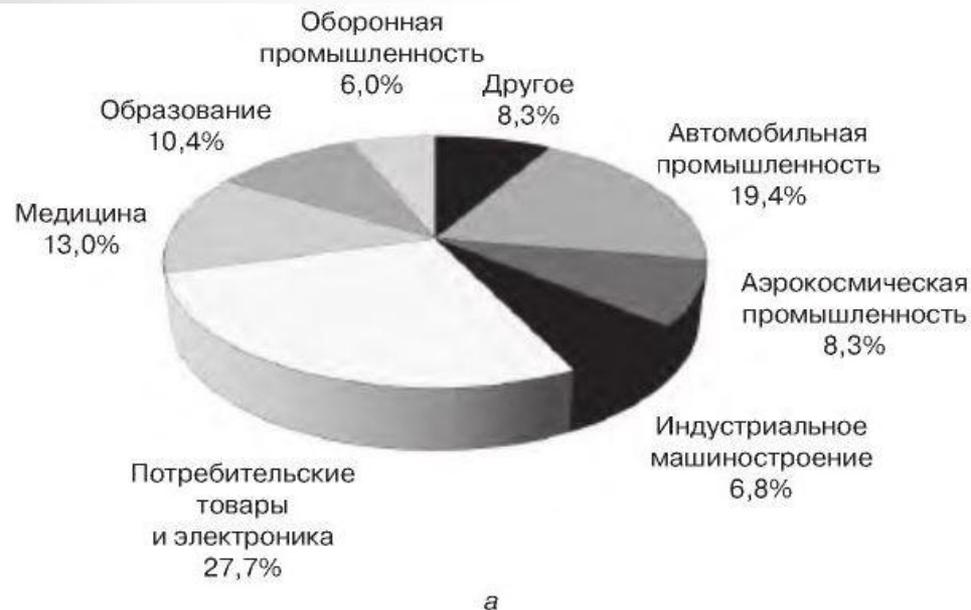
**5. Vat Photopolymerization** – «фотополимеризация в ванне» или послойное отверждение фотополимерных смол;

**6. Powder Bed Fusion** – «расплавление материала в заранее сформированном слое» или последовательное формирование слоев порошковых строительных материалов и выборочное (селективное) спекание частиц строительного материала;

**7. Directed energy deposition** – «прямой подвод энергии непосредственно в место построения» или послойное формирование изделия методом внесения строительного материала непосредственно в место подвода энергии.

Классификация аддитивных технологий

# Технологии аддитивного производства



Основные направления применения аддитивных технологий:

а - по отраслям;

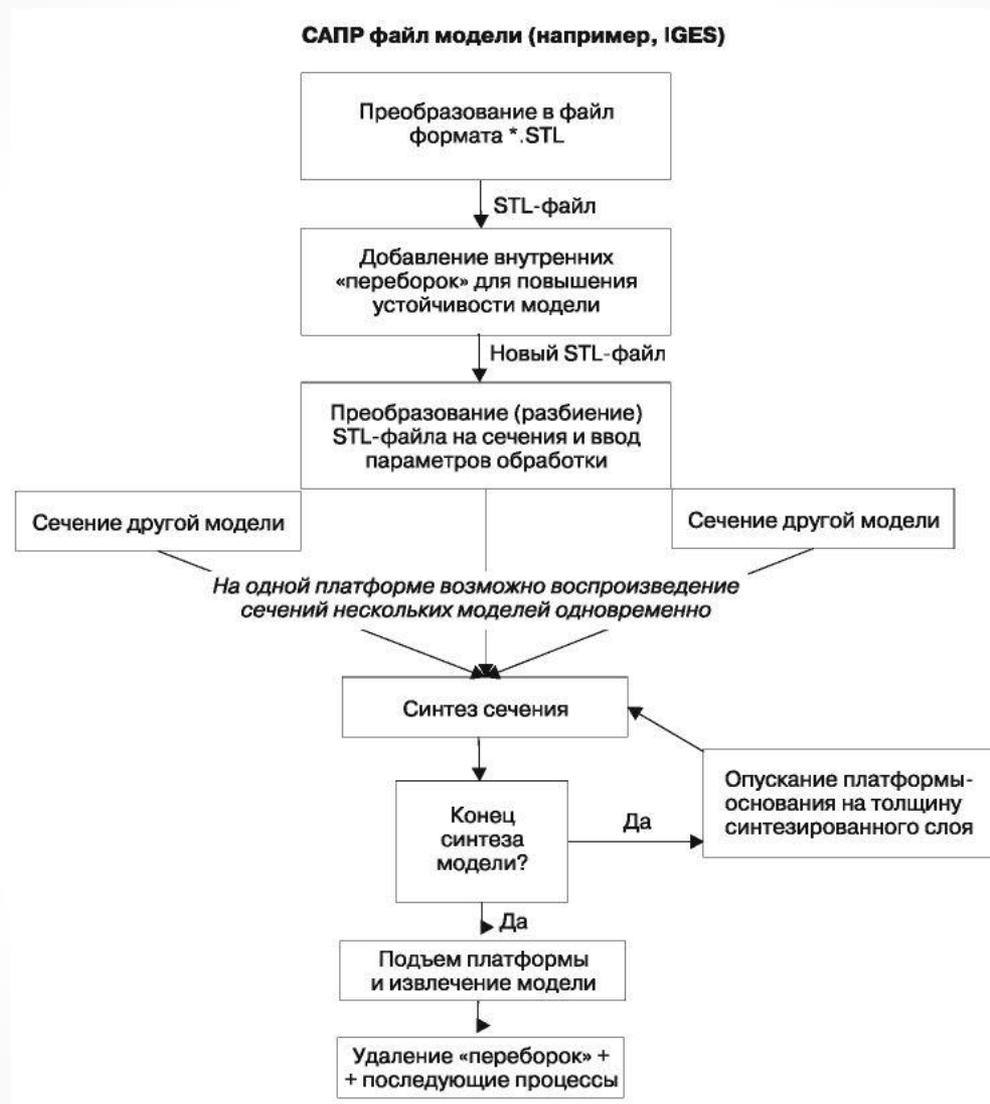
б - по странам.

# Технологии аддитивного производства



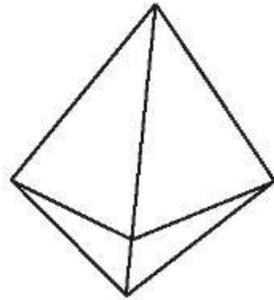
Задачи, решаемые аддитивными технологиями

# Технологии аддитивного производства

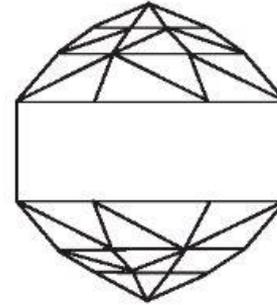


- Блок-схема управляющей программы обработки с STL-файлом •

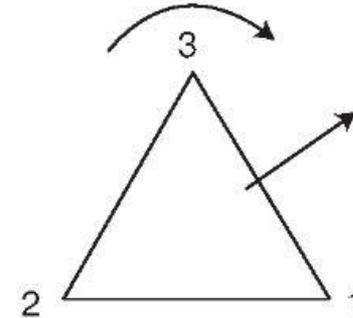
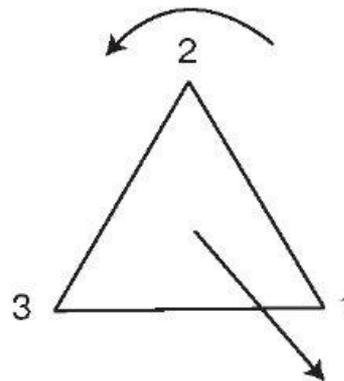
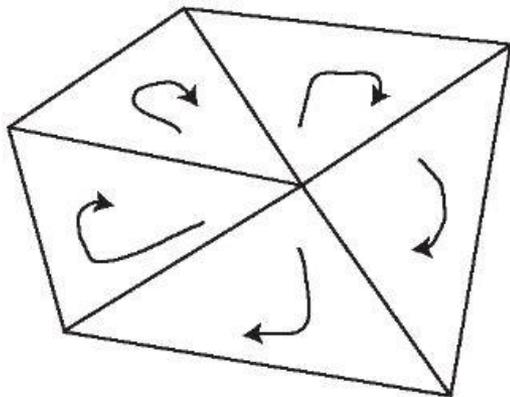
# Технологии аддитивного производства



Грубое сглаживание  
сферы

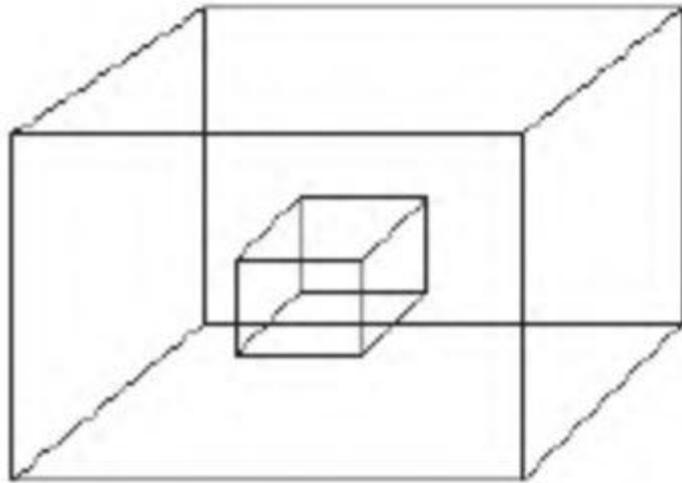


Тонкое сглаживание  
сферы

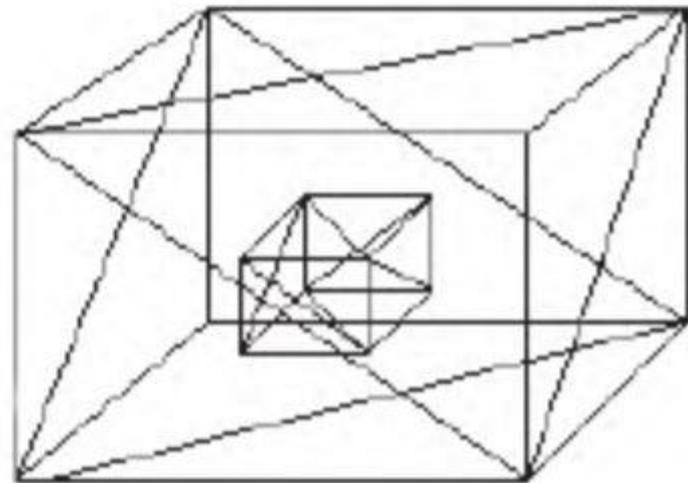


Триангуляция сферы, правила обхода вершин треугольников  
на поверхности 3D-объектов  
и направление нормали ячейки в формате STL

# Технологии аддитивного производства



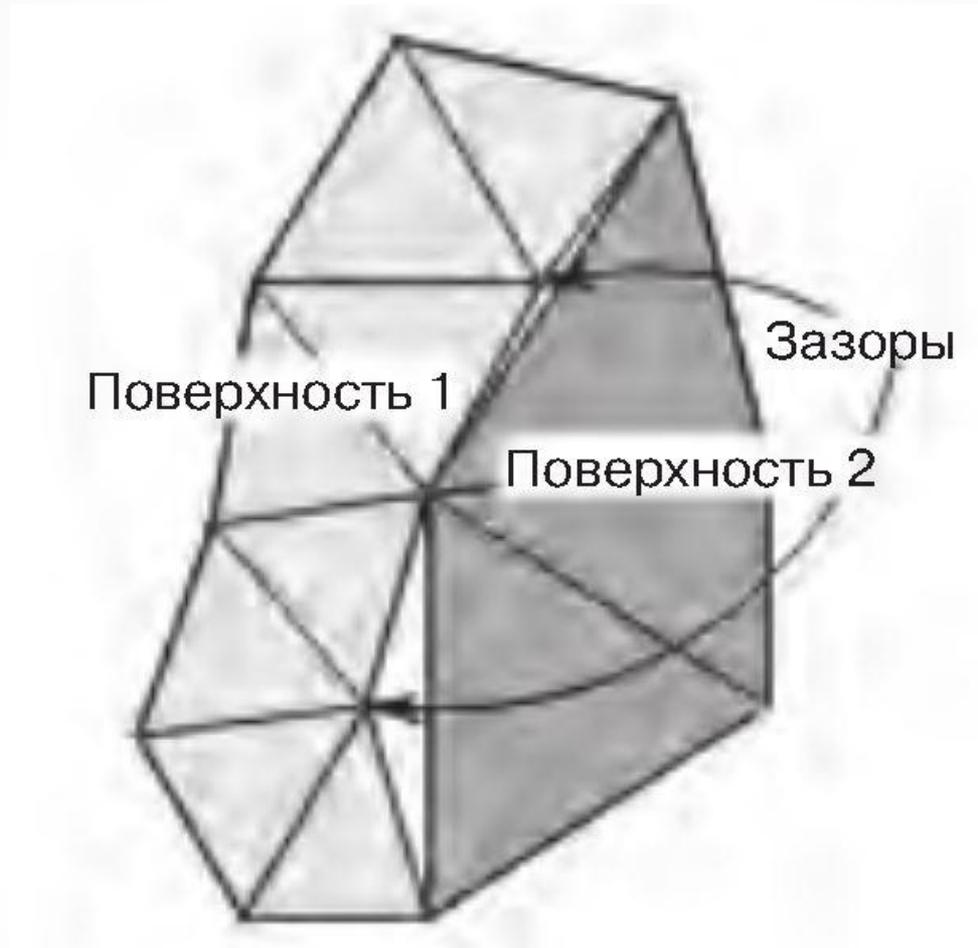
Пустотелый блок



STL триангуляция блока

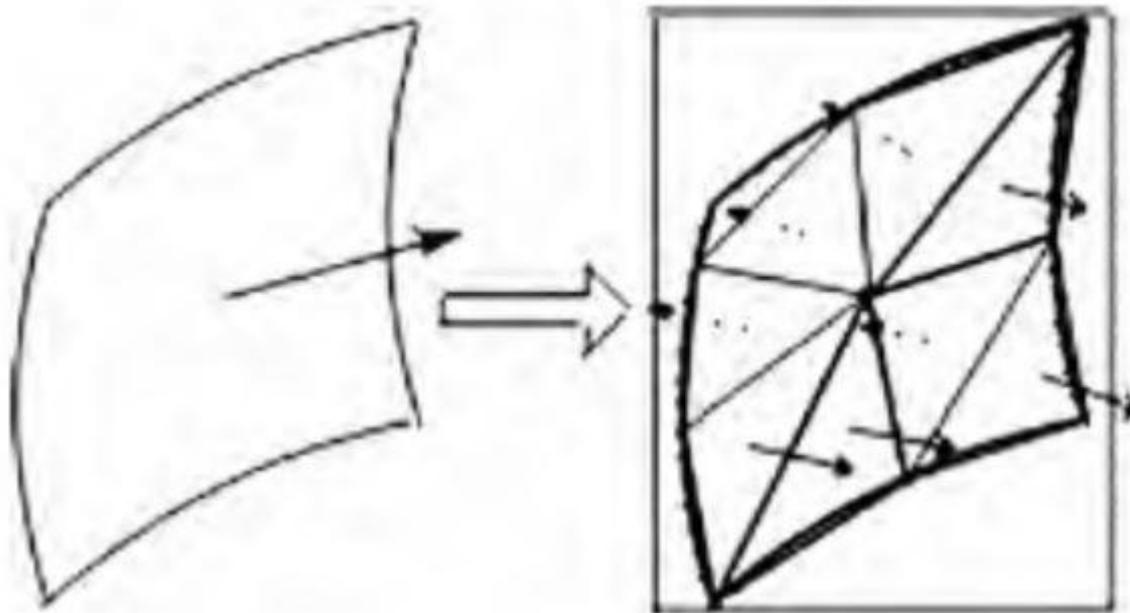
Метод поиска промежутков (пустоты) в объекте

# Технологии аддитивного производства



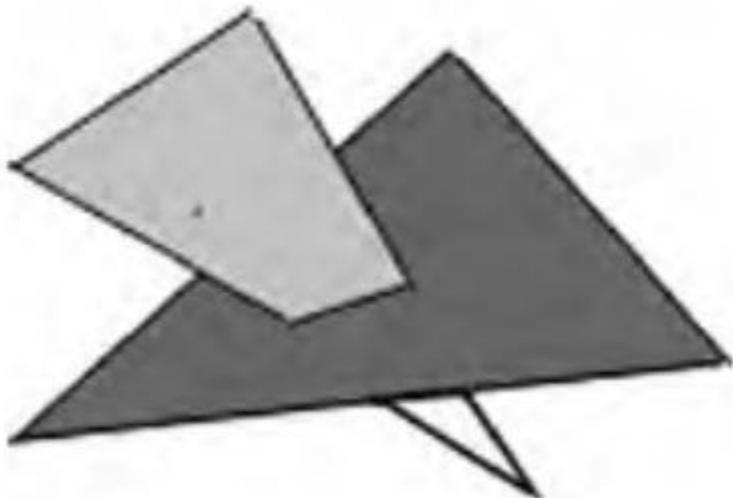
Зазоры в STL-файле (*отсутствие четкого различия между внутренней и внешней областями*)

# Технологии аддитивного производства

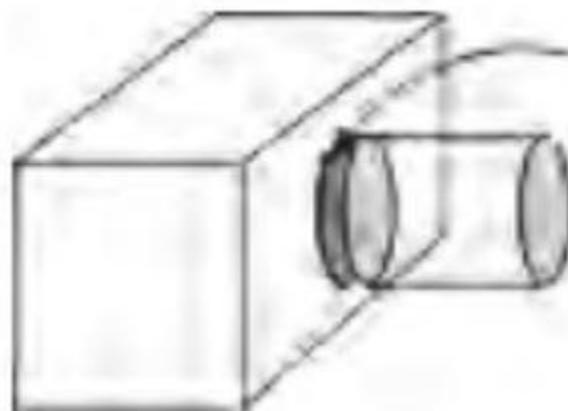


Обращенные нормали в ячейке  
(нормали не согласованы с направлением исходной поверхности)

# Технологии аддитивного производства



Пересечение двух треугольников  
не по сторонам  
(возникновение перекрывающихся  
ячеек)



Внутренняя стенка

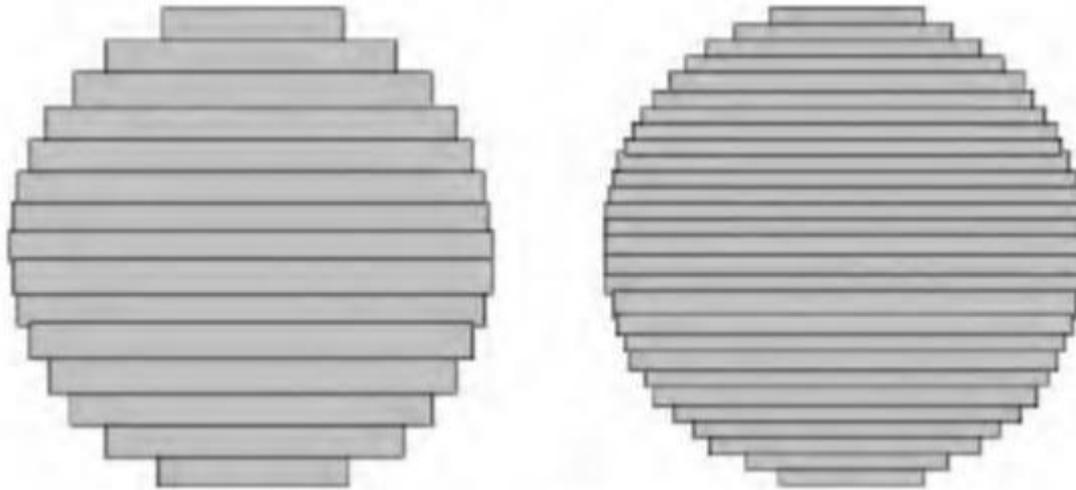
Ошибка STL-модели с  
появлением внутренней стенки  
(неоднородное затвердевание  
материала)

# Технологии аддитивного производства



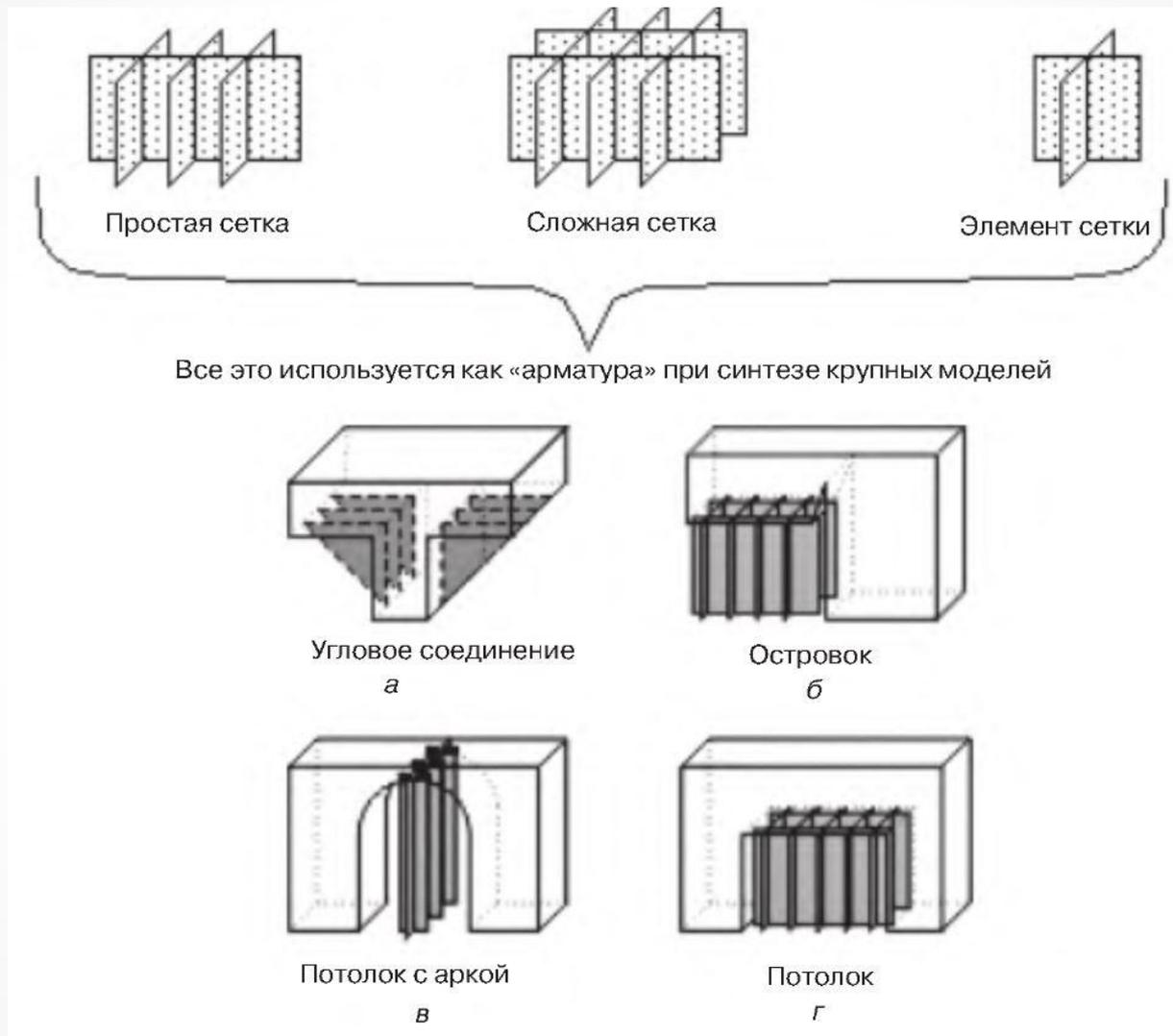
Оптимальные направления наращивания при прототипировании *(в соответствии с основными параметрами процесса)*

# Технологии аддитивного производства



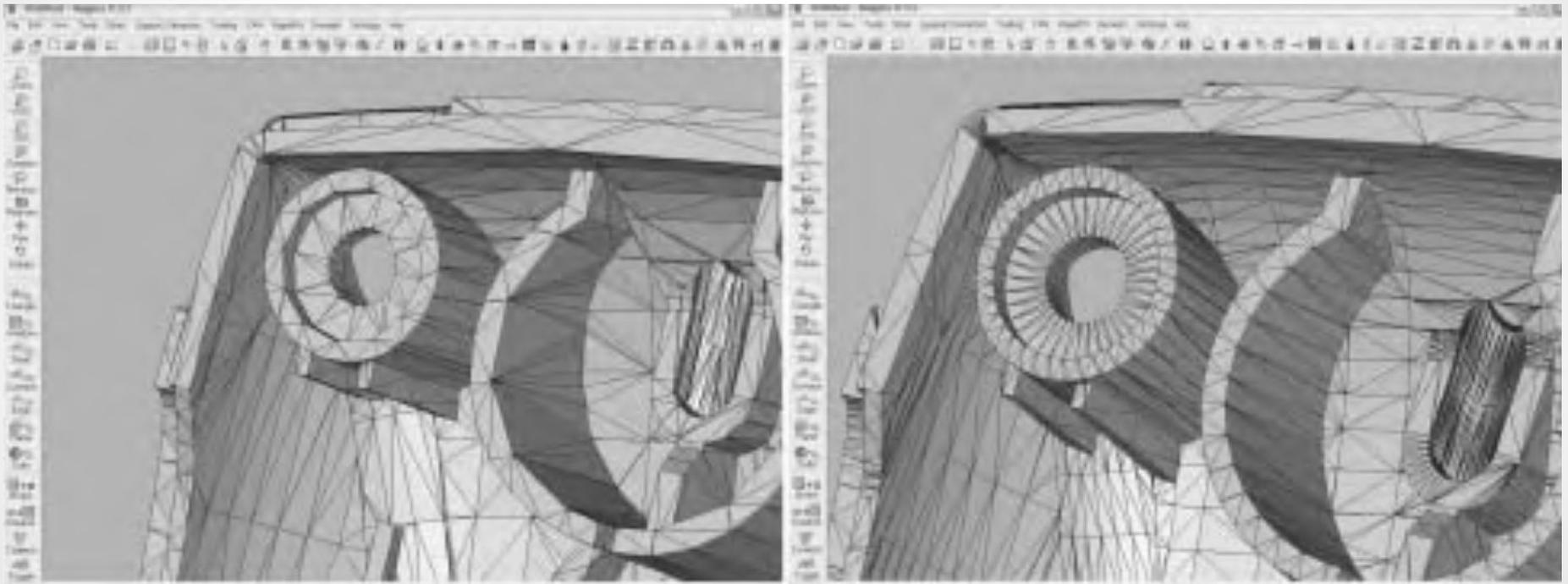
Ступенчатый вид кривой поверхности при прототипировании

# Технологии аддитивного производства



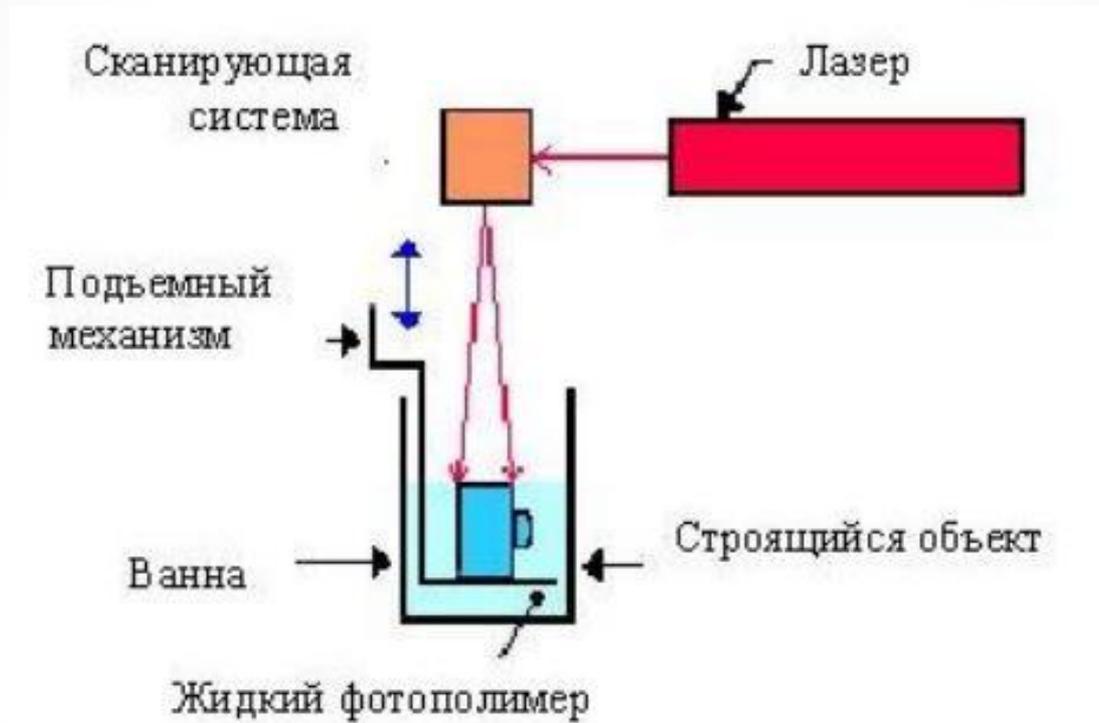
Примеры поддержек при прототипировании:  
*а* – клин; *б* – островок; *в*, *г* – потолок.

# Технологии аддитивного производства



Влияние выбора разрешения на детальность представления модели  
(слева – грубая установка, справа – точная установка)

# Технологии аддитивного производства

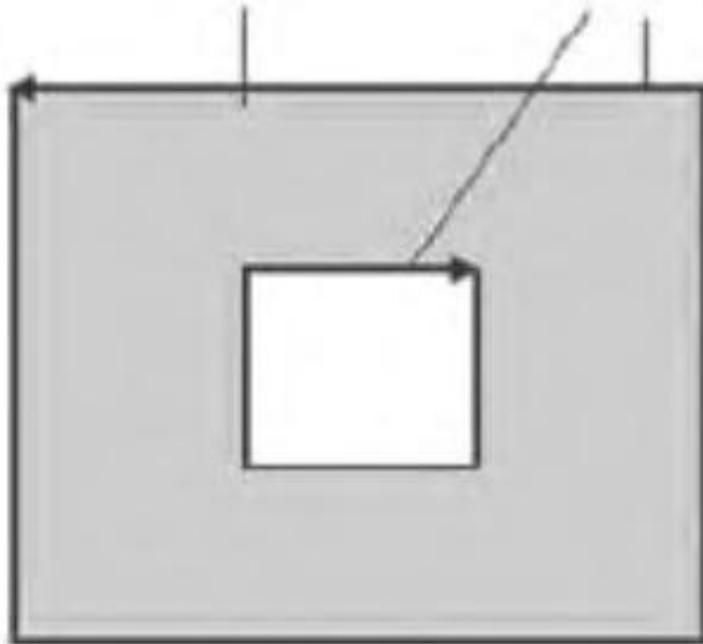


Технология лазерной стереолитографии с использованием жидких модельных материалов

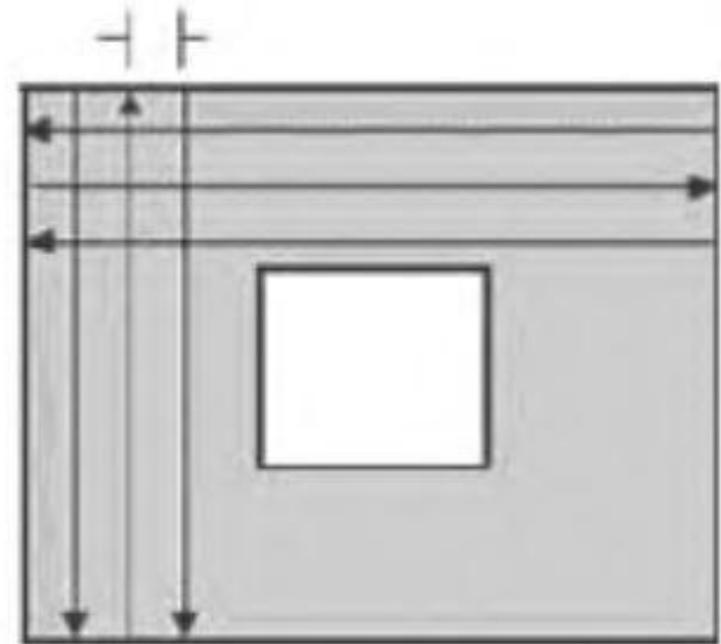
# Технологии аддитивного производства

slice area

contours

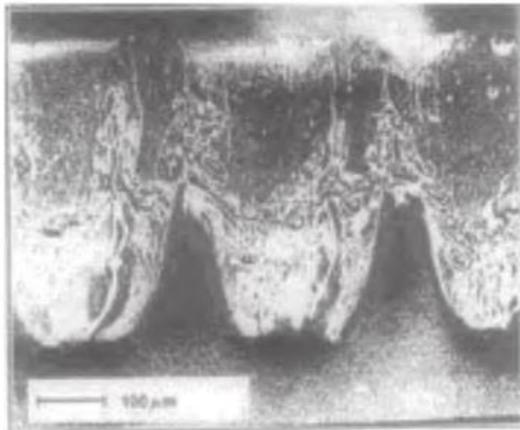


hatch spacing

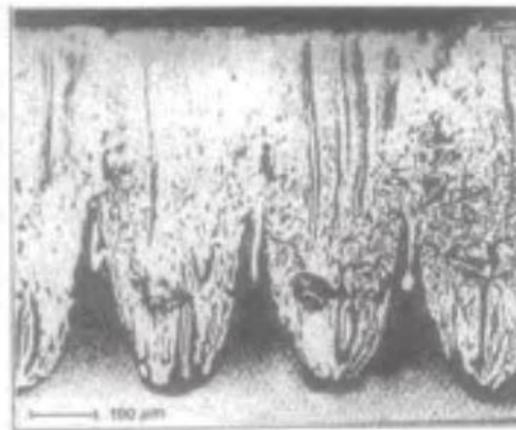


Методика обхода лазерного излучения при сканировании поверхности:  
*а – контур; б – штриховка.*

# Технологии аддитивного производства



а



б



в

Сечение микроструктуры одного отвержденного слоя после одного прохода лазерным излучением при:  
*а – 0%; б – 25%; в – 50% перекрытия линий прохода*

# Технологии аддитивного производства

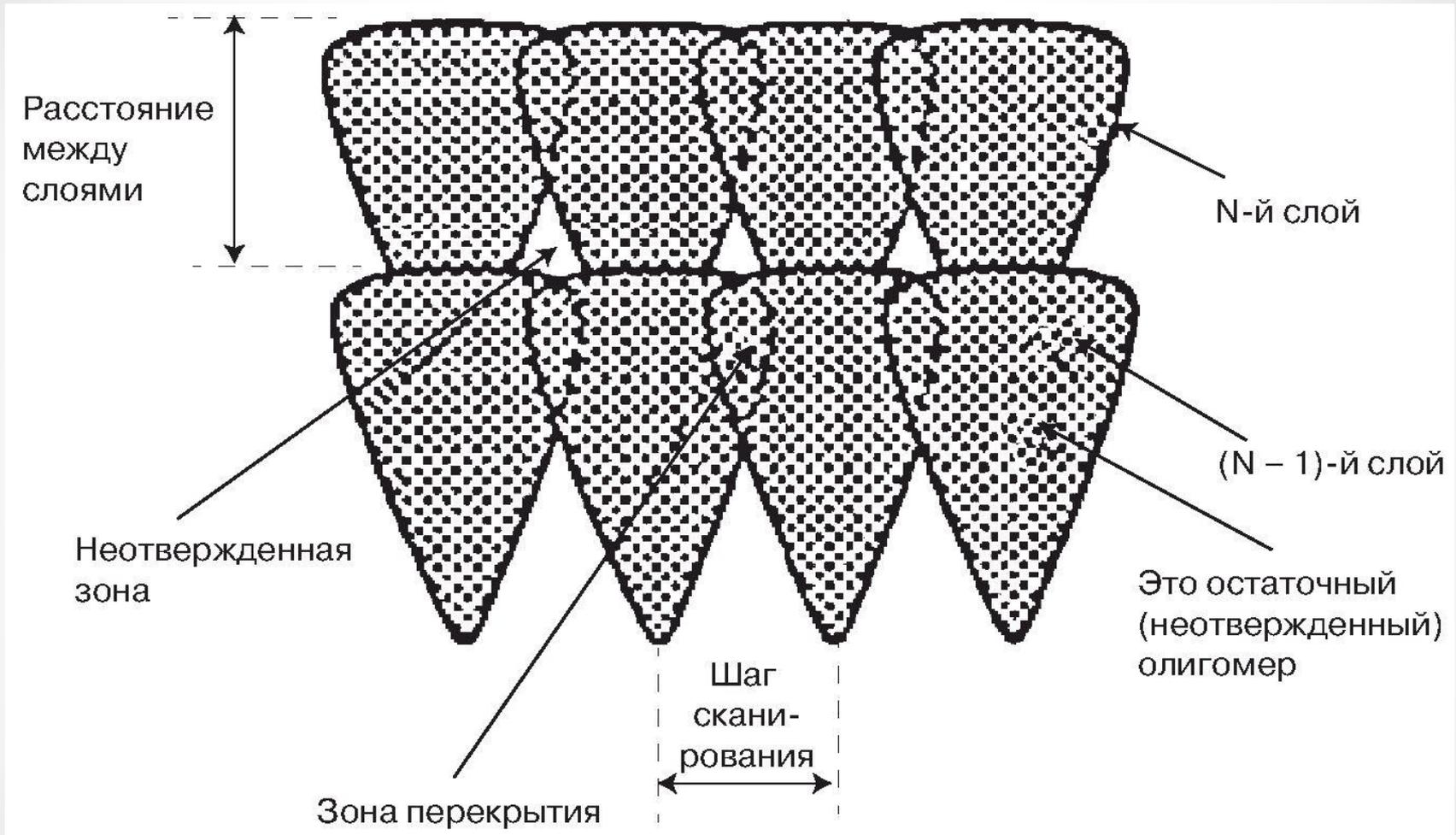


Схема организации многопроходной обработки при послойной полимеризации

# Технологии аддитивного производства

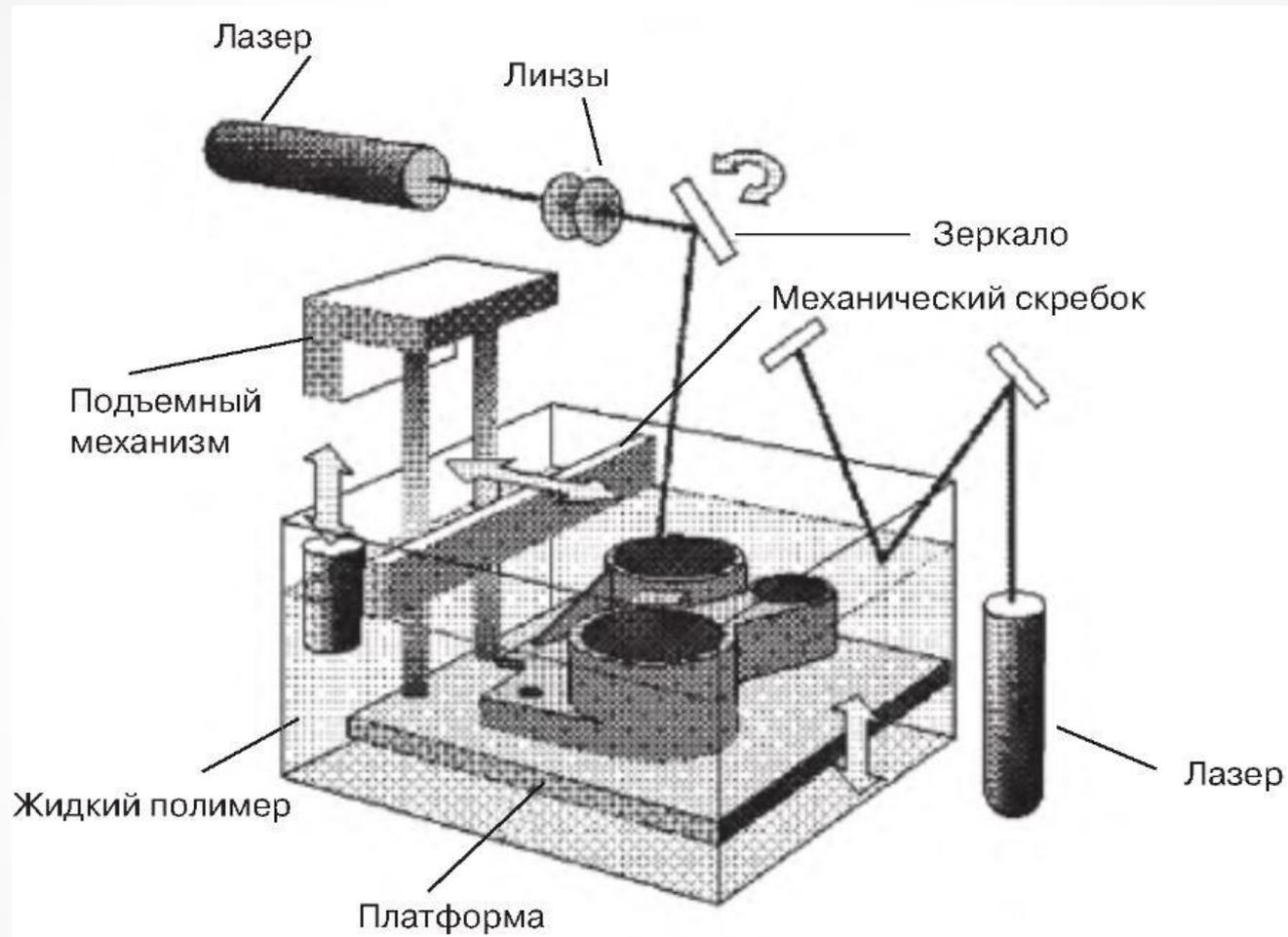
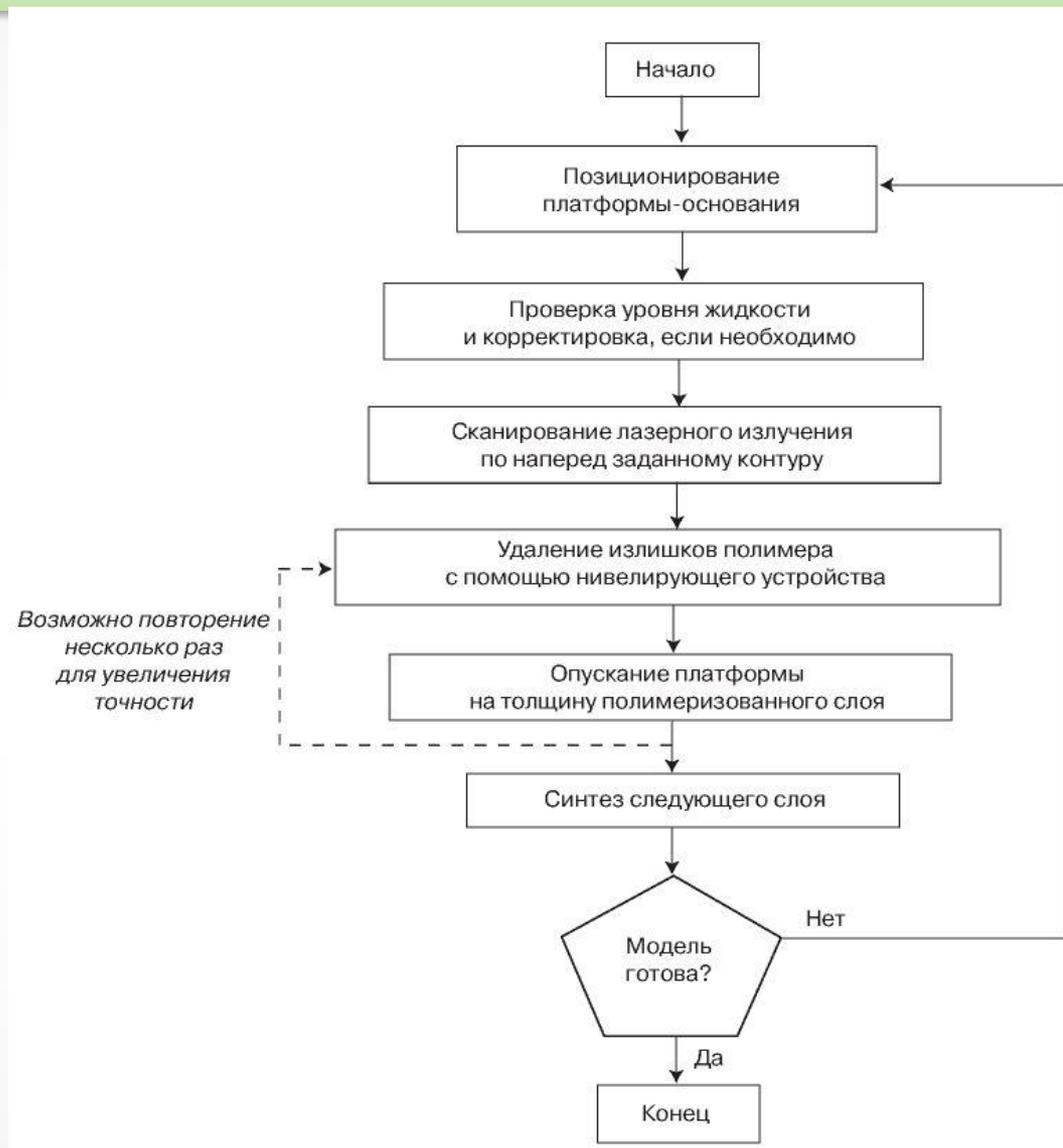


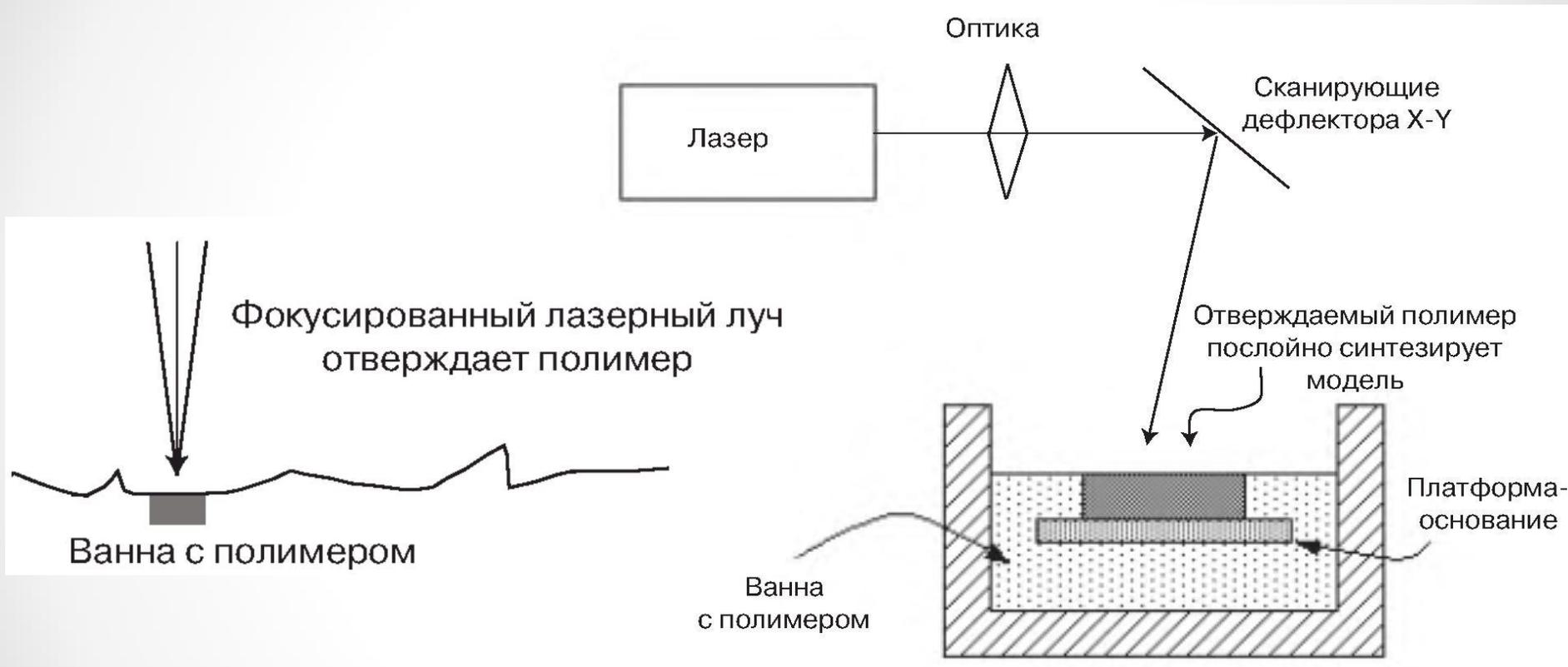
Схема установки для лазерной стереолитографии

# Технологии аддитивного производства



- Программная блок-схема процесса лазерной стереолитографии •

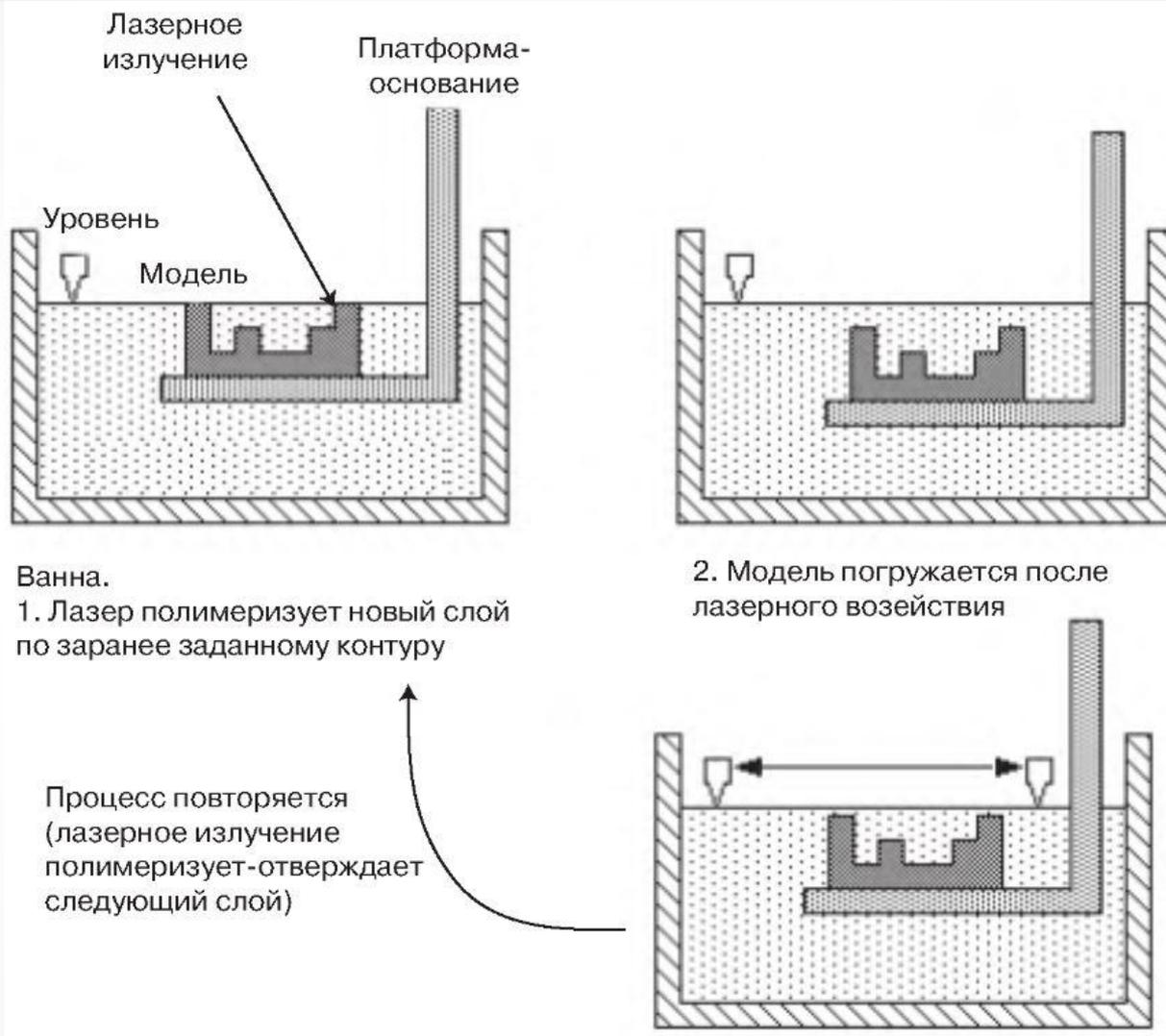
# Технологии аддитивного производства



Позиционирование  
лазерного излучения  
на поверхности полимера

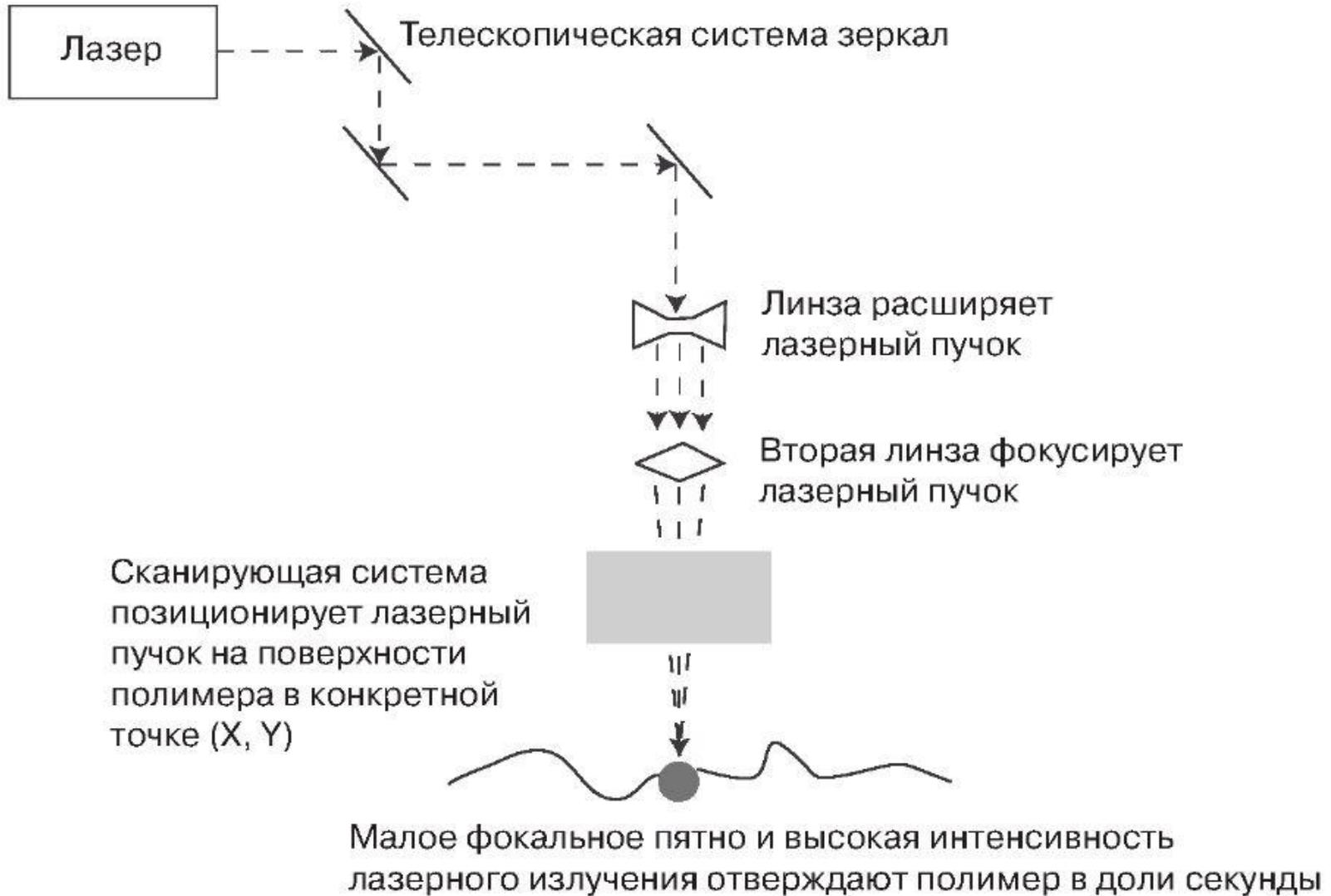
Синтез слоя

# Технологии аддитивного производства



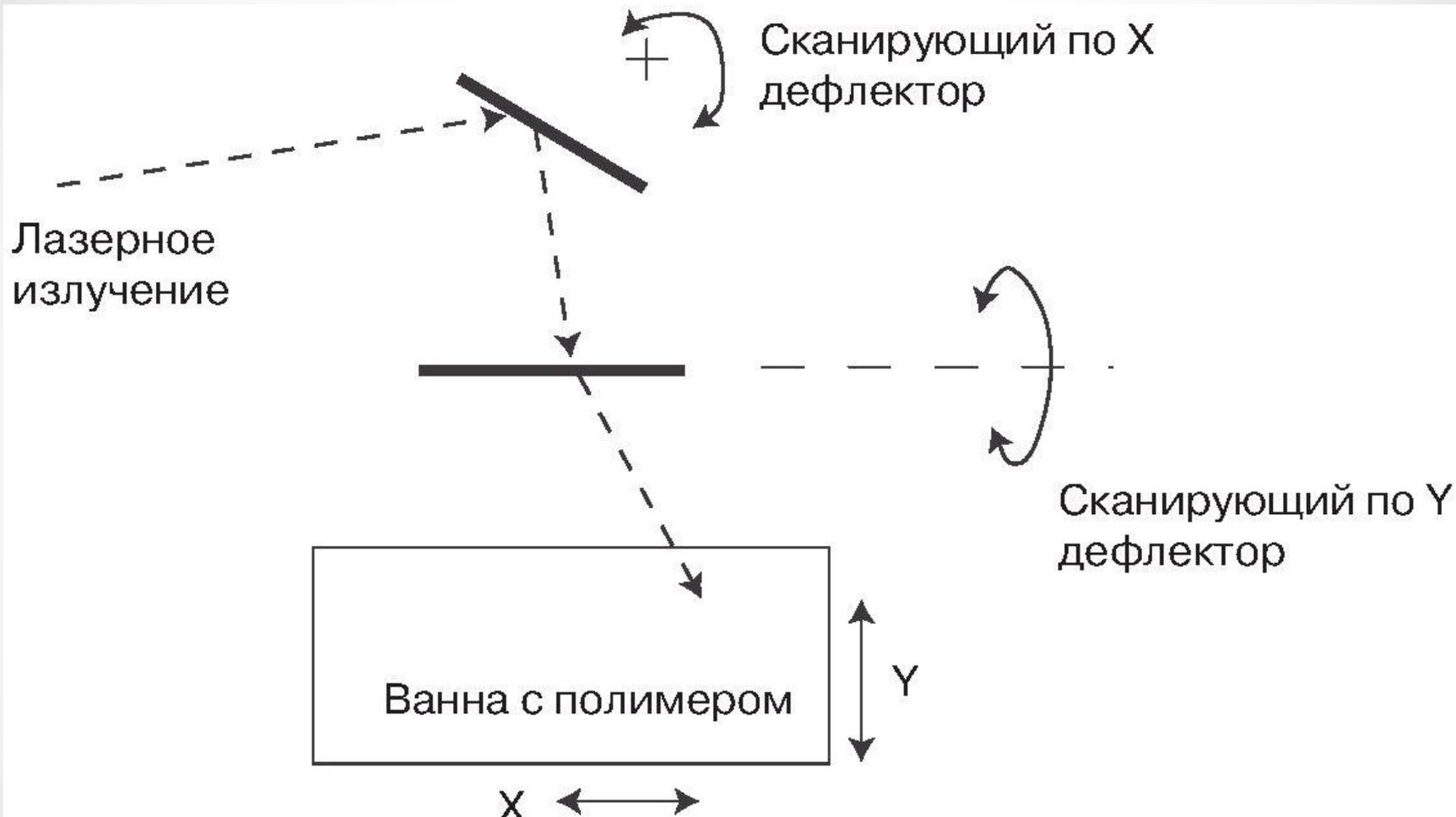
Шаги платформы за цикл синтеза

# Технологии аддитивного производства



Адаптивная система фокусировки

# Технологии аддитивного производства



Устройство сканирования лазерного излучения

# Технологии аддитивного производства

| Модель                        | SLA 250/30A   | SLA 250/50   | SLA 250/50HR  |
|-------------------------------|---|--|---|
| <i>Характеристики машины</i>  |   |  |   |
|                               | Система начального уровня. Экономичная и многоцелевая | Высокопроизводительная установка с более мощным лазером, изменяемым размером камеры, системой повторного покрытия Zephyr | Система с малым размером пятна ЛИ и высоким разрешением |
| <i>Объем камеры</i>           |   |  |   |
| Максимальный размер камеры    | 250 × 250 × 250 мм <sup>3</sup>                       | 250 × 250 × 250 мм <sup>3</sup>  | 250 × 250 × 250 мм <sup>3</sup>                         |
| <i>Объем</i>                  |   |  |   |
| Литры (галлоны)               | 29,4 (7,8)  | 32,2 (8,5)   | 32,2 (8,5)  |
| <i>Лазер</i>                  |   |  |   |
| Тип лазера                    | He-Cd   | He-Cd  | He-Cd   |
| Длина волны                   | 325   | 325 нм   | 325 нм  |
| Мощность лазера; время работы | 12 мВт; 2000 ч  | 25 мВт; 2000 ч   | 6 мВт; 2000 ч   |
| Гарантия                      | 2000 ч  | 2000 ч   | 2000 ч  |

Спецификация установок для лазерной стереолитографии (1)

# Технологии аддитивного производства

| Модель                        | SLA 3500   | SLA 5000                                | SLA 7000   | Viper si2   |
|-------------------------------|--|---|--|---|
| <i>Характеристики машин</i>   |  |   |  |   |
|                               | Среднего размера система в 2,5 раза быстрее SLA 250, обладает улучшенной производительностью, есть возможность автопополнения смолой и самоочистки | Система в три раза больше, чем SLA 3500 | Система в два раза больше SLA 5000, имеет возможность построения тонких слоев, обеспечивает высокое качество поверхности | Удвоенное разрешение, высокая мощность, долгий срок службы лазера |
| <i>Объем камеры</i>           |  |   |  |   |
| Максимальный размер камеры    | 350 × 350 × 400 мм <sup>3</sup>  | 508 × 508 × 584 мм <sup>3</sup>         | 508 × 508 × 600 мм <sup>3</sup>  | 250 × 250 × 250 мм <sup>3</sup>                                   |
| <i>Объем</i>                  |  |   |  |   |
| Литры (галлоны)               | 99,3 (25,6 )   | 253,6 (67)                              |  | 32,2 (8,5l)   |
| <i>Лазер</i>                  |  |   |  |   |
| Тип                           | Solid-State (Nd:YVO <sub>4</sub> )   |   |  |   |
| Длина волны                   | 354,7 нм   |   |  |   |
| Мощность лазера/ время работы | 160 мВт/5000 ч   | 216 мВт/5000 ч                          | 800 мВт/5000 ч   | 100 мВт/7500 ч  |
| Гарантия                      | 5000 ч   |   |  | 7500 ч  |

Спецификация установок для лазерной стереолитографии (2)

# Технологии аддитивного производства



Внешний вид установок для лазерной стереолитографии

# Технологии аддитивного производства

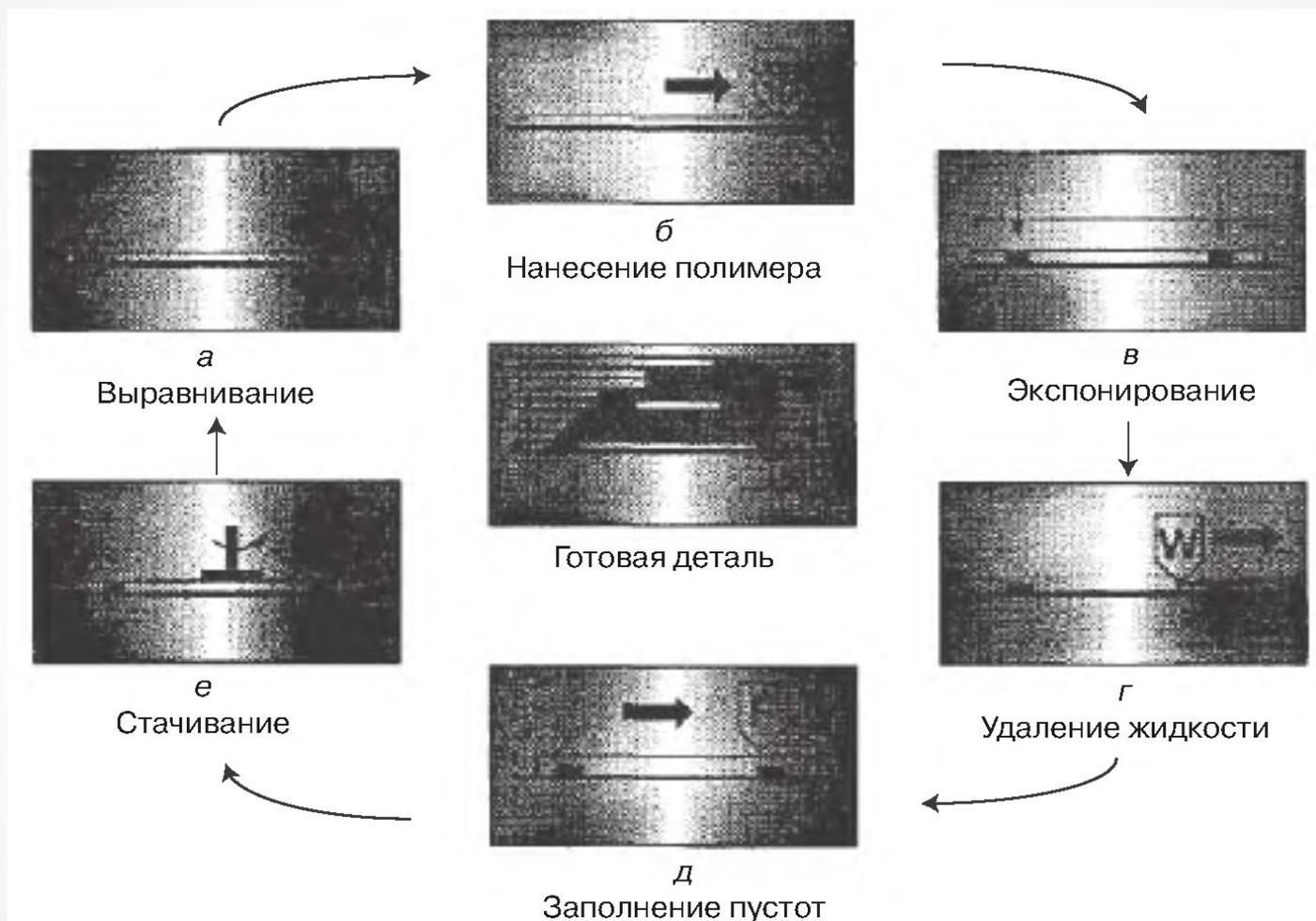
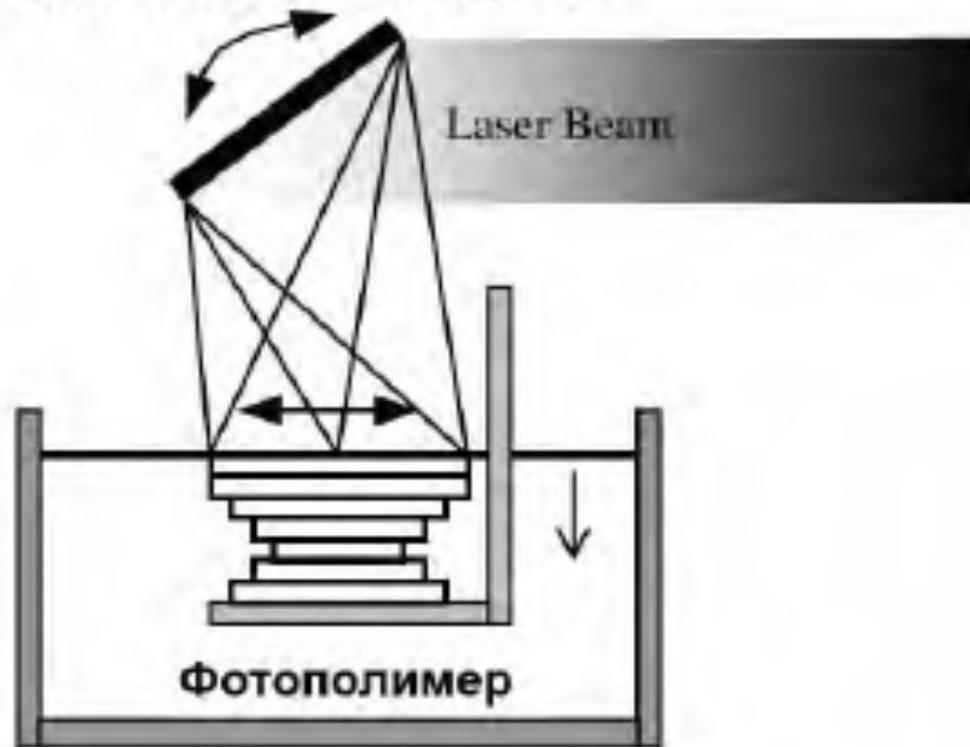


Схема процесса отверждения на твердом основании

# Технологии аддитивного производства



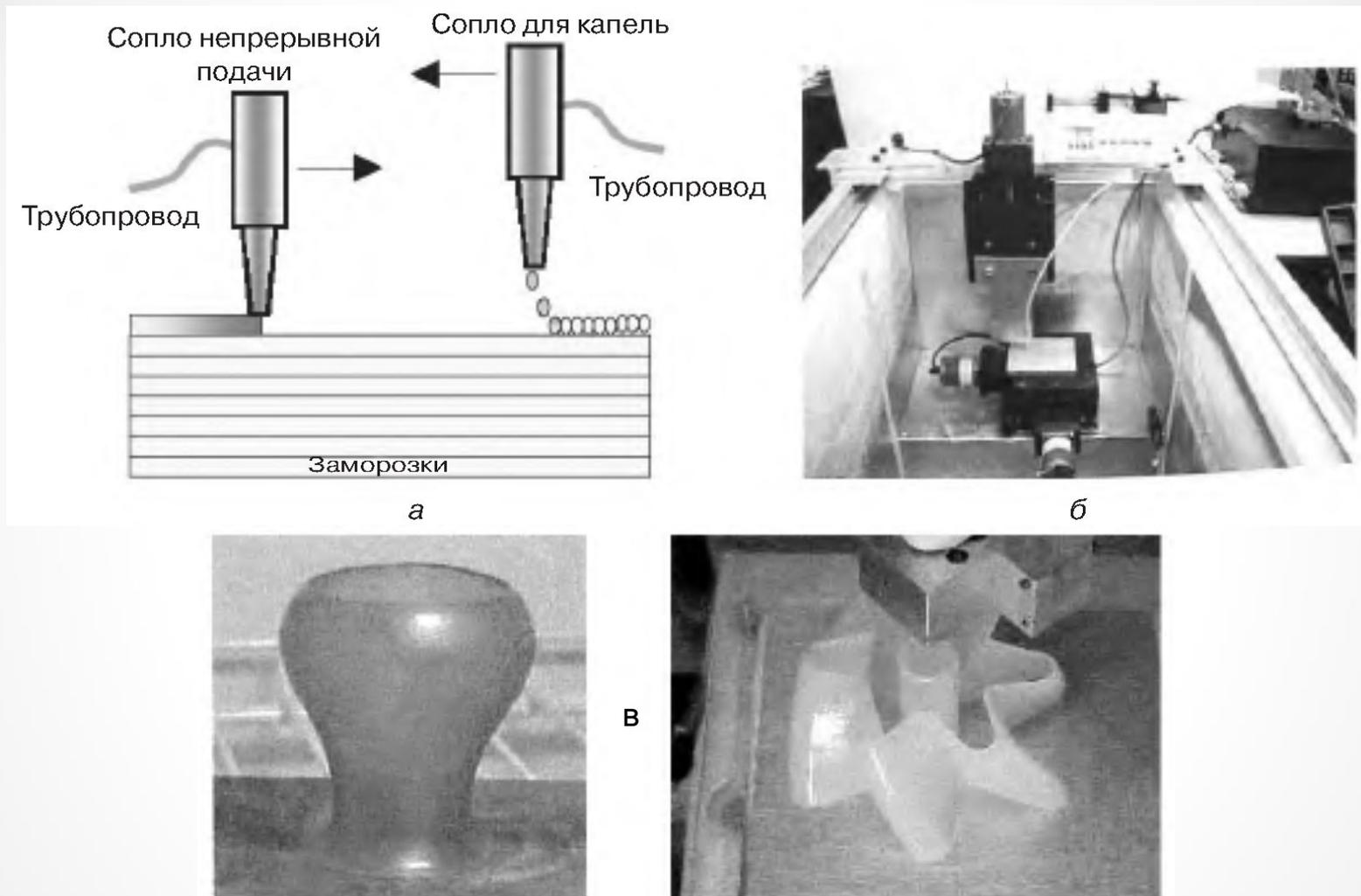
Гальвано система зеркал



Стереолитография с гальваномеханической системой позиционирования зеркал.

*Внешний вид установки и схема процесса*

# Технологии аддитивного производства



Изготовление изделий методом заморозки:

*а – схема процесса; б – установка;*

*в - примеры 3D-изделий, полученных методом заморозки*

# Технологии аддитивного производства

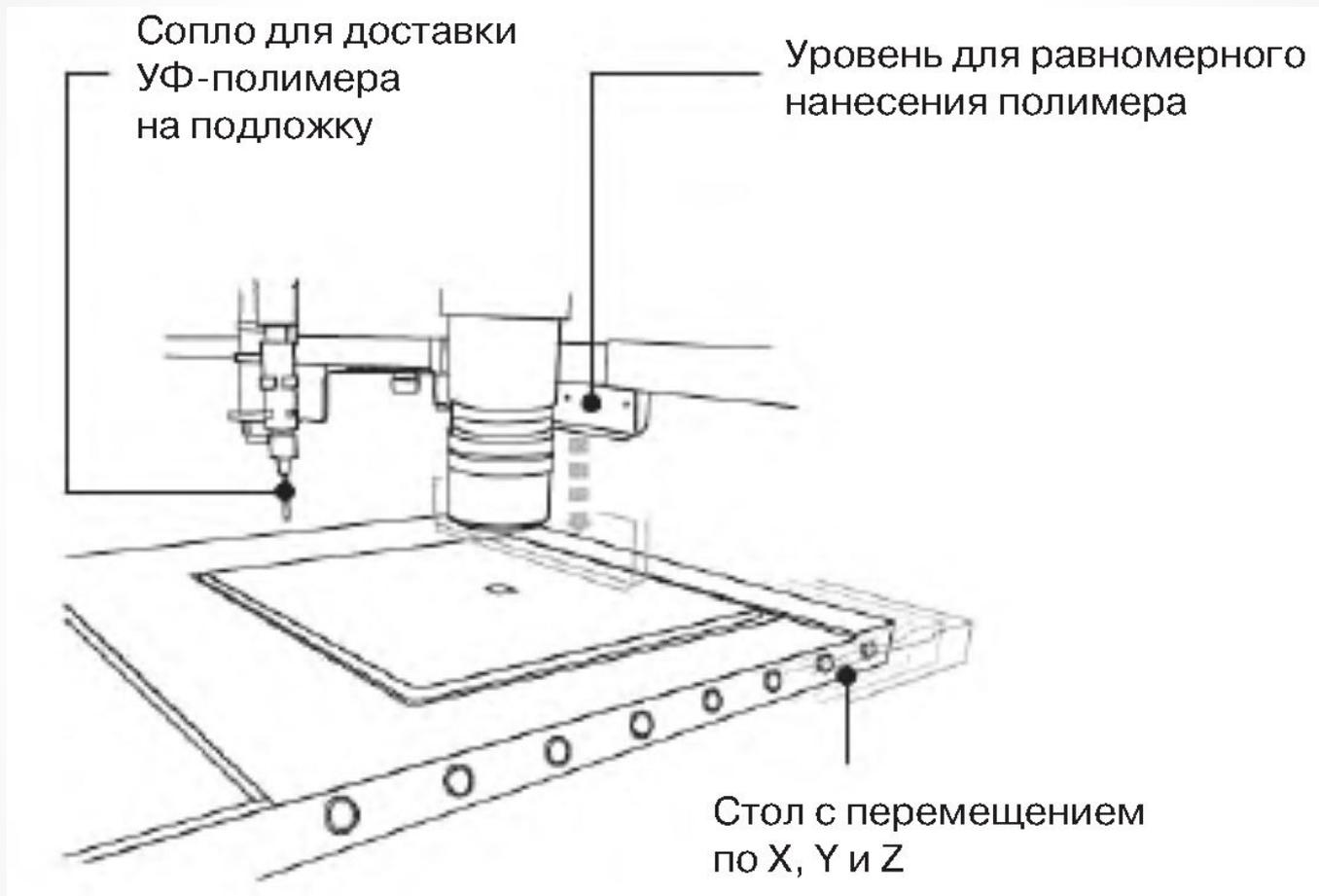
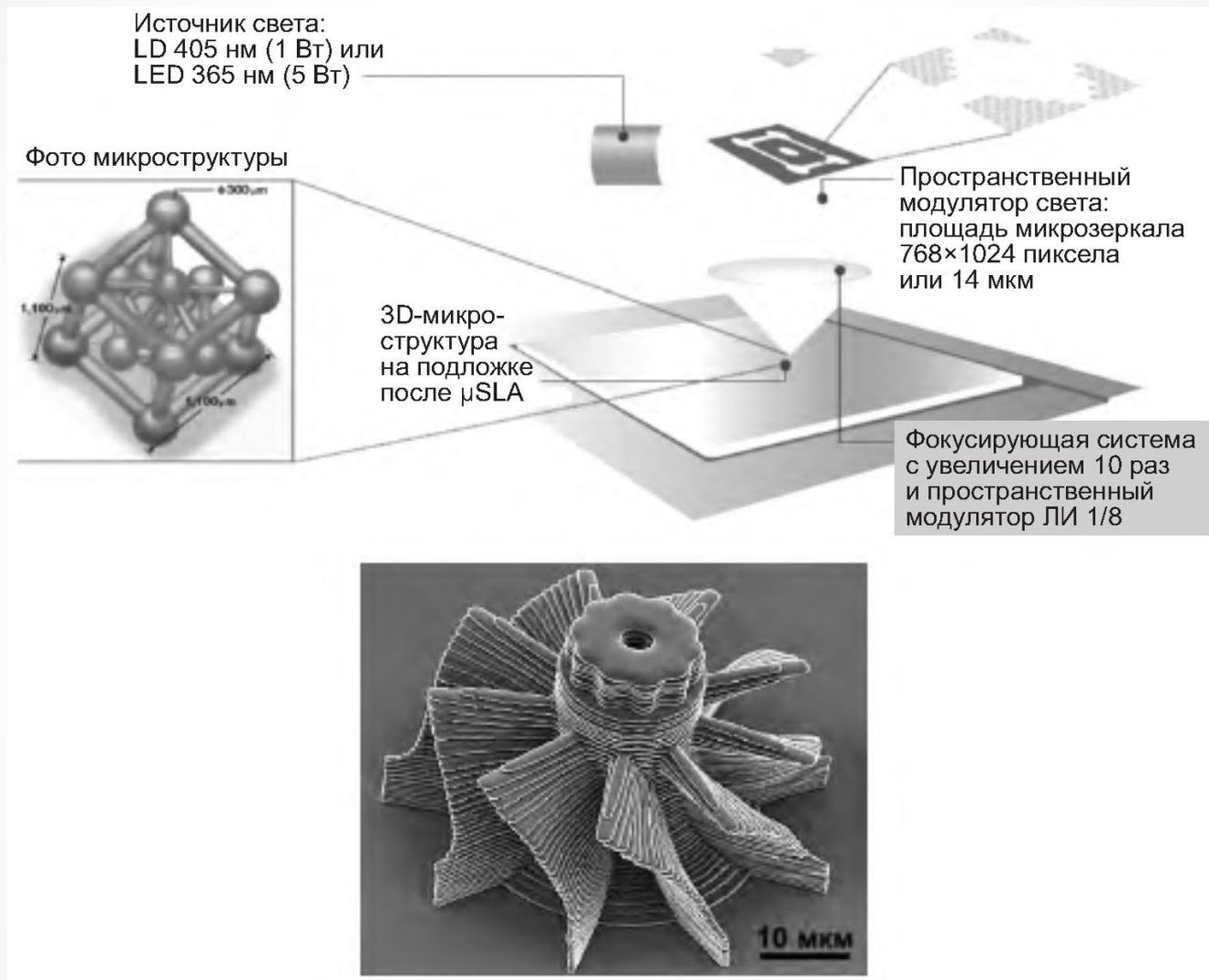


Схема установки для микростереолитографии

# Технологии аддитивного производства



Образование 3D-структур после микростереолитографии

# Технологии аддитивного производства

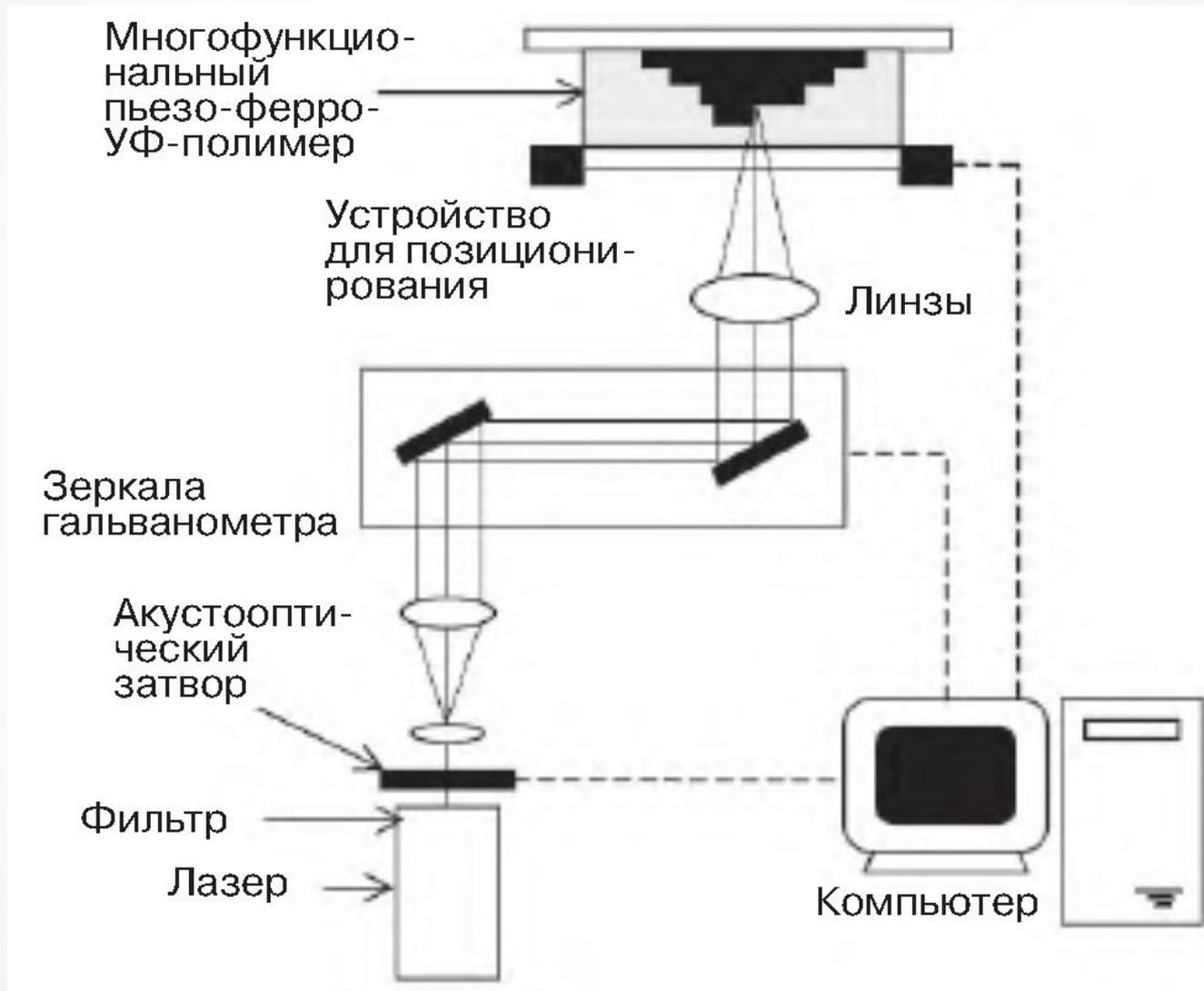
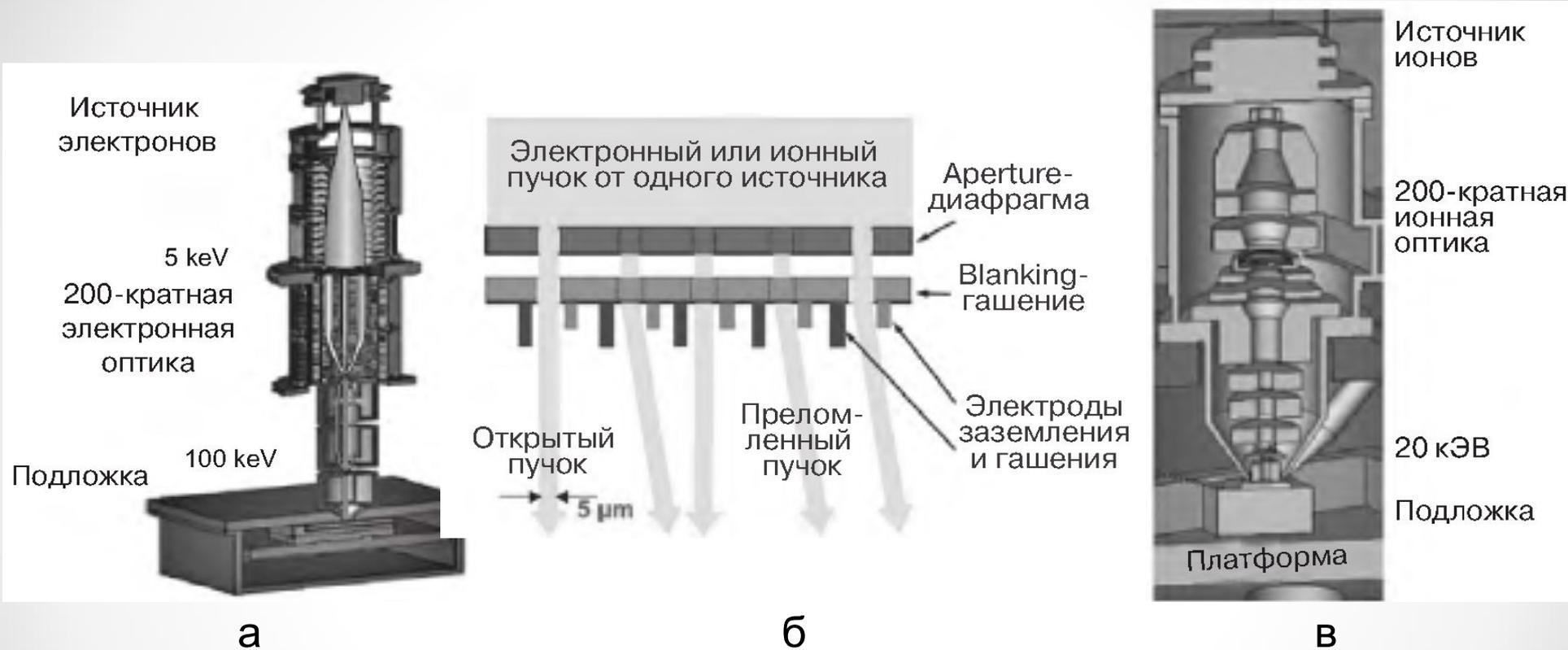


Схема процесса микростереолитографии

# Технологии аддитивного производства



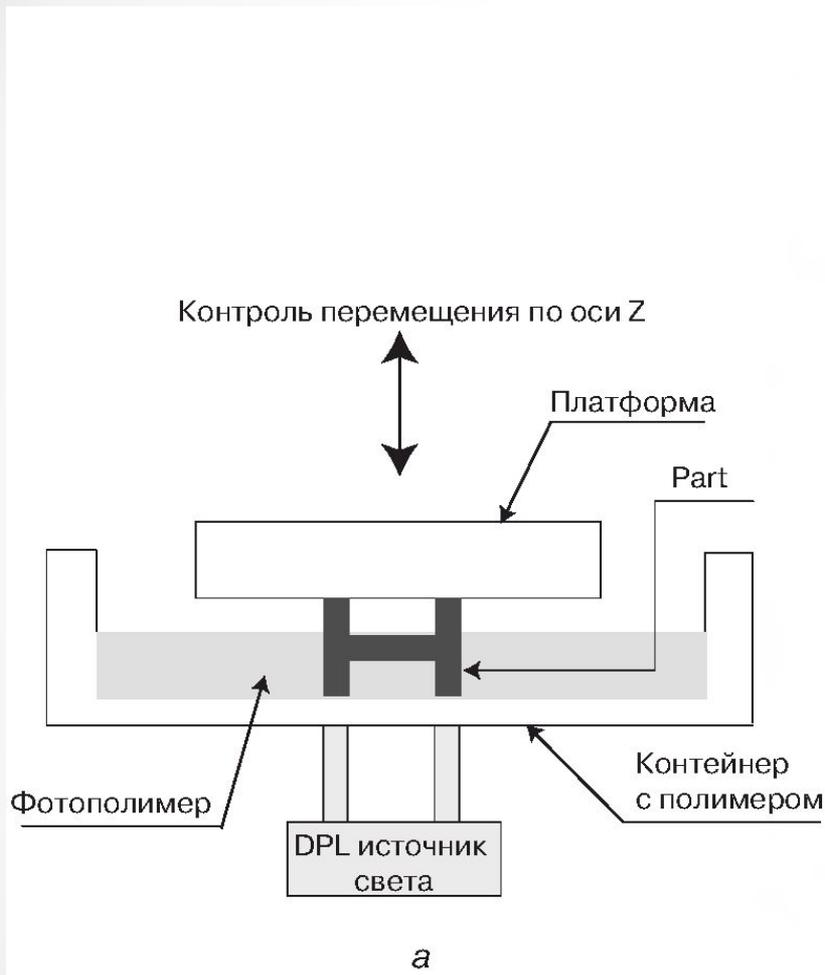
Микро- и нанолитографические процессы:

*а – безмасочная нанолитография электронными пучками (<45 нм);*

*б – программируемая система апертур;*

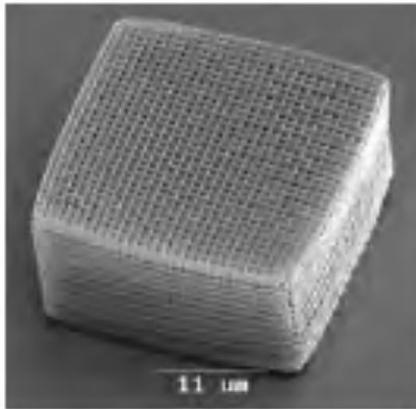
*в – прямое наноструктурирование ионными пучками (<20 нм)*

# Технологии аддитивного производства

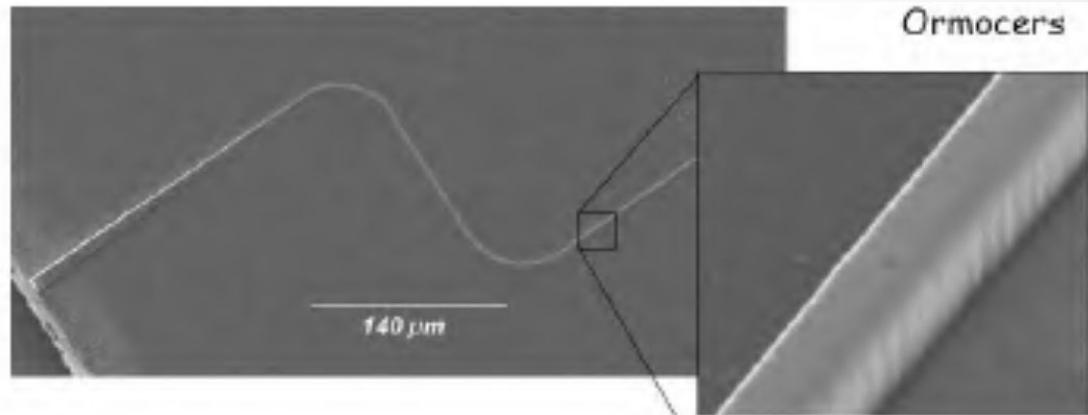


Масочная методика прототипирования:  
*a* – схема процесса; *б* – структура установки

# Технологии аддитивного производства



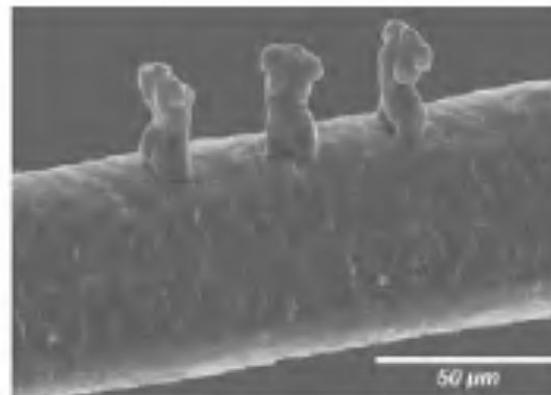
а



б



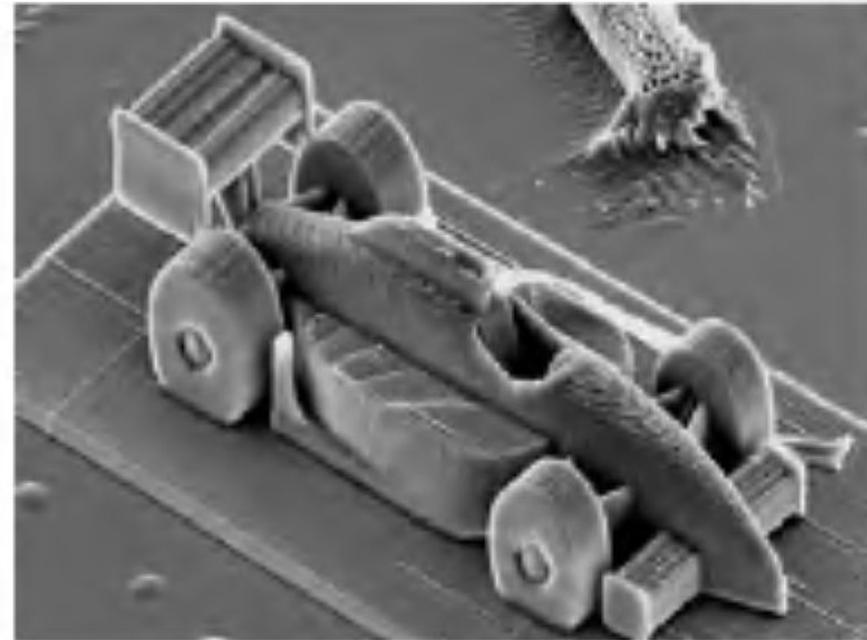
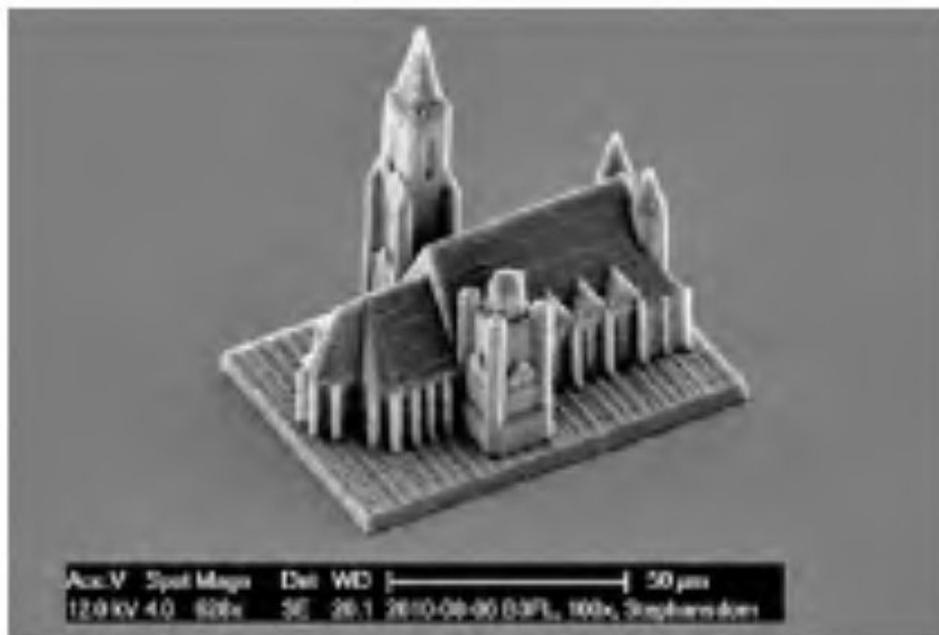
в



г

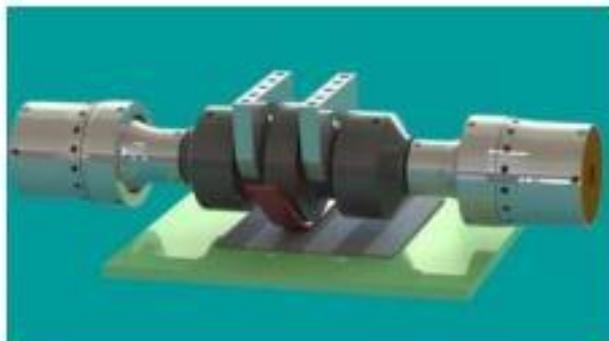
Примеры приложений двухфотонной лазерной стереолитографии:  
а — фотонный кристалл; б — 3D-волноводная структура;  
в — нанофлюидный чип; г — 3D-нано- и микроструктуры

# Технологии аддитивного производства



Примеры субмикронных изделий высокой точности

# Технологии аддитивного производства



а - ультразвуковая сварка;



б – фрезерование;



в - модельная лента.

Твердофазная технология послойного формирования изделий из листовых модельных материалов

# Технологии аддитивного производства



Твердофазная технология послойного формирования изделий из листовых модельных материалов с механической резкой

# Технологии аддитивного производства

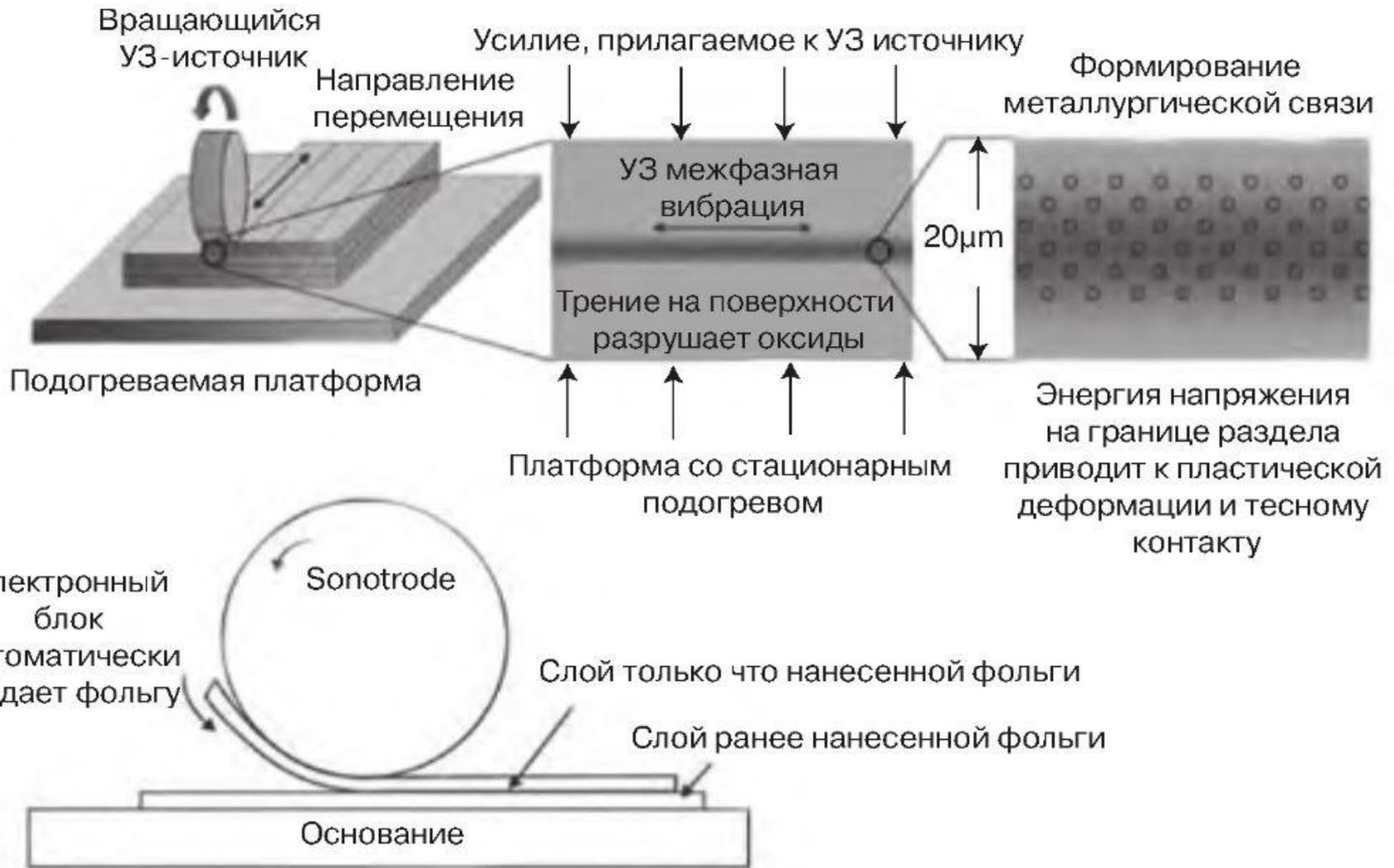


Схема процесса ультразвуковой консолидации (УЗК)

# Технологии аддитивного производства

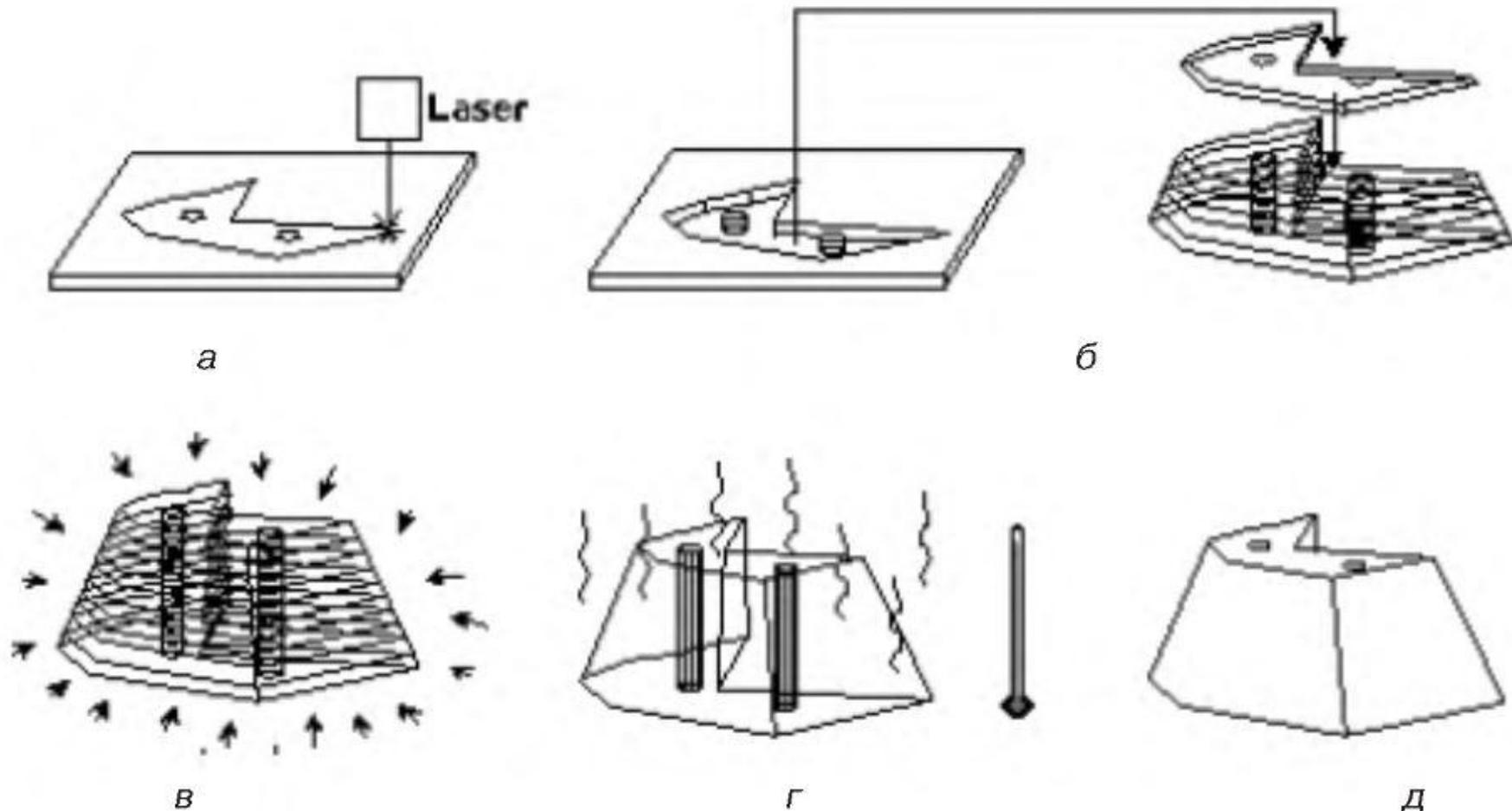


Схема процесса послойного ламинирования:  
а — лазерная резка слоев; б — наложение слоев;  
в — ламинирование; г — удаление связующего и дополнительное спекание;  
д — готовое изделие

# Технологии аддитивного производства



а



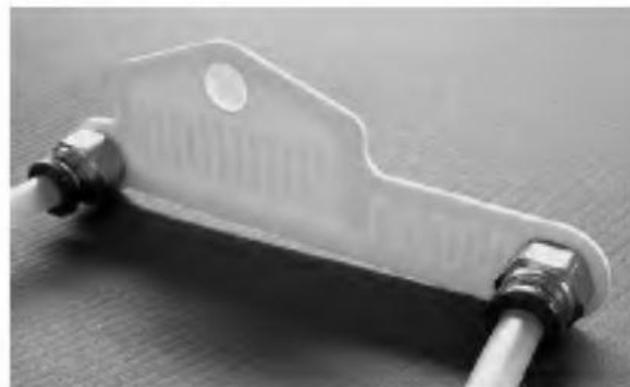
б



в



г



д

Примеры технологии послойного ламинирования:

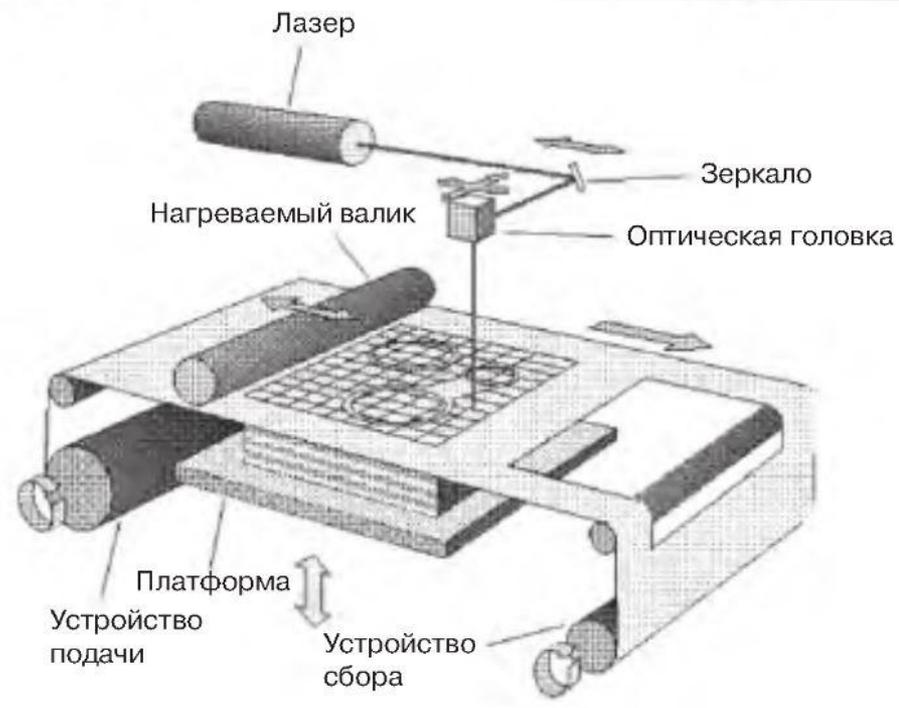
*а — трехслойный стальной ротор диаметром 26 мм;*

*б — деталь из оксида алюминия;*

*в — деталь из оксида циркония и смеси  $ZrO_2 + Al_2O_3$  (ZTA);*

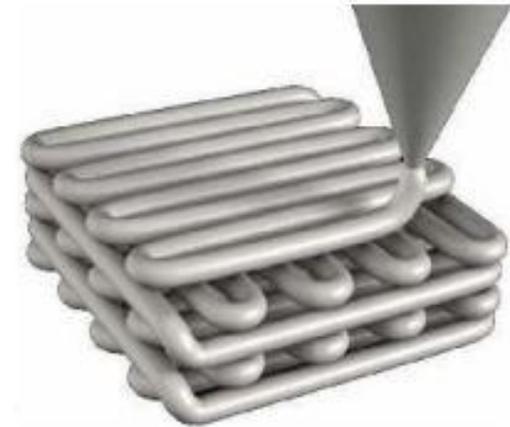
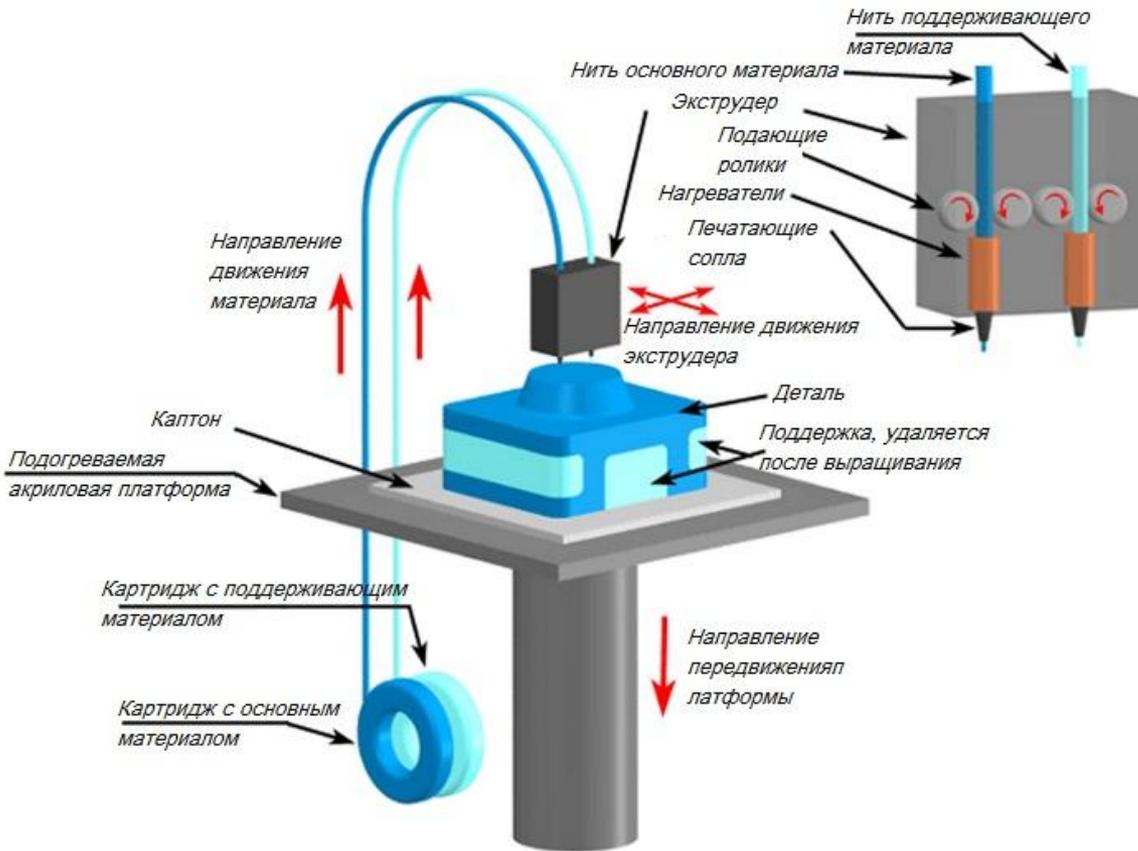
*г — деталь из нитрида кремния; д — устройство сепарации жидкости с внутренними каналами*

# Технологии аддитивного производства



Послойная раскройка листового материала

# Технологии аддитивного производства



Технологический процесс экструзии  
(послойное нанесение расплавленного материала через экструдер)

# Технологии аддитивного производства

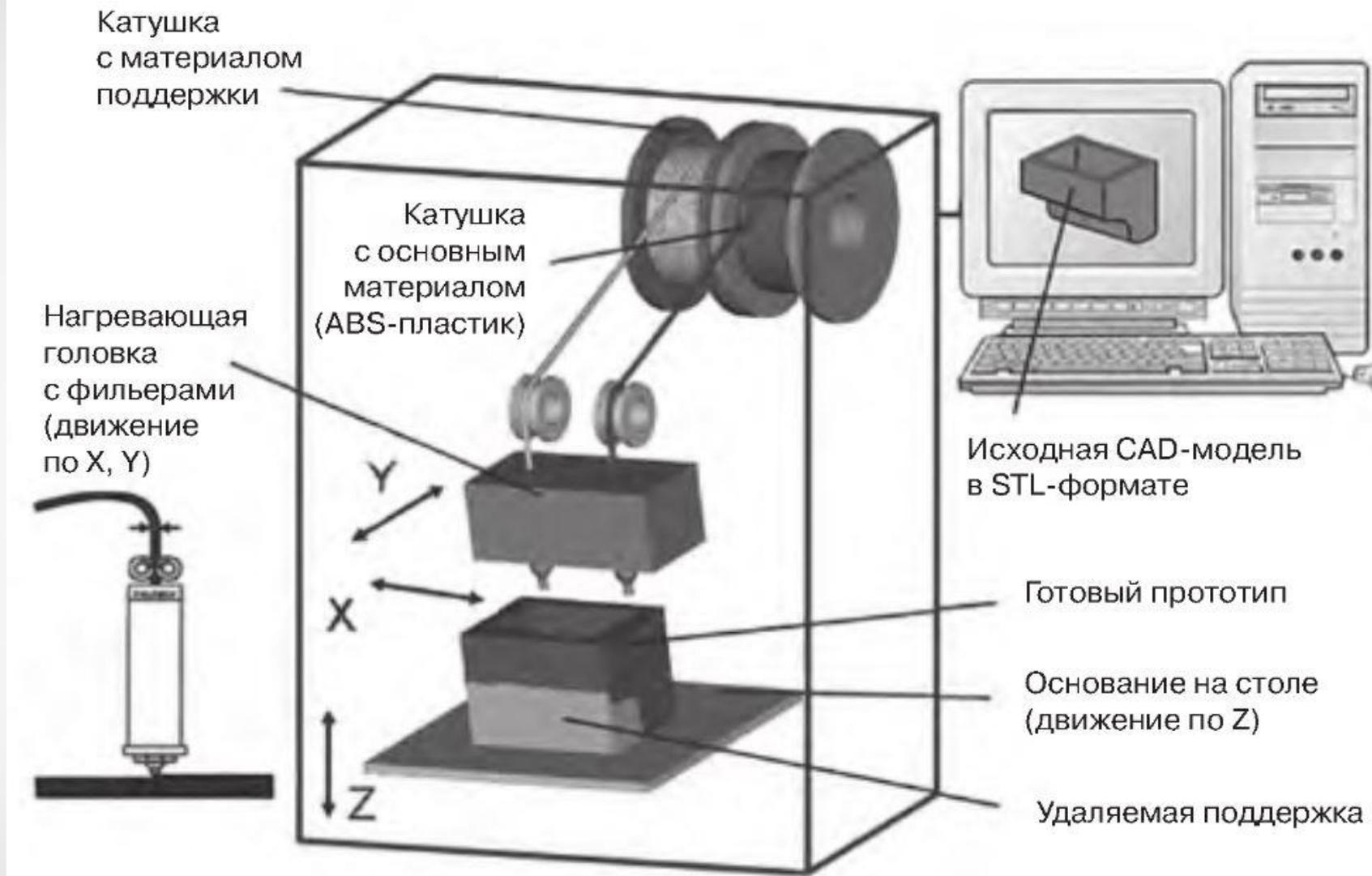


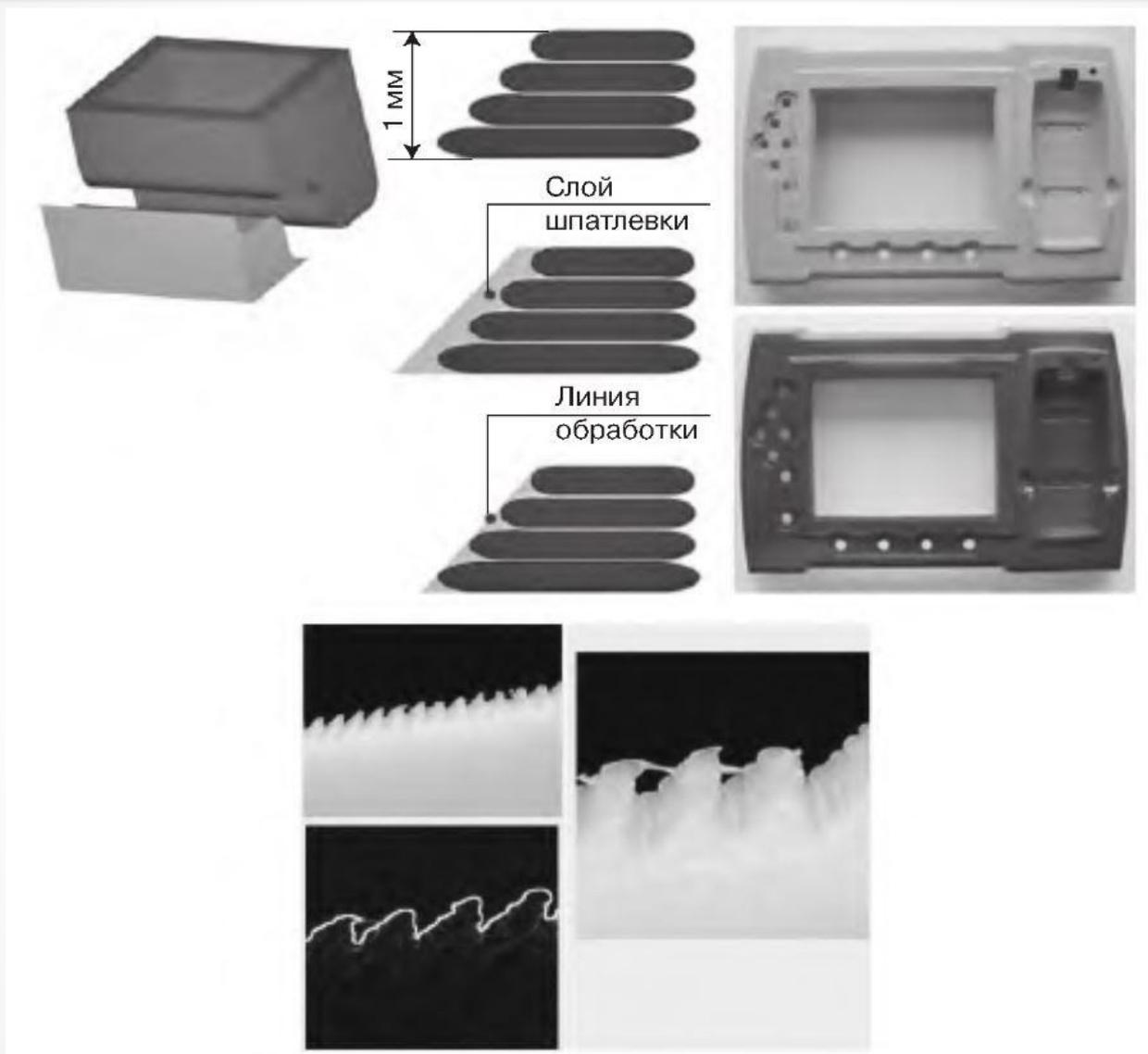
Схема процесса экструзии

# Технологии аддитивного производства



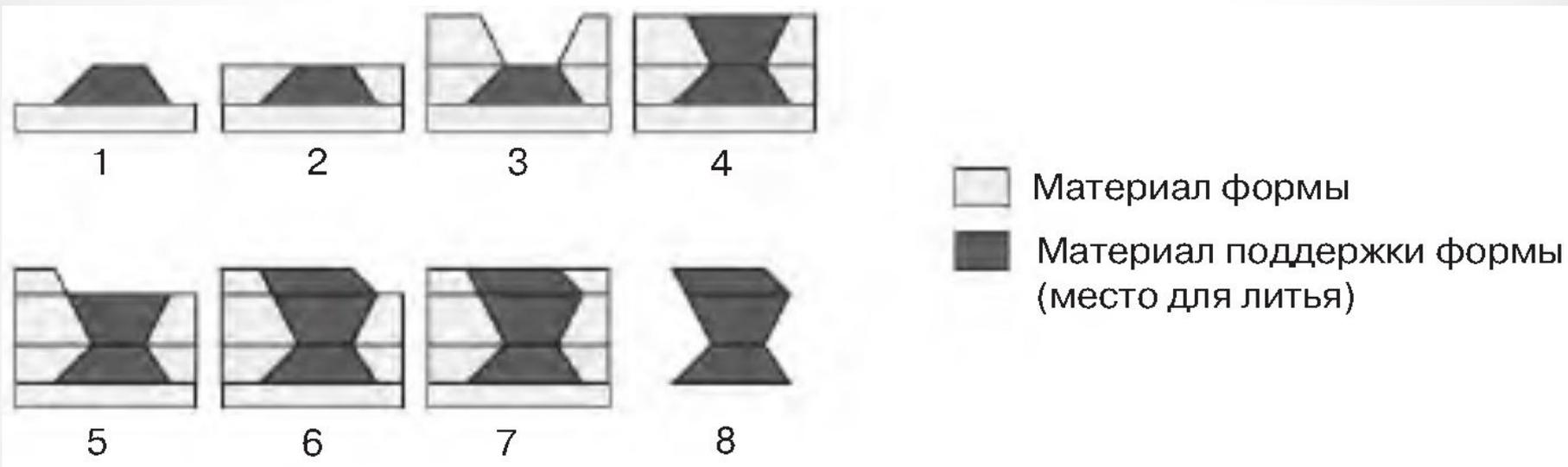
Внешний вид установок для экструзии

# Технологии аддитивного производства



Финишная обработка внешней поверхности изделий после экструзии

# Технологии аддитивного производства



Основы методики послойного создания литейной формы

# Технологии аддитивного производства

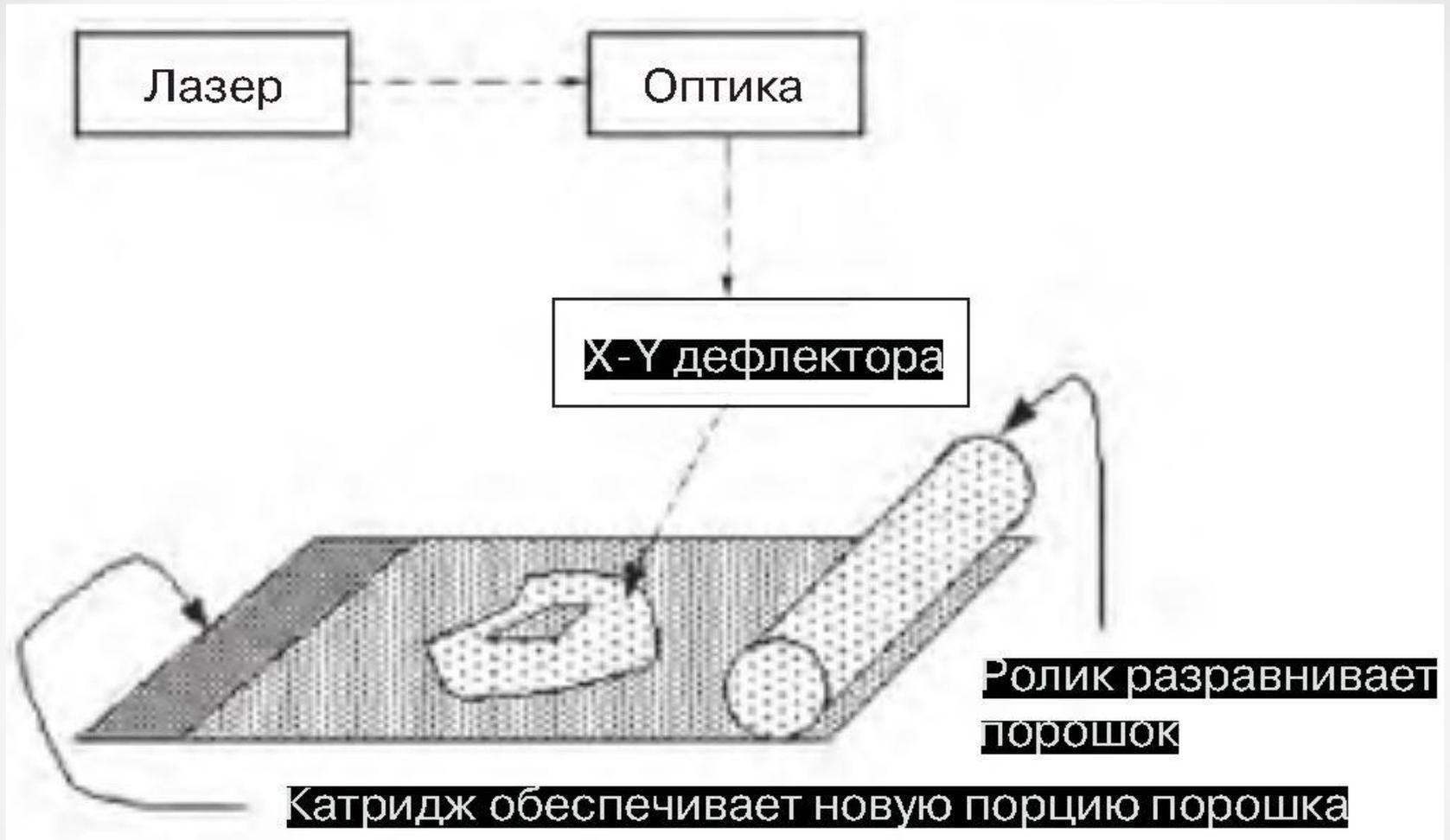
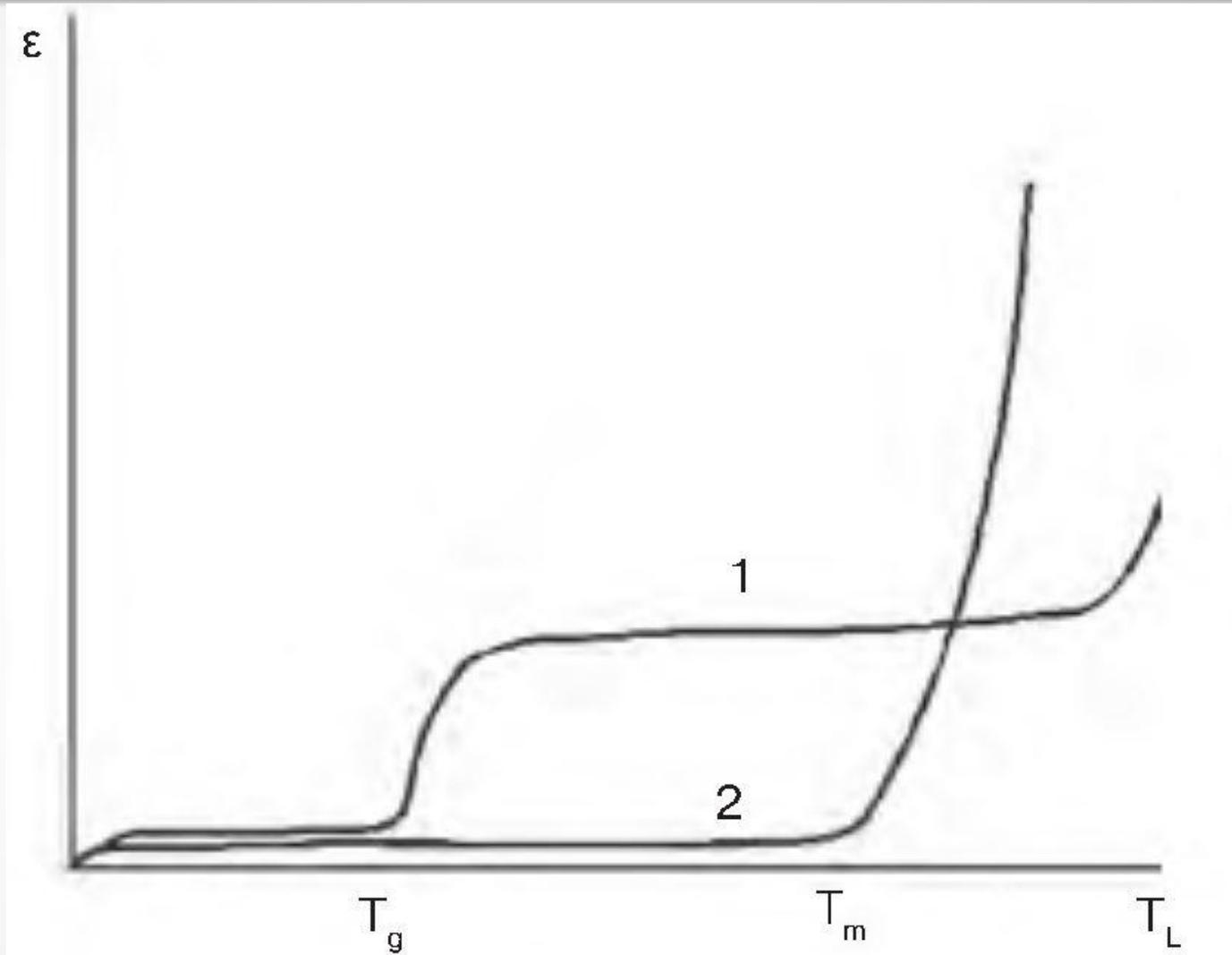


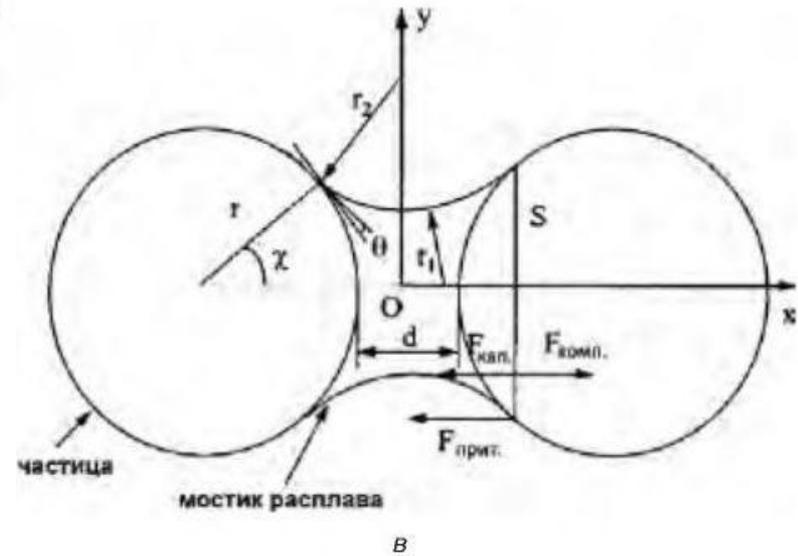
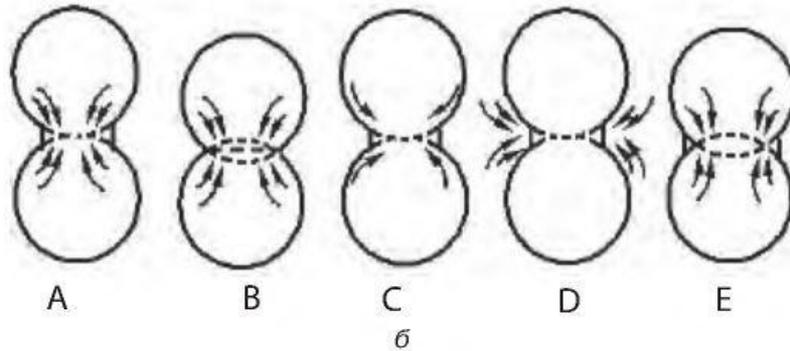
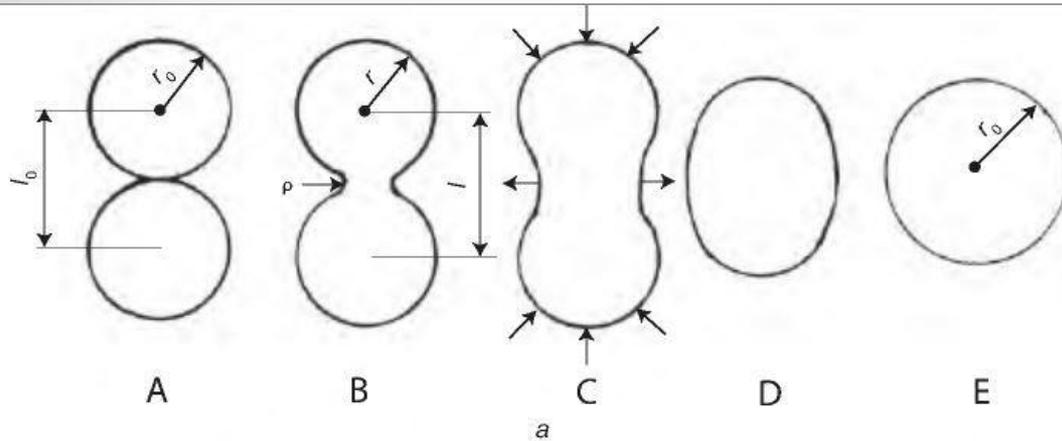
Схема процесса селективного лазерного спекания

# Технологии аддитивного производства



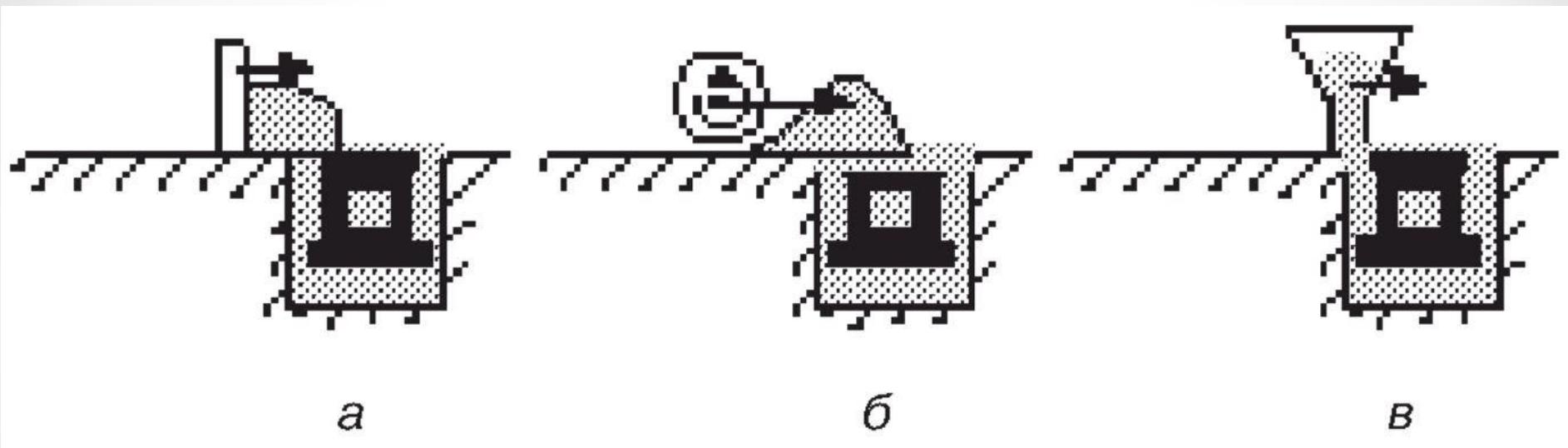
Термомеханическая кривая зависимости деформации от температуры для аморфного (1) и кристаллического (2) полимеров

# Технологии аддитивного производства



Различные стадии взаимодействия двух сферических частиц:  
*а* — классическая реология спекания;  
*б* — спекание при лазерном воздействии; *в* — модель

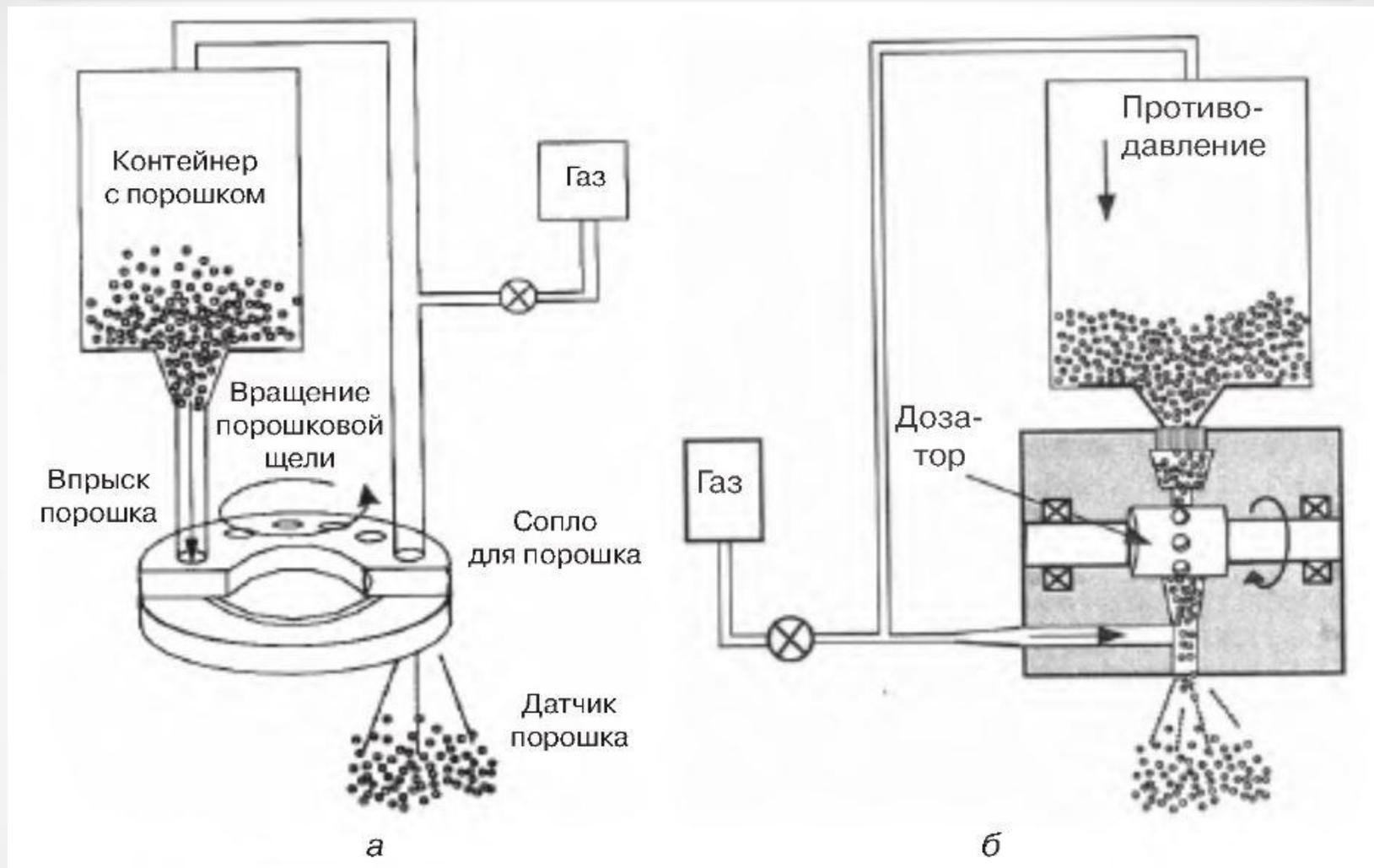
# Технологии аддитивного производства



Способы нанесения и разравнивания порошка  
на платформе-основании:

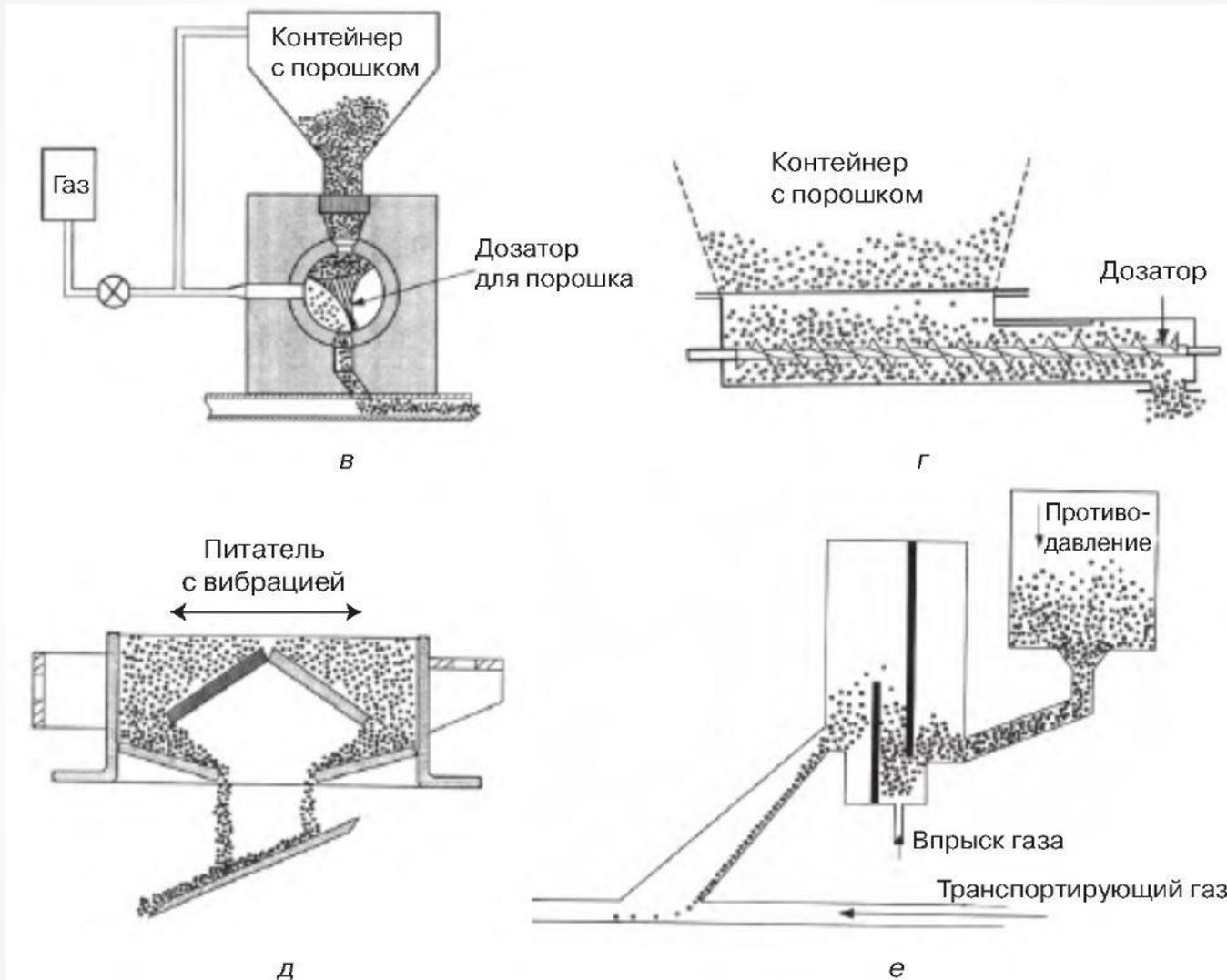
*а — скребок; б — валик; в — бункер*

# Технологии аддитивного производства



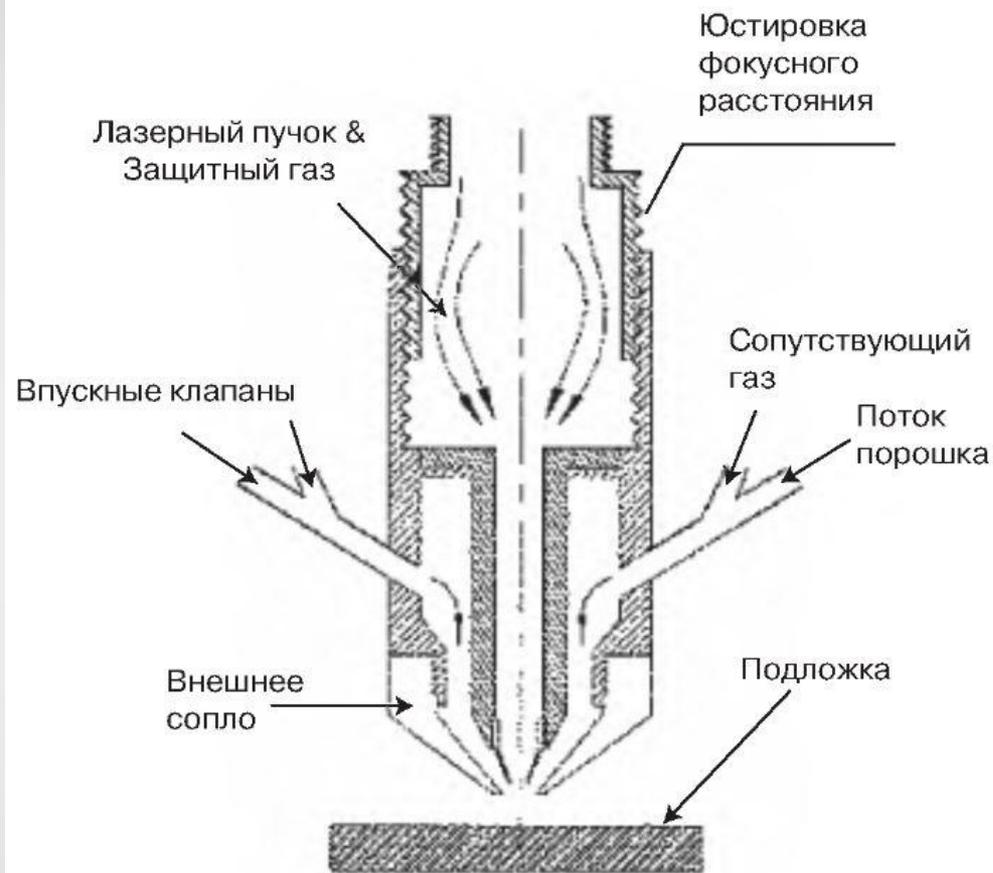
Способы дозирования порошков под действием сил гравитации:  
*а — с вращающимся колесом; б — с измерительным колесом*

# Технологии аддитивного производства



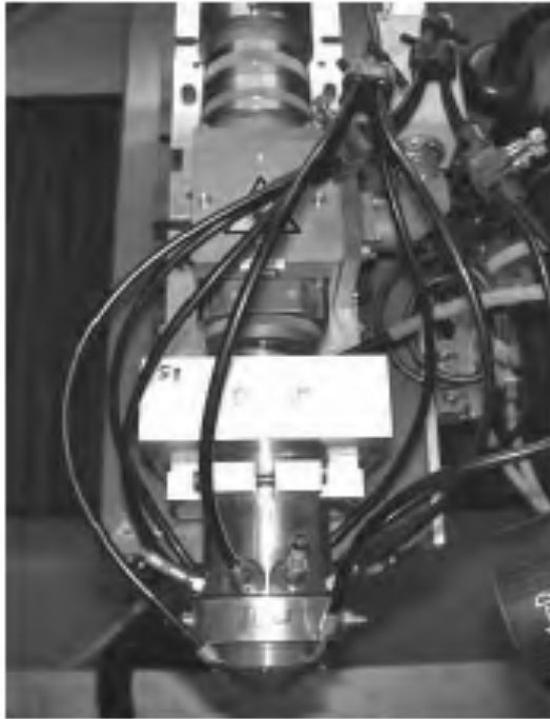
Способы дозирования порошков под действием сил гравитации:  
*в — с делительным механизмом; г — с винтовой передачей;  
д — с вибрацией; е — с давлением газа*

# Технологии аддитивного производства



Схемы дозаторов и способы доставки порошковых материалов:  
*а — соосно падающему лазерному излучению; б — с боковым вдувом*

# Технологии аддитивного производства



а



б

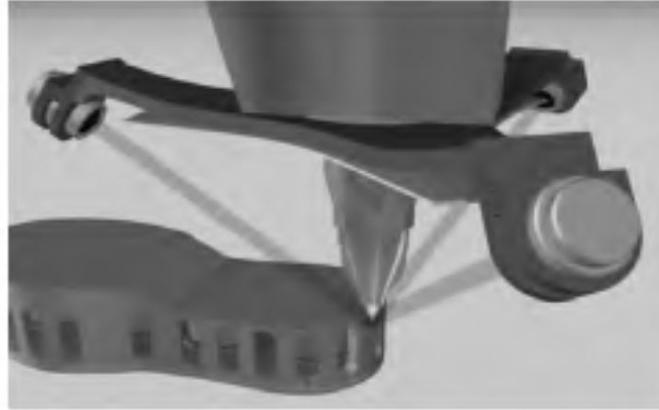
Установка для трехмерной лазерной наплавки  
с координатным столом и дозирующей системой:

*а — сопловой блок; б — общий вид*

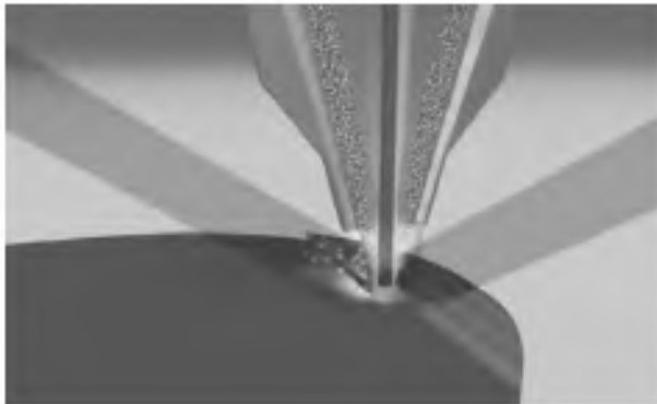
# Технологии аддитивного производства



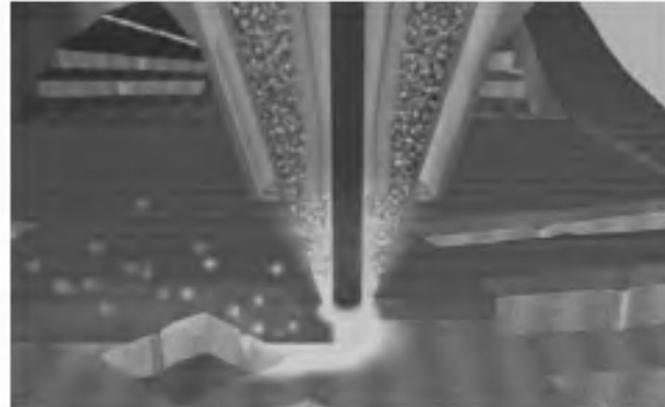
*а*



*б*



*в*



*г*

Фрагменты работы установки для трехмерной лазерной наплавки:

*а — система из четырех бункеров для порошков;*

*б — система видеонаблюдения; в — начало процесса наплавки;*

*г — обход контура при наплавке*

# Технологии аддитивного производства

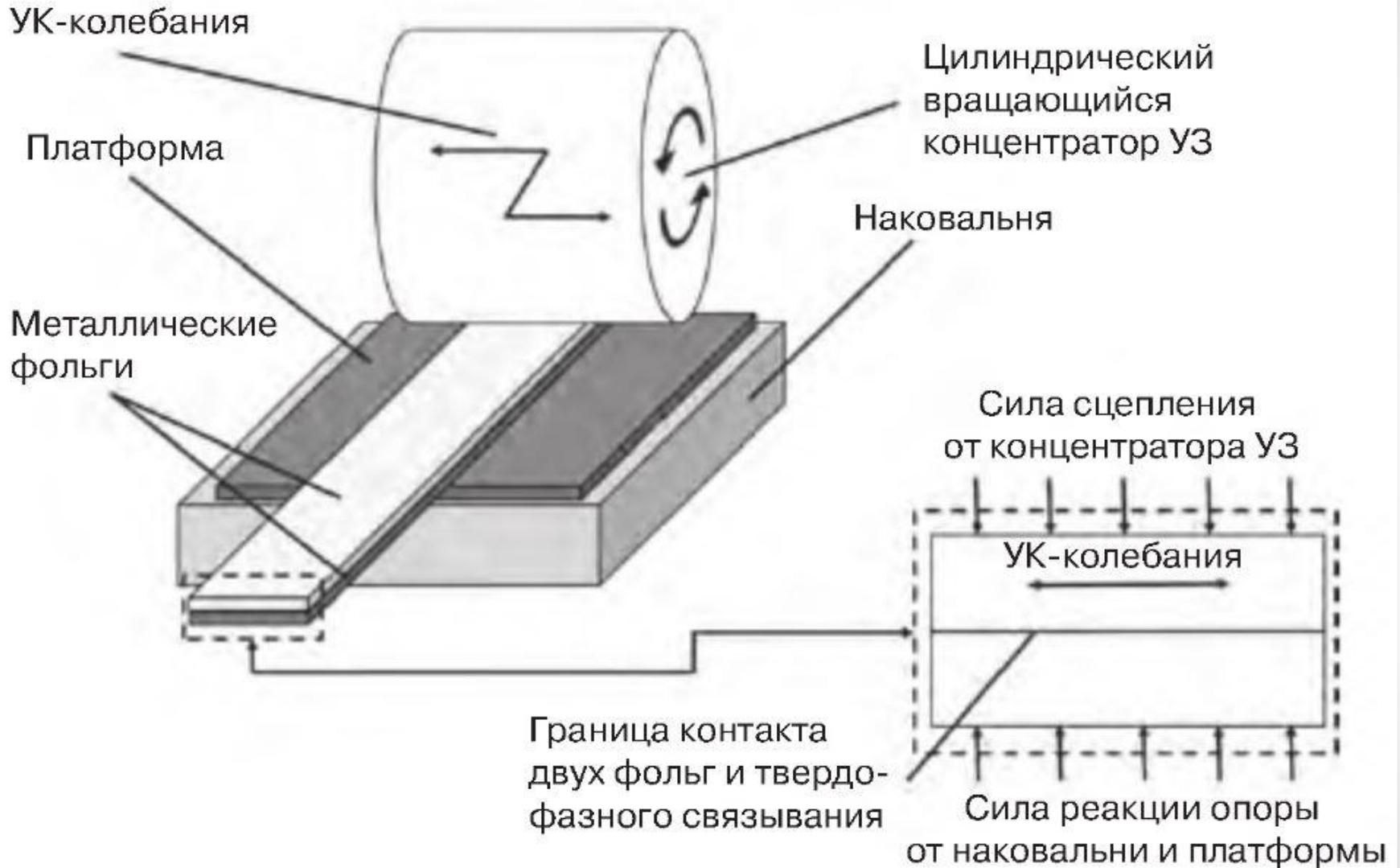
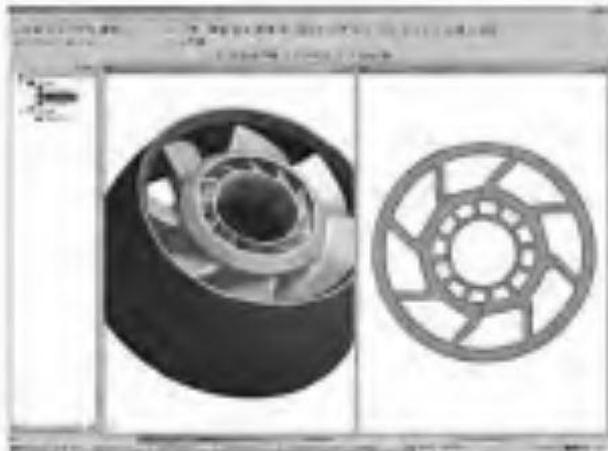


Схема процесса ультразвукового компактирования порошков

# Технологии аддитивного производства



## Параметры ЛВ

- мощность
- размер пятна ЛИ
- распределение энергии в пятне
- длина волны

## Параметры процесса

- скорость сканирования ЛИ
- стратегия сканирования по поверхности
- толщина насыпаемого слоя
- окружающая температура
- защитная атмосфера

## Свойства порошка

- состав
- распределение по размерам
- форма частиц

Технологические факторы взаимовлияния  
при селективном лазерном спекании

# Технологии аддитивного производства

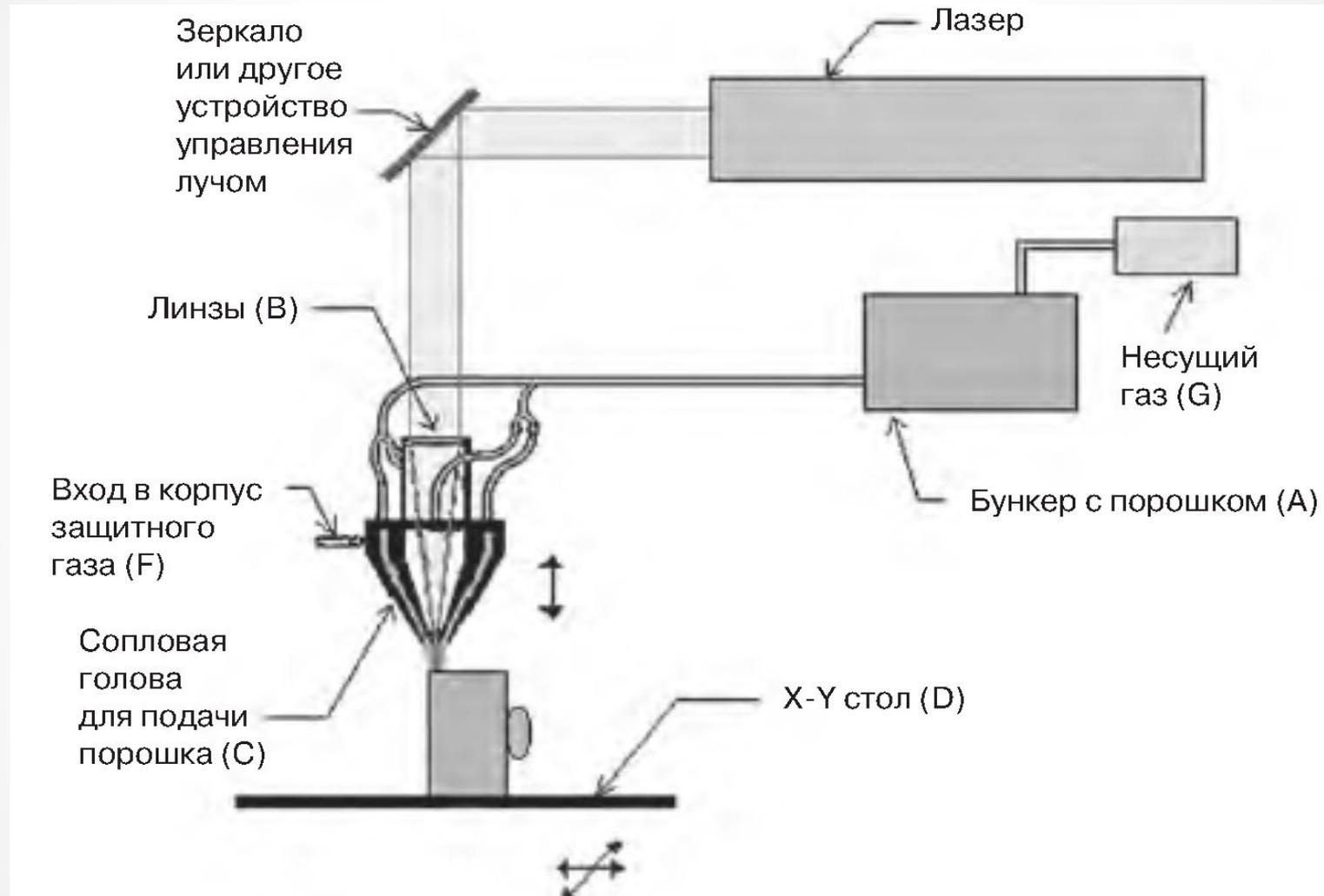


Схема процесса лазерного спекания точных форм

# Технологии аддитивного производства

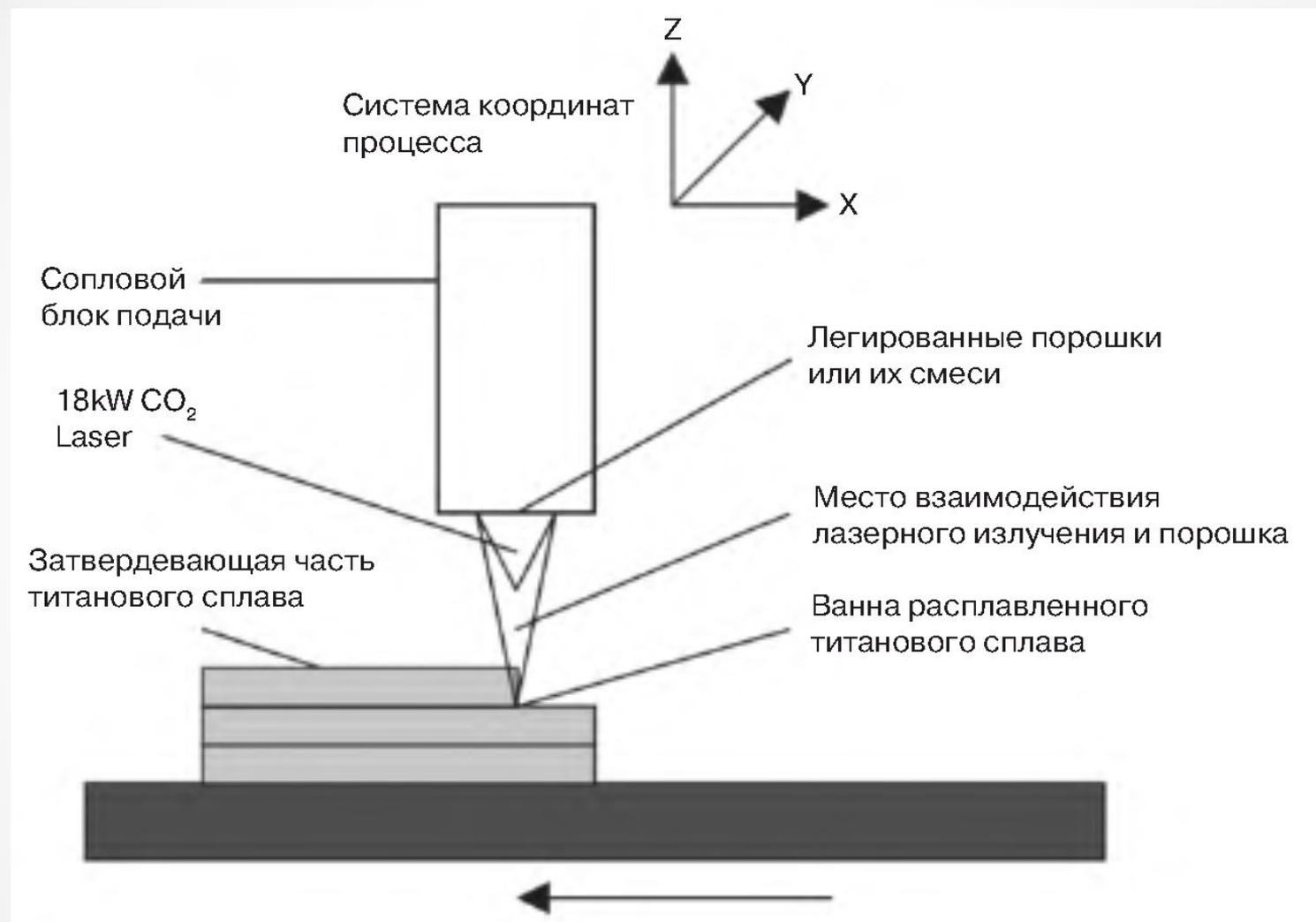


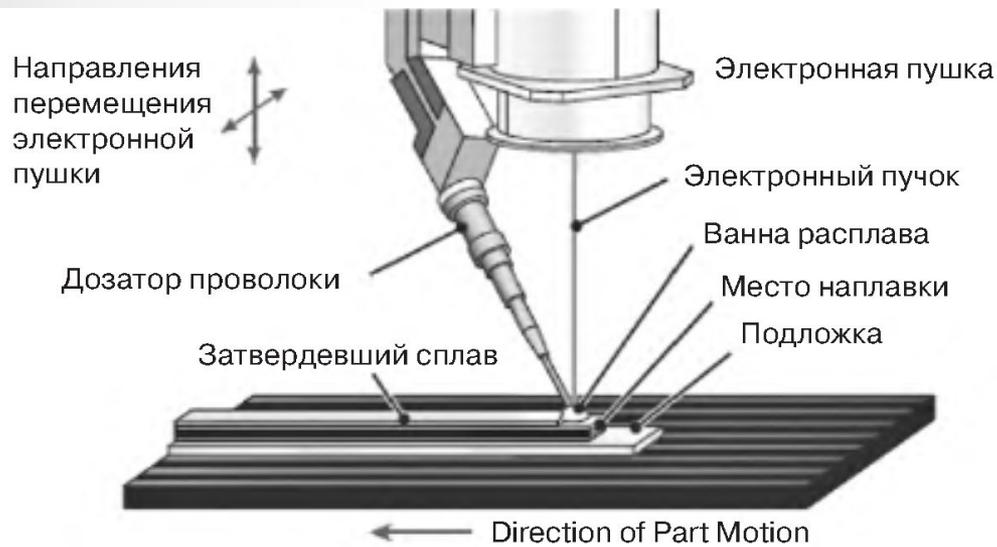
Схема процесса объемной лазерной наплавки

# Технологии аддитивного производства



Сандвич-структура из титанового сплава, имитирующая  
аэродинамический профиль крыла  
(получена объемной лазерной наплавкой)

# Технологии аддитивного производства



*Схема подвода расходной проволоки и электронного луча*

*Изделие до и после механообработки*

Метод послойного наваривания материалов в расплаве

# Технологии аддитивного производства

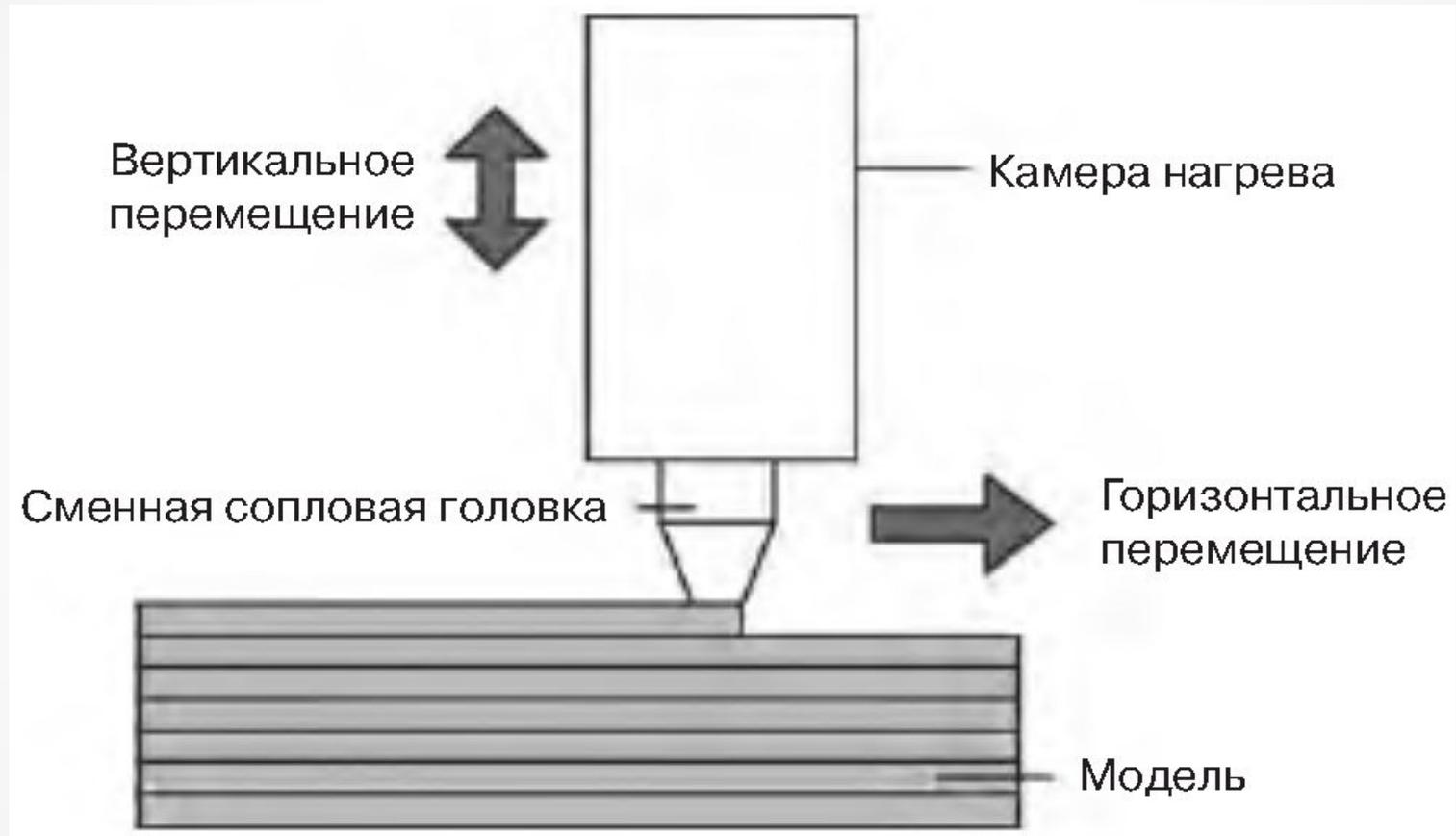


Схема процесса выдавливания легкоплавкого материала

# Технологии аддитивного производства

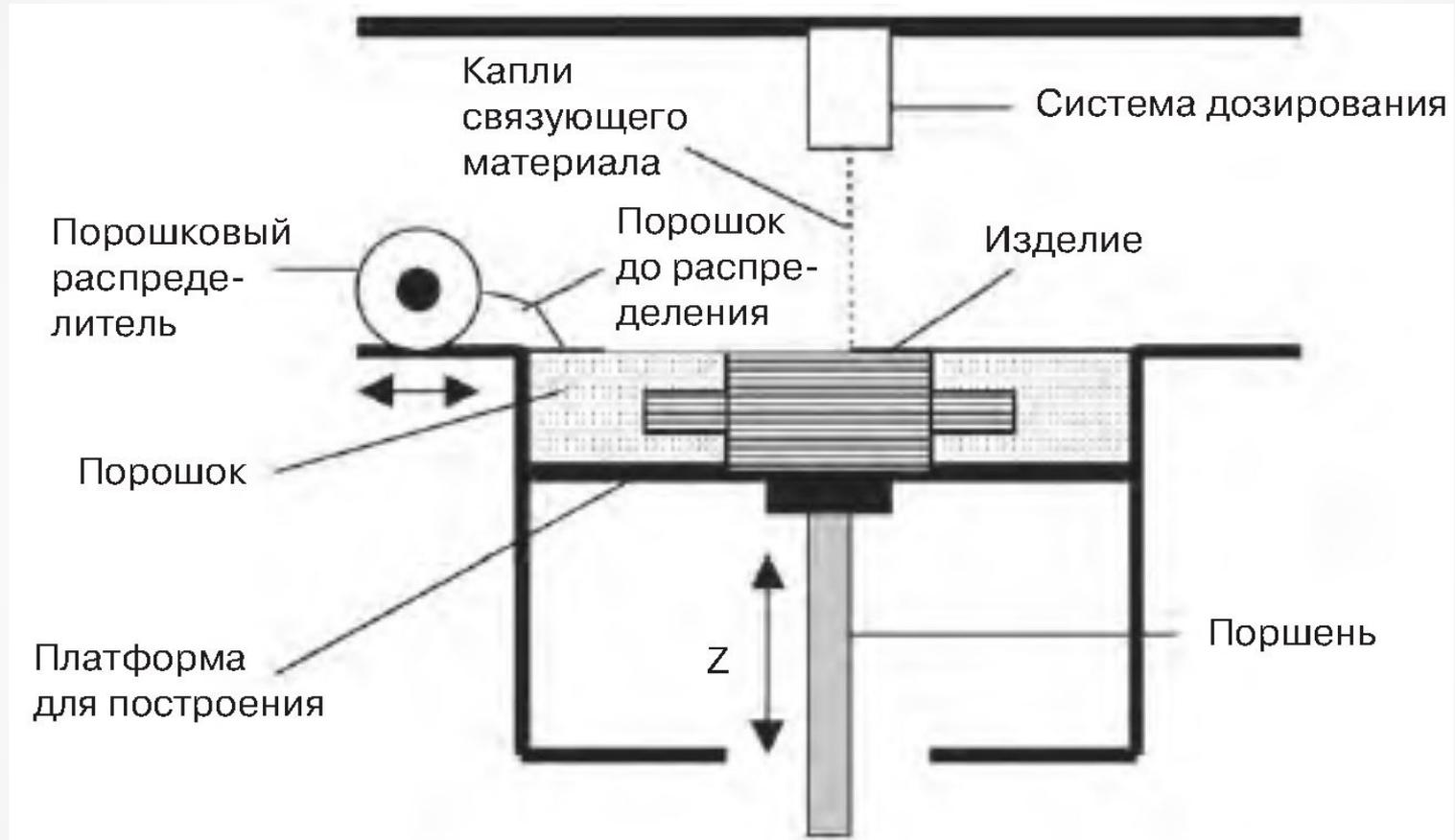
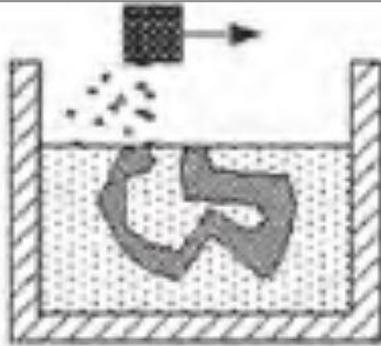
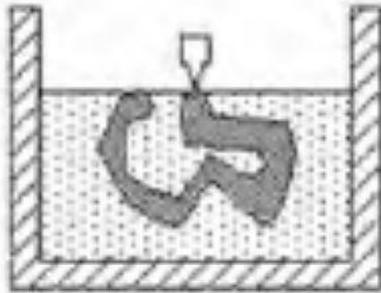


Схема процесса 3D-печати для биомедицинских приложений

# Технологии аддитивного производства



1. Нанесение порошка.  
Порошок Al распределяется равномерно и укатывается роликом



2. Головка с адгезионным расплавом.  
Действует как головка принтера, но используется расплав  $\text{SiO}_2$



3. Модель готова



4. Извлечение модели



5. Мастер-форма для отливки

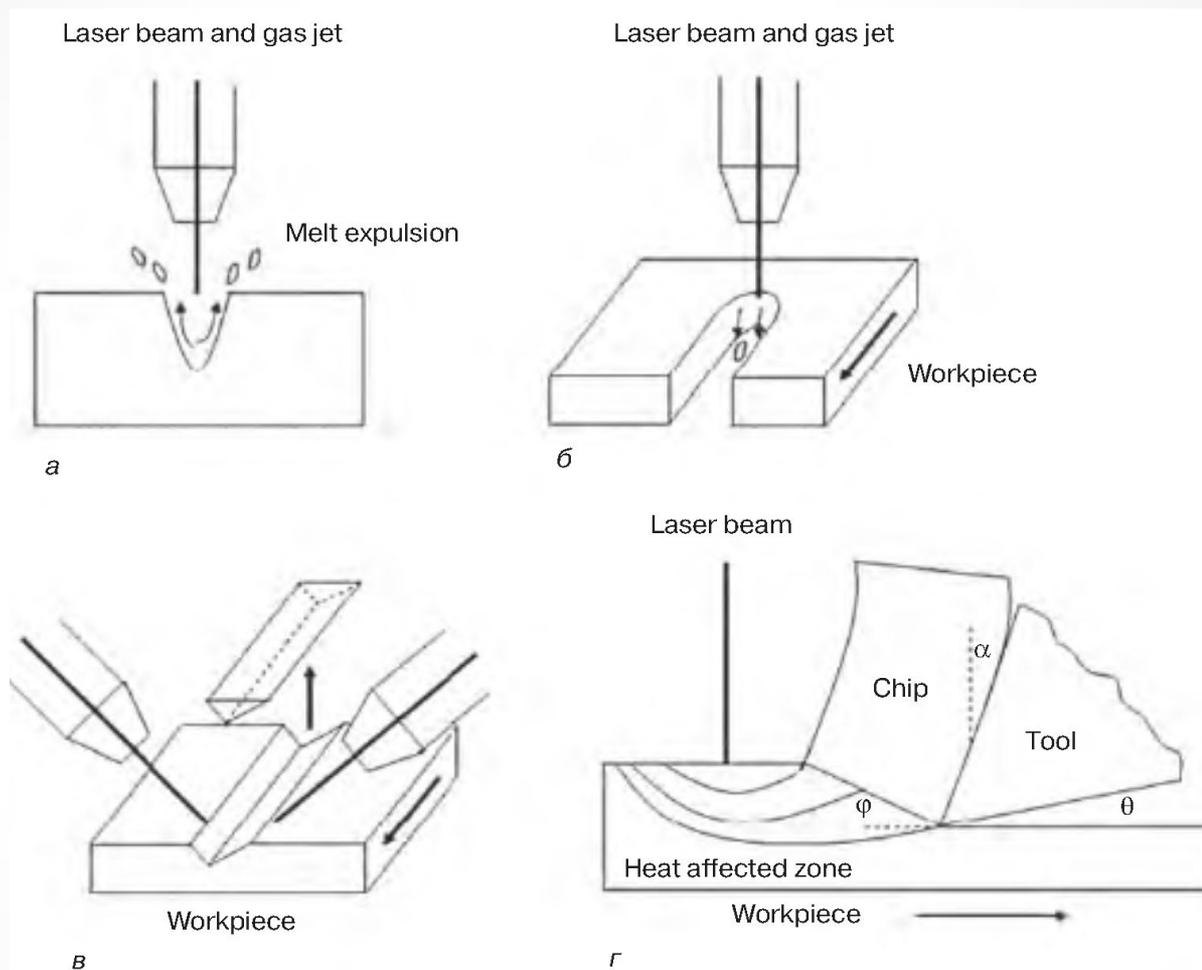
Схема процесса трехмерной печати литейной формы

# Технологии аддитивного производства



• Комбинированная технология струйной печати и УФ-печати •

# Технологии аддитивного производства

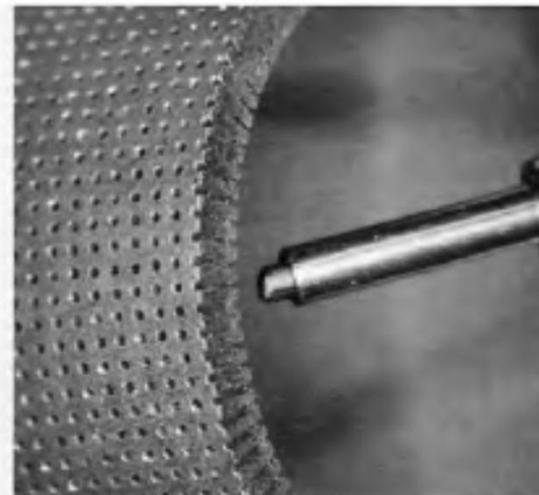


Микромеханическая обработка лазерным излучением:  
*а — лазерная прошивка отверстий (одномерное приближение);  
б — лазерная резка (двумерное приближение);  
в — лазерное фрезерование (трехмерное приближение);  
г — комбинированная лазерно-механическая обработка*

# Технологии аддитивного производства



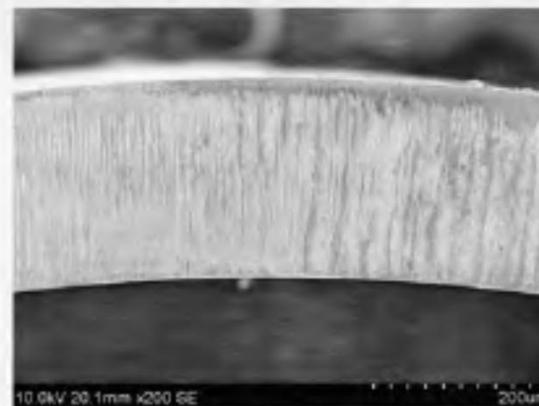
Pulsed YAG Laser: For fine cutting and welding



Drilling of 5,025 mm holes in stainless steel cut with a fibre laser



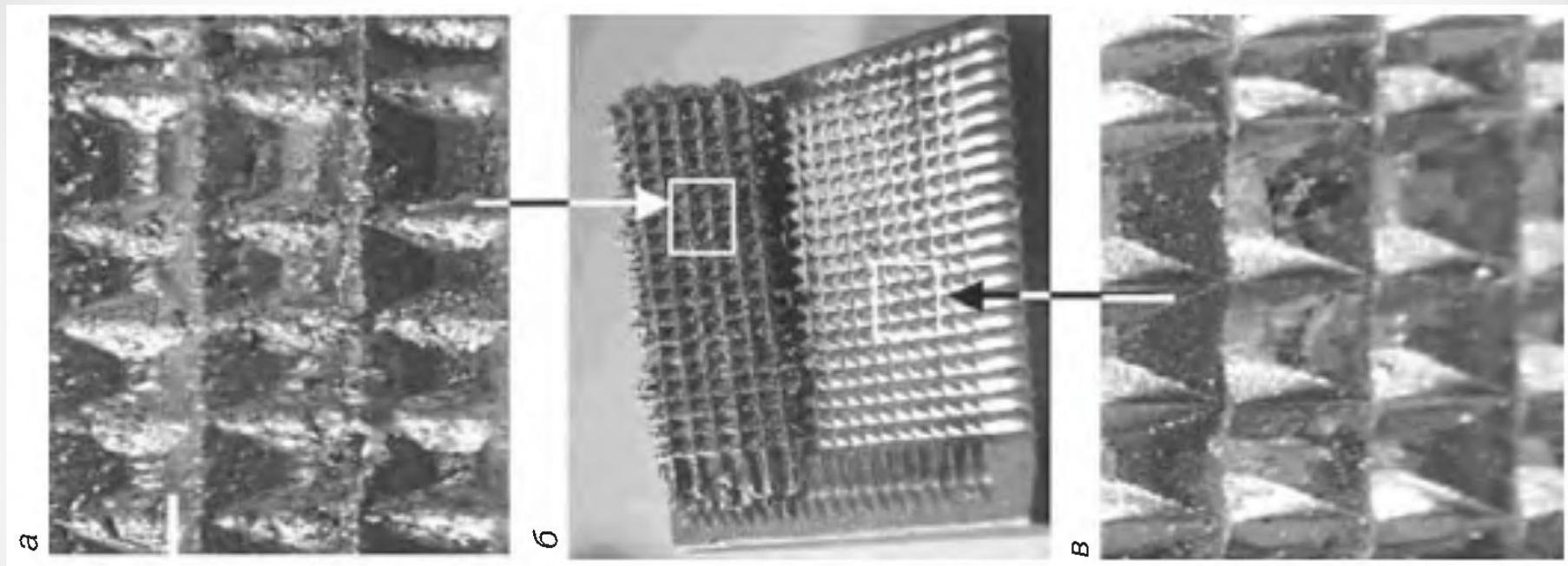
Excimer Laser: Micro-machining system



10.0kV 20.1mm x200 SE  
Milled surface cut with a glass laser

Оборудование для лазерной микрорезки и микропрошивки и результаты операций

# Технологии аддитивного производства



Процесс лазерного литья:

*а — отливка;*

*б — отливка и пресс-форма;*

*в — пресс-форма*

# Технологии аддитивного производства

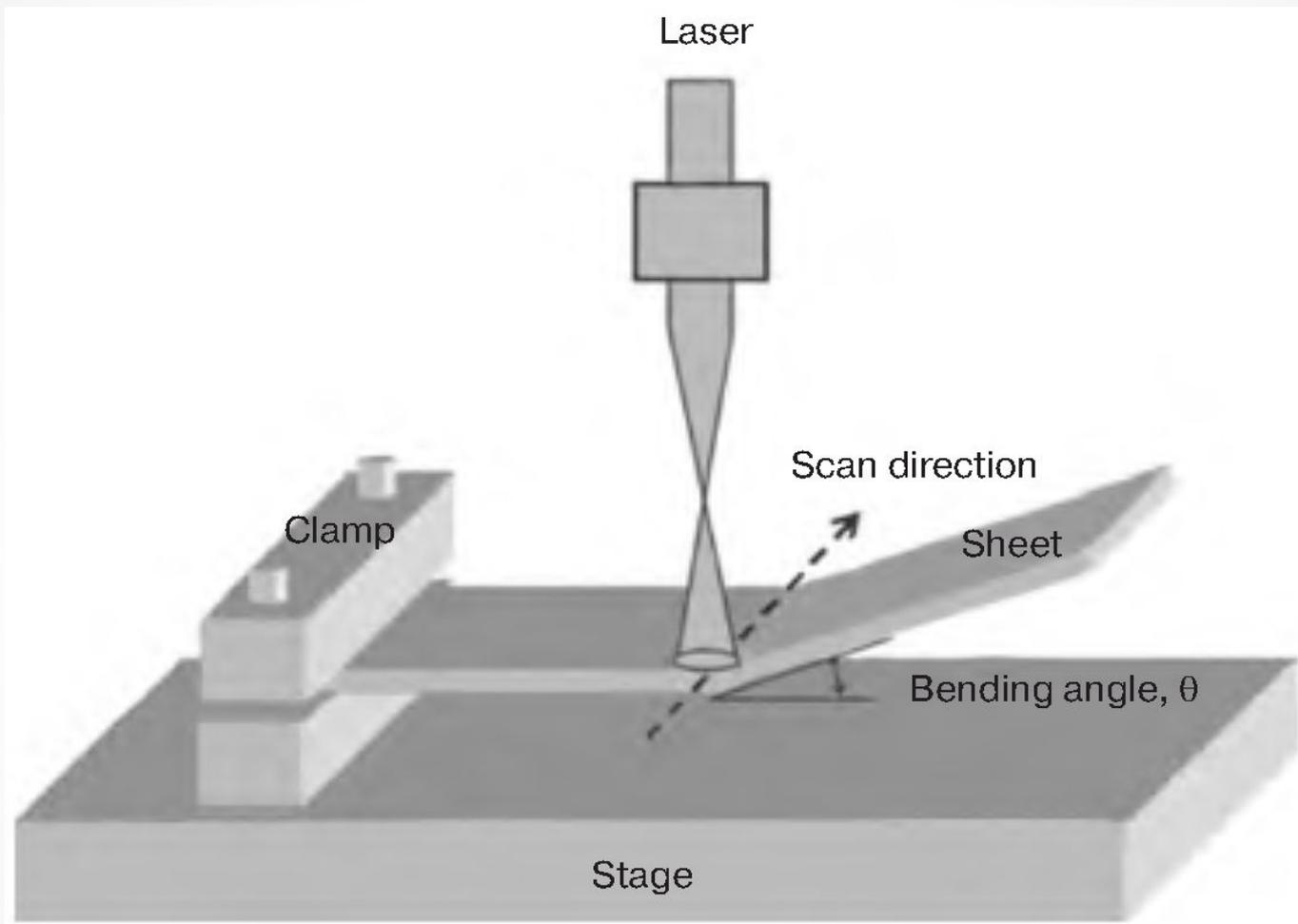
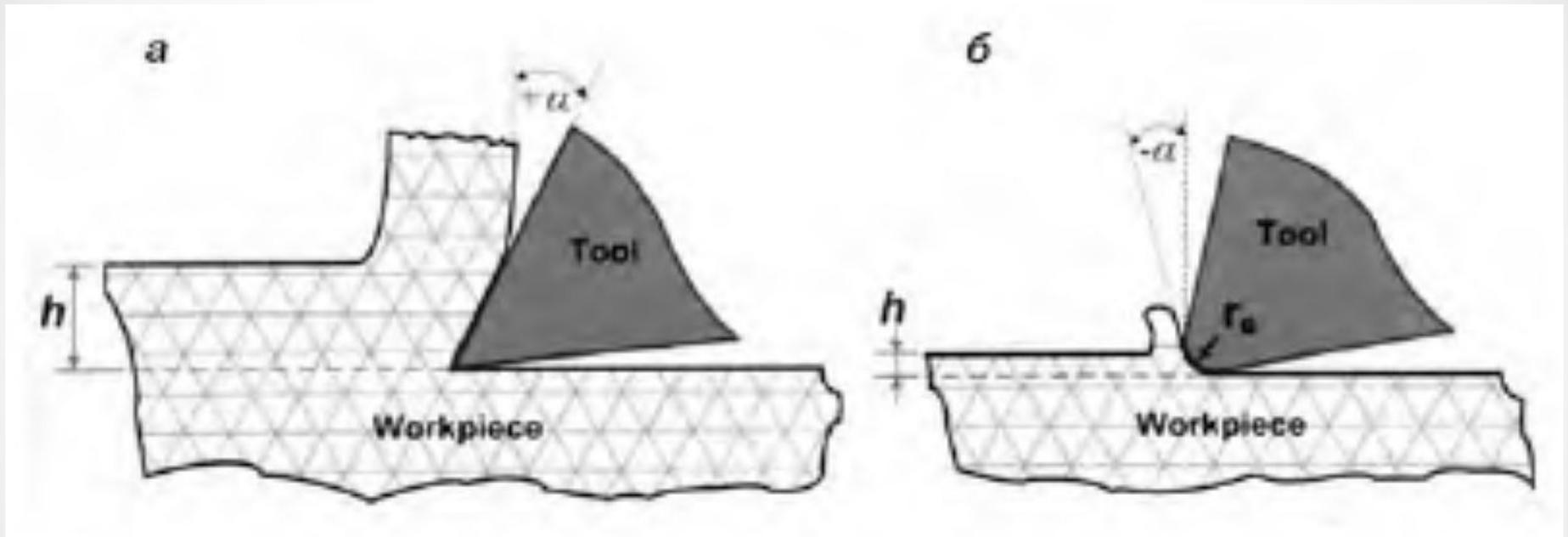


Схема процесса лазерного формования по месту изгиба

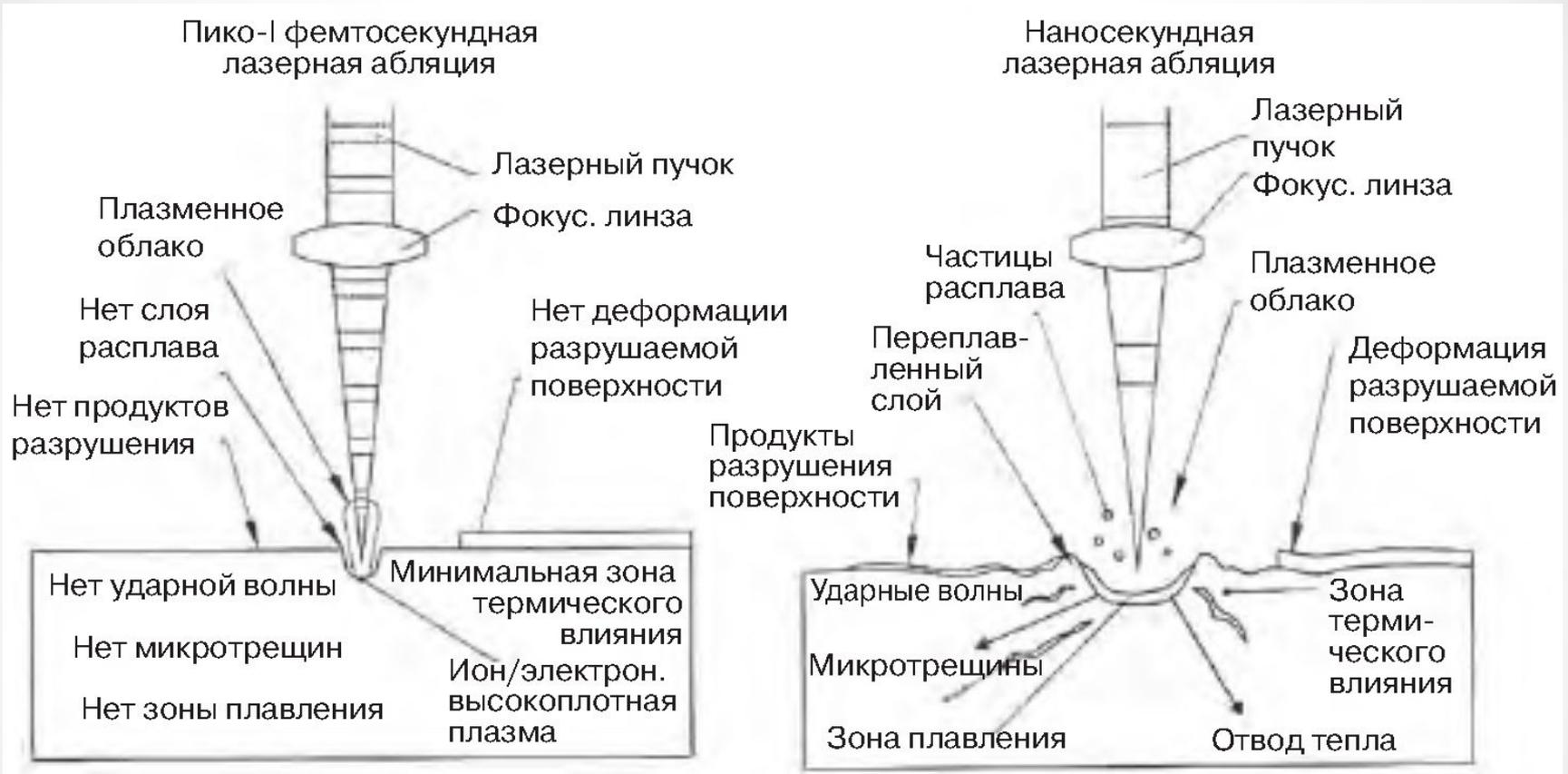
# Технологии аддитивного производства



Сравнение процессов фрезерования:

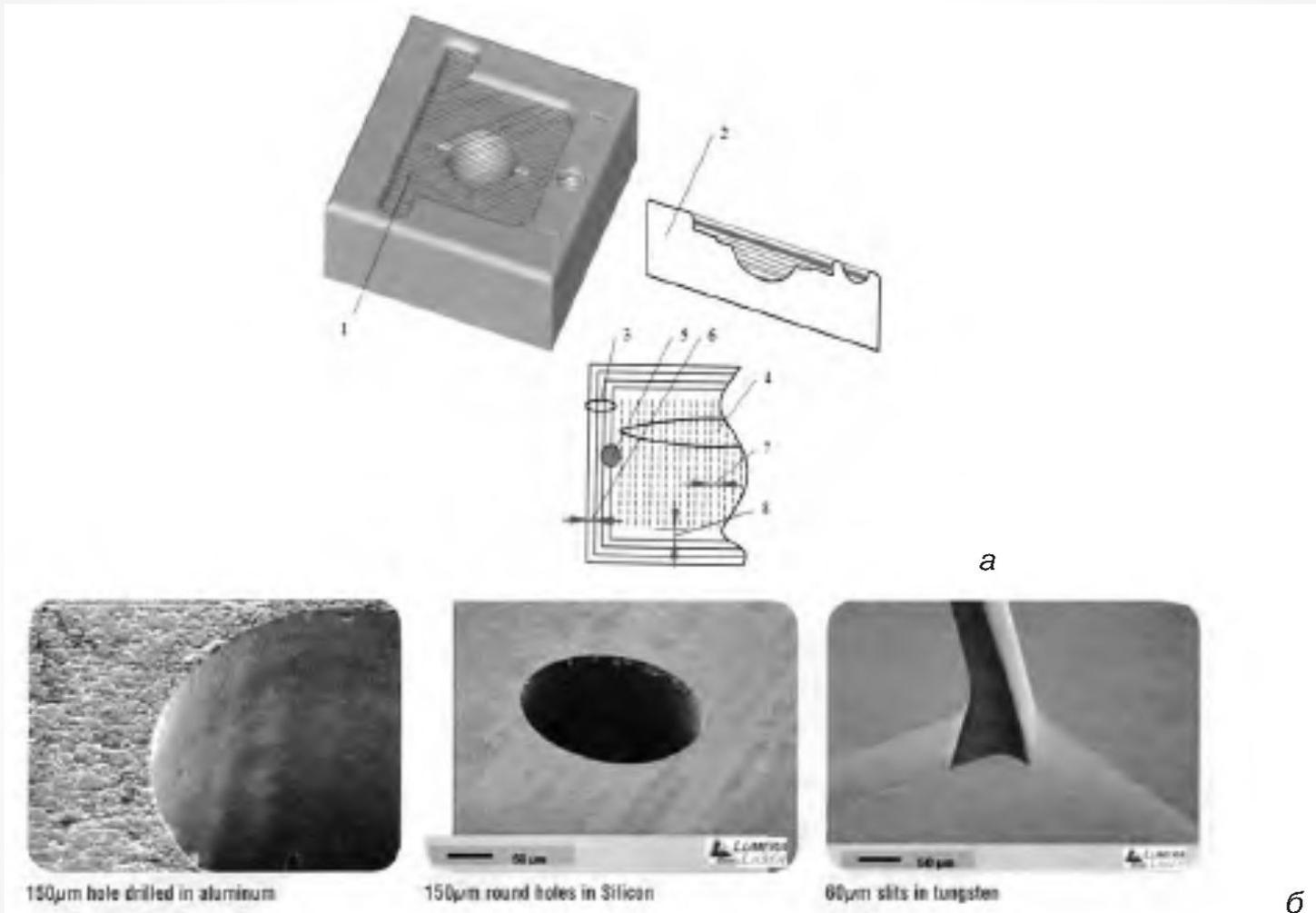
*а — механическое фрезерование; б — лазерное микрофрезерование*

# Технологии аддитивного производства



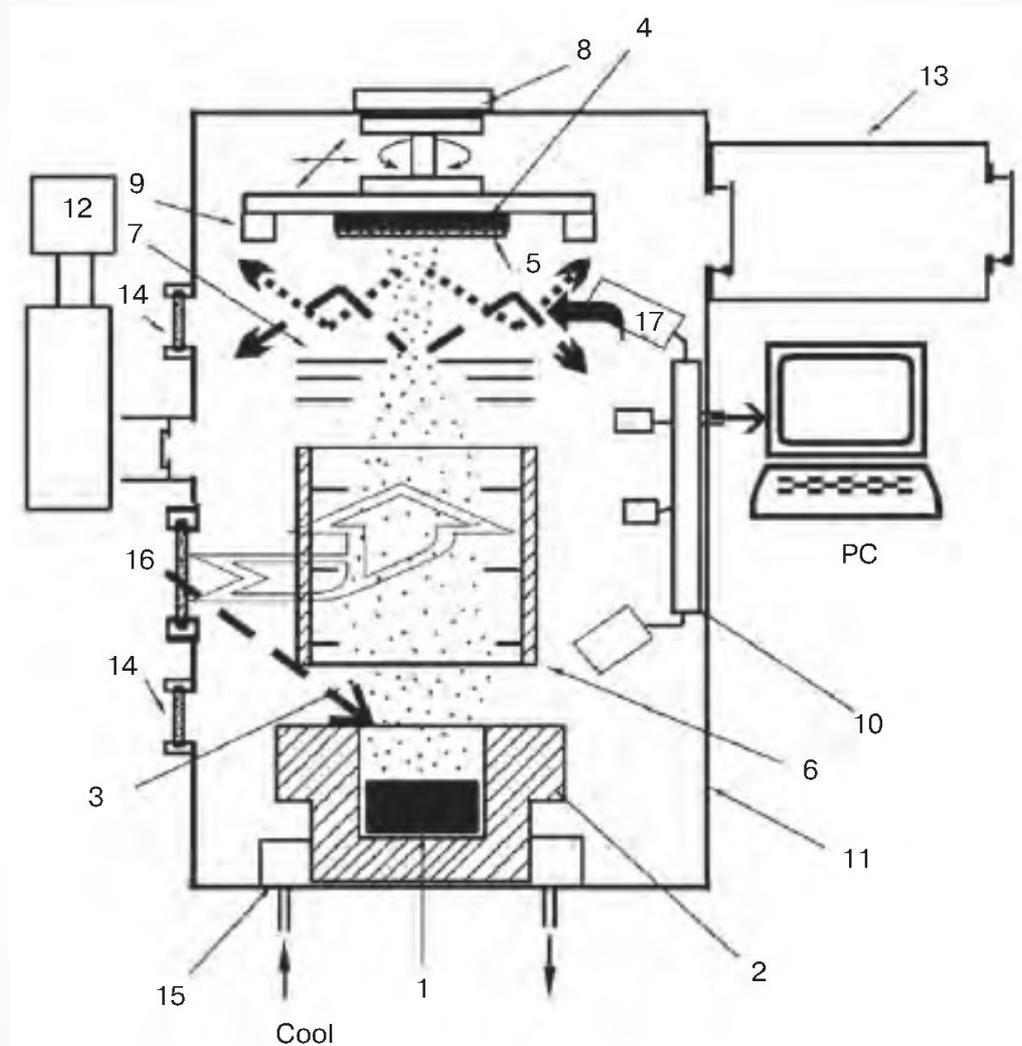
Основные различия пико- и наносекундной абляции при лазерном воздействии

# Технологии аддитивного производства



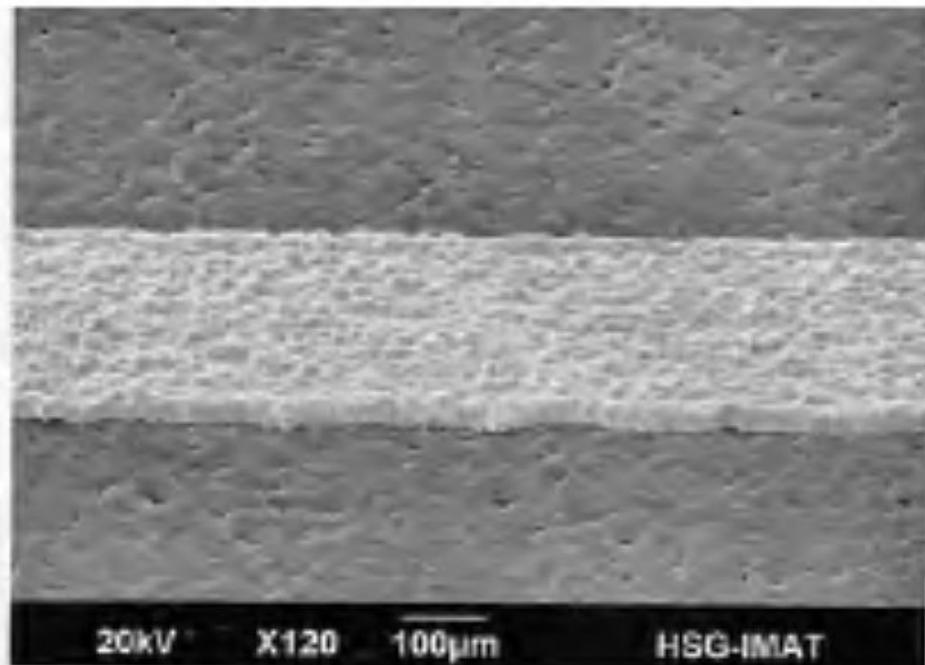
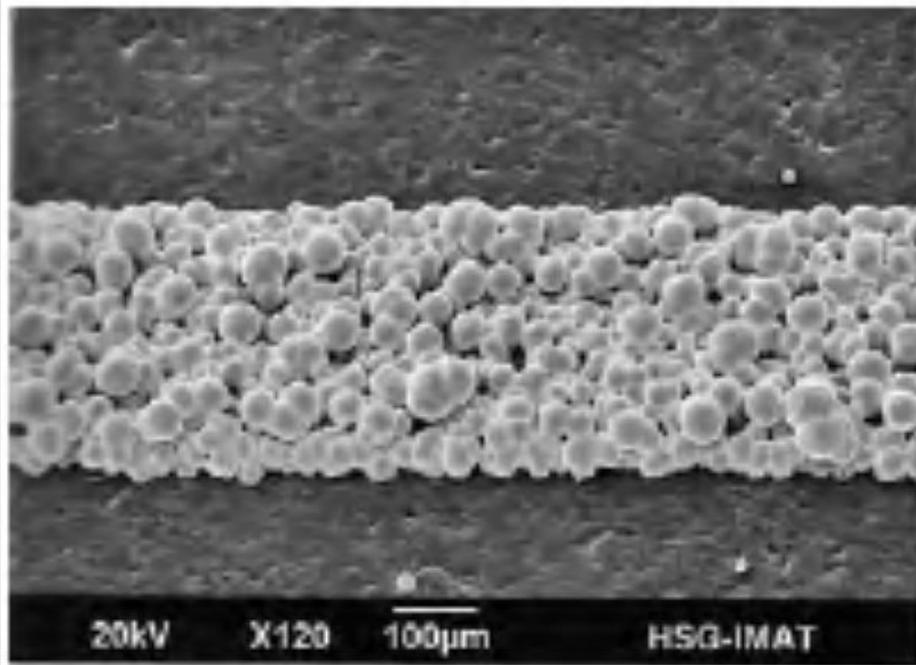
- Различие результатов лазерного микрофрезерования и прошивки:
  - а — фемтосекундное; б — пикосекундное*
-

# Технологии аддитивного производства



- Схема установки для нанесения покрытия с помощью
- инициированного лазером физического и химического травления.

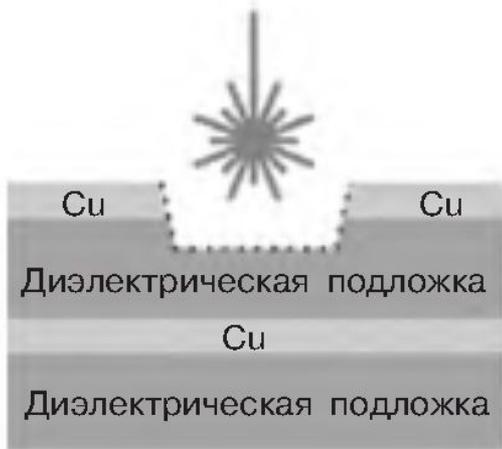
# Технологии аддитивного производства



Качество процесса микроструктурирования  
(формирование микросхемы)

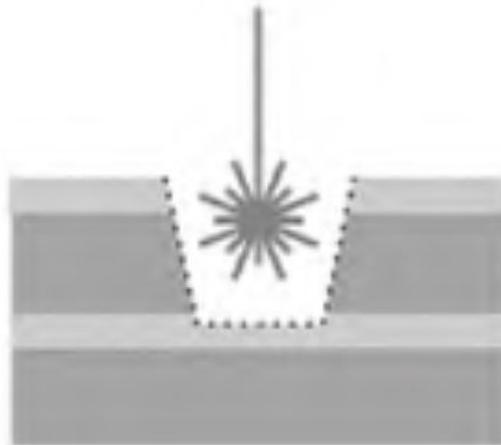
# Технологии аддитивного производства

Лазерное излучение  
большой мощности



Снятие медного покрытия

Лазерное излучение  
малой мощности



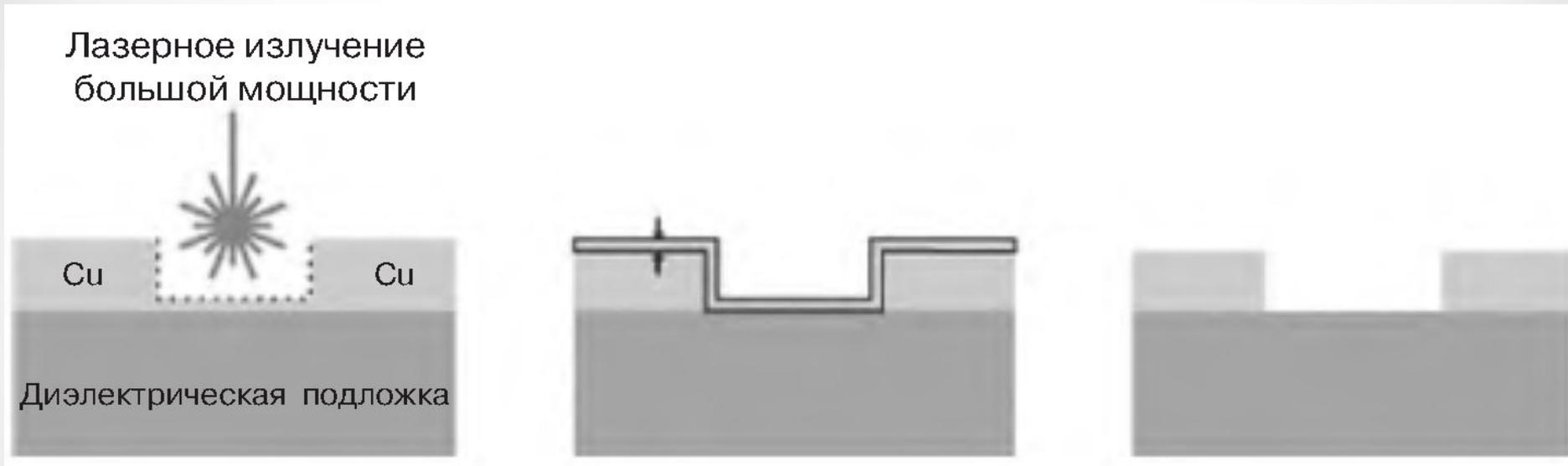
Сверление отверстия  
в подложке



Металлизация отверстия

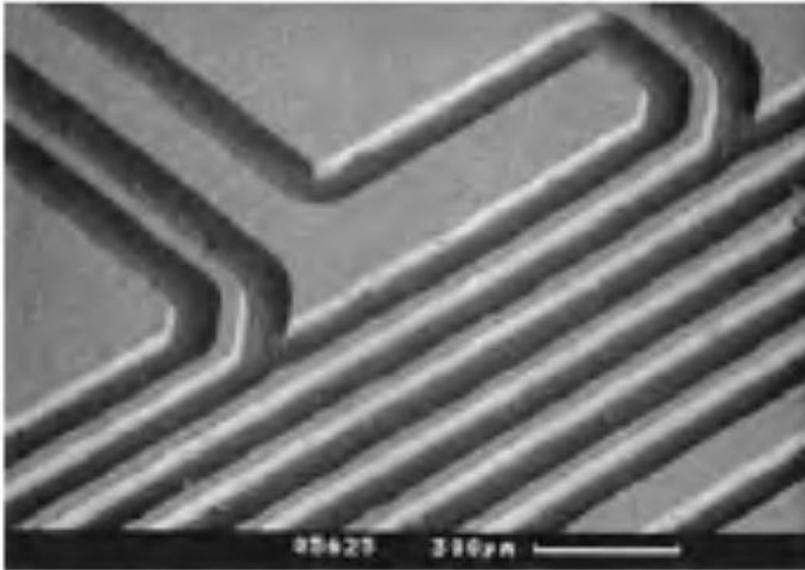
Обработка прецизионных переходных отверстий  
в многослойных материалах

# Технологии аддитивного производства

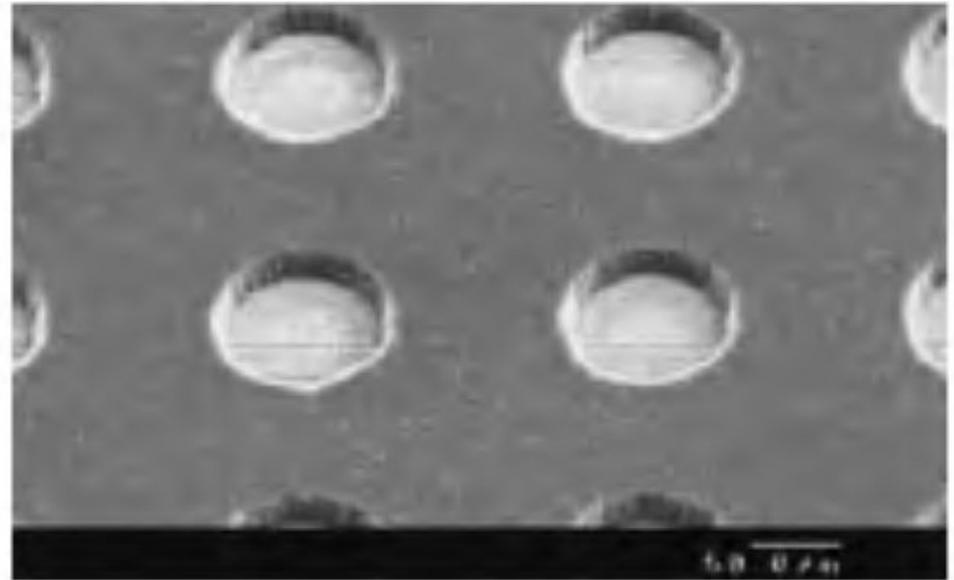


Обработка изолирующих дорожек в проводящем покрытии  
на поверхности печатной платы

# Технологии аддитивного производства



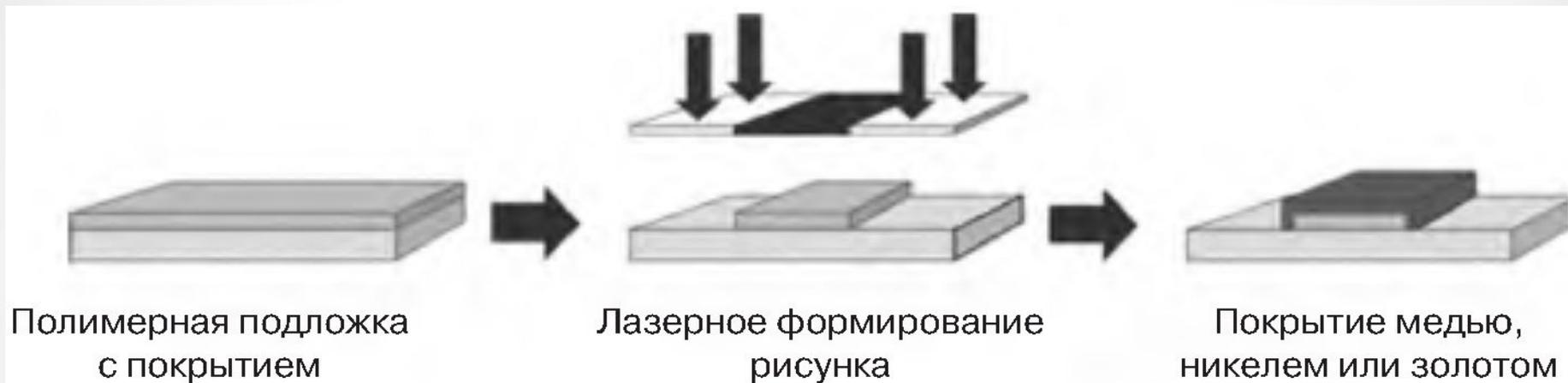
*а*



*б*

Результаты лазерного микроструктурирования:  
*а — создание бороздок на поверхности печатной платы;*  
*б — прошивка отверстий сложной формы*

# Технологии аддитивного производства



Последовательность этапов формирования проводящих дорожек на поверхности полимерного материала