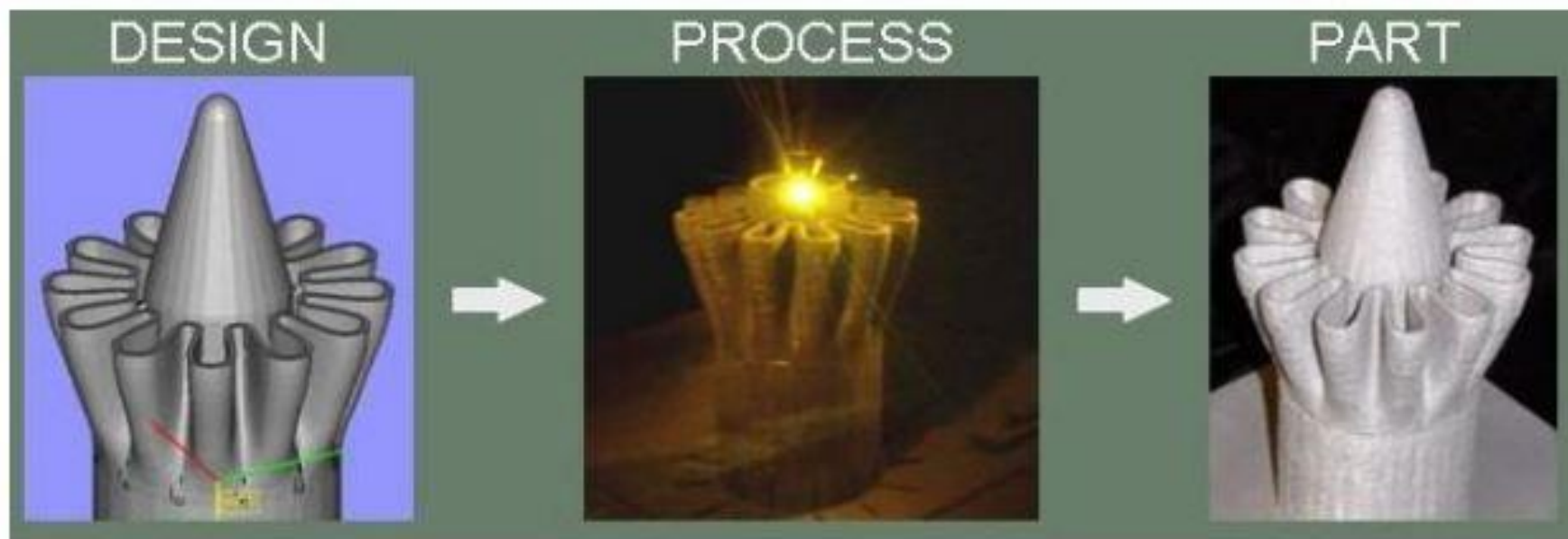
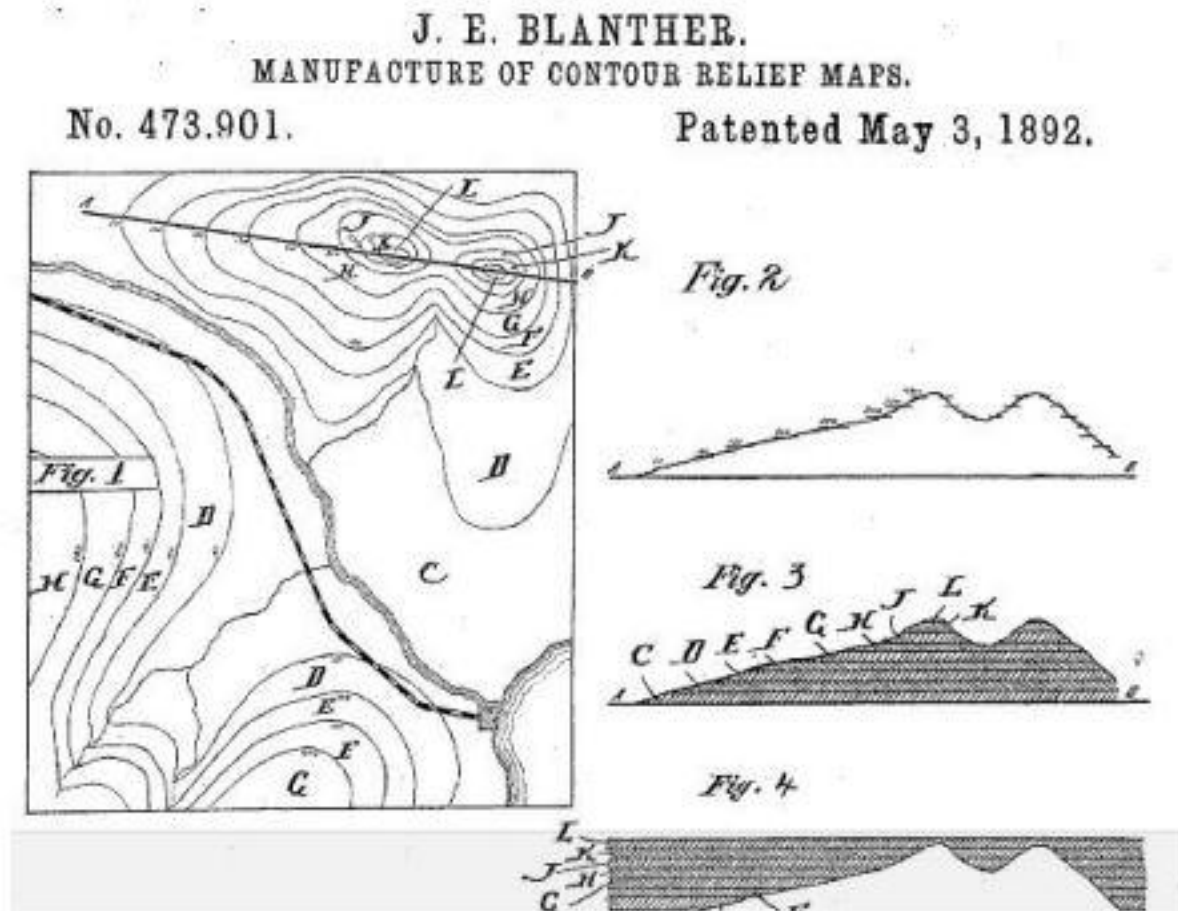


Технологии аддитивного производства



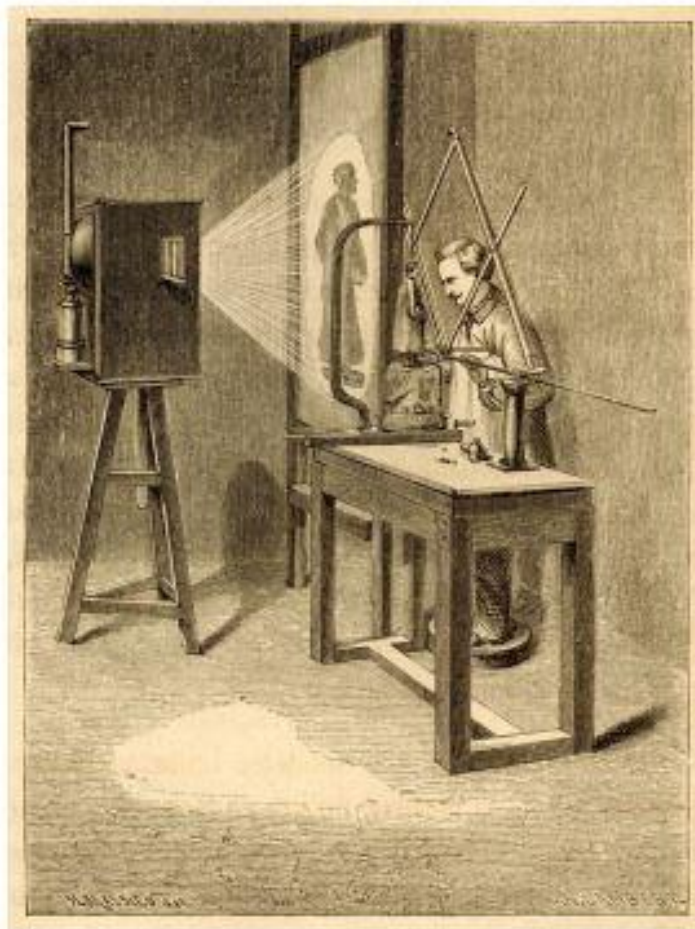
Исходная модель → Аддитивный процесс → Готовое изделие

Технологии аддитивного производства



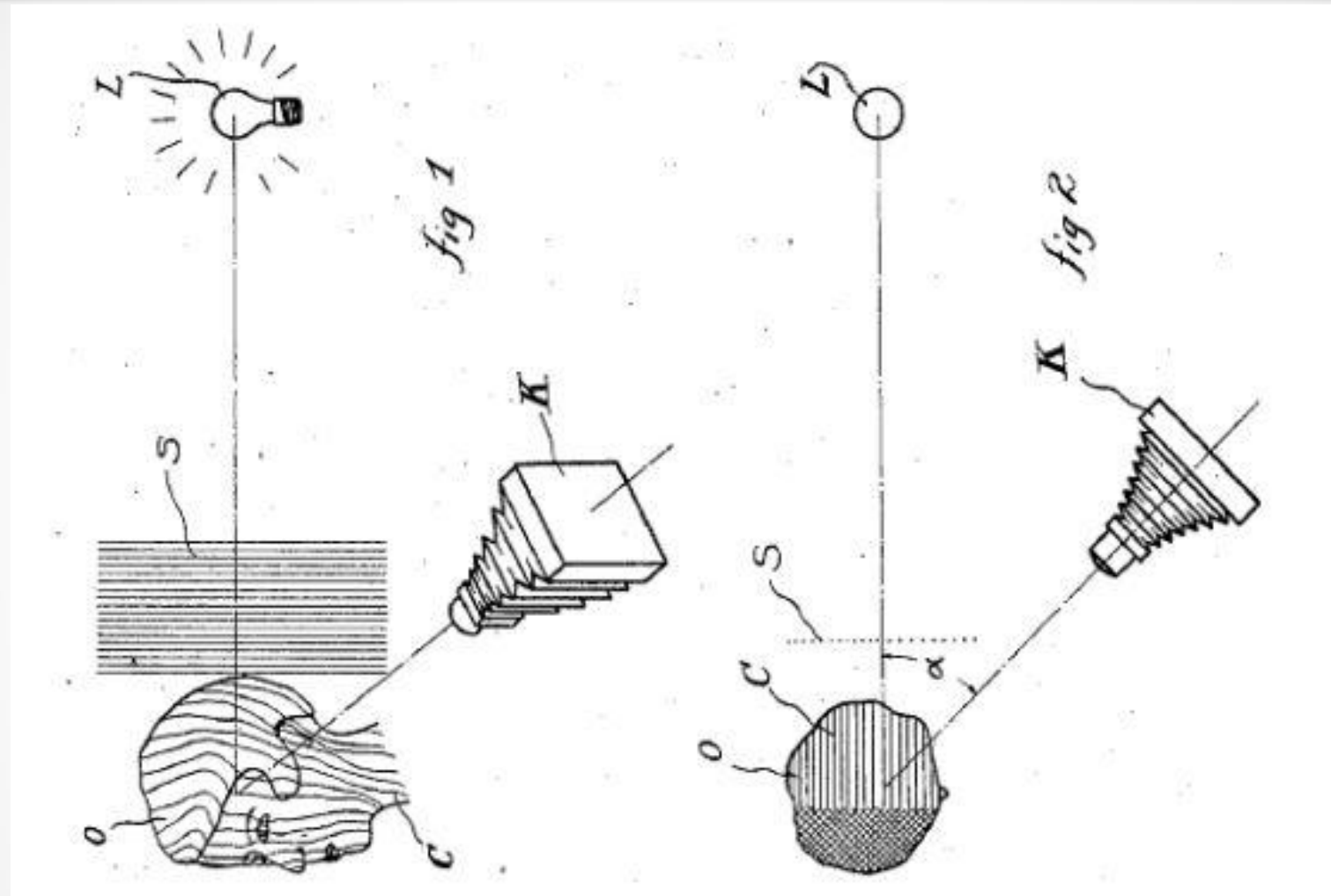
Способ изготовления топографических макетов трёхмерных карт поверхности местности

Технологии аддитивного производства



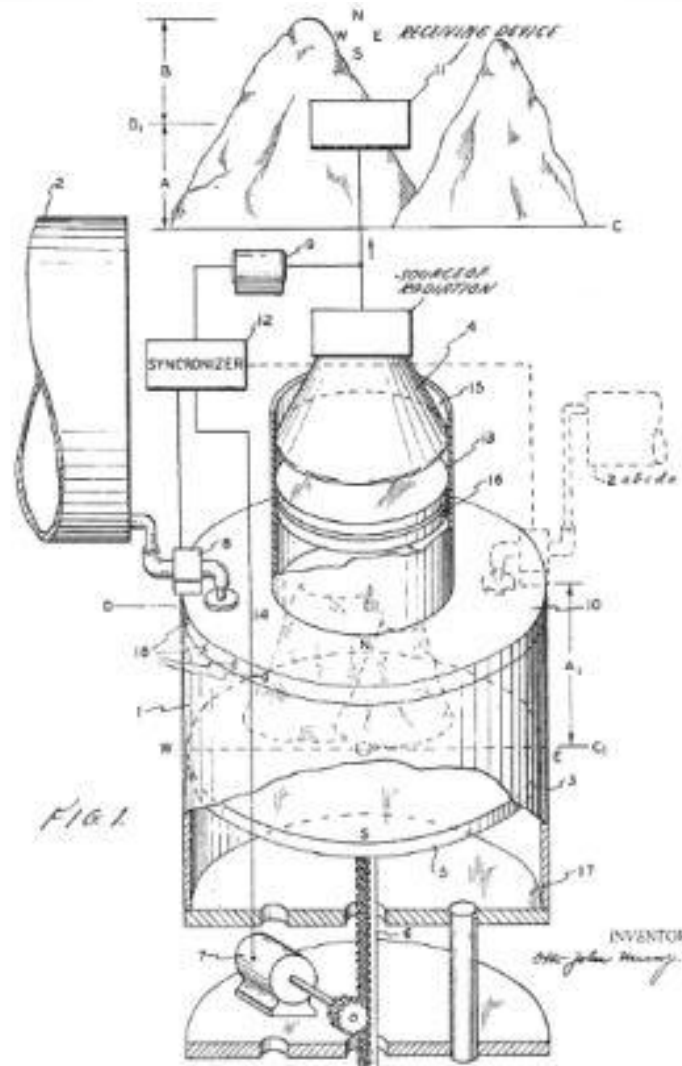
Фотоскульптура на основе
одномоментного фотографирования

Технологии аддитивного производства



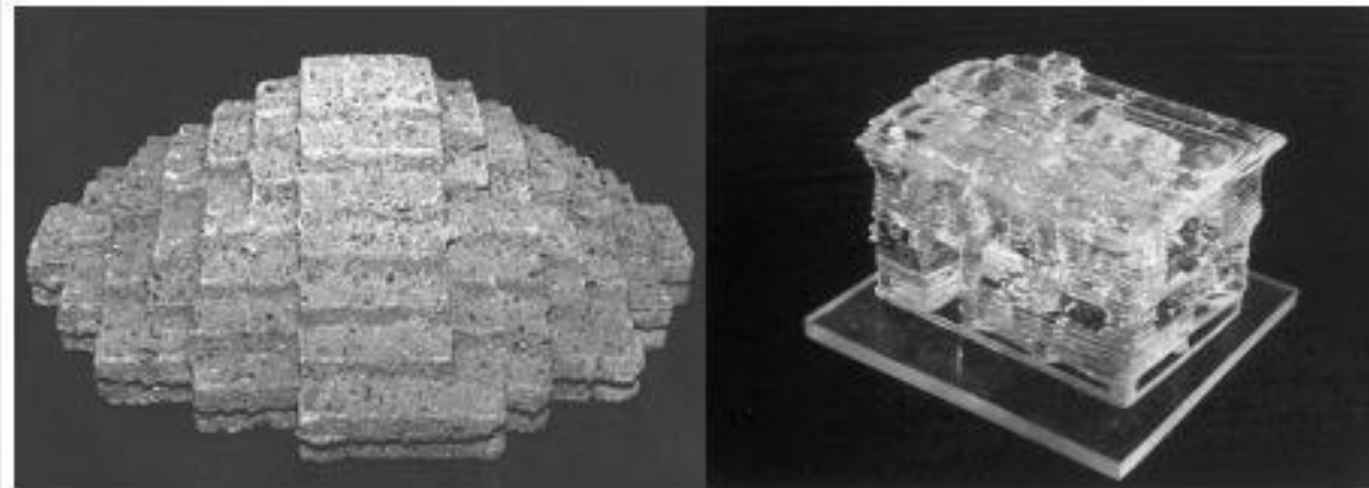
Способ создания рельефа с помощью фотографии

Технологии аддитивного производства



Способ селективной (послойной) экспозиции прозрачной фотоэмульсии

Технологии аддитивного производства

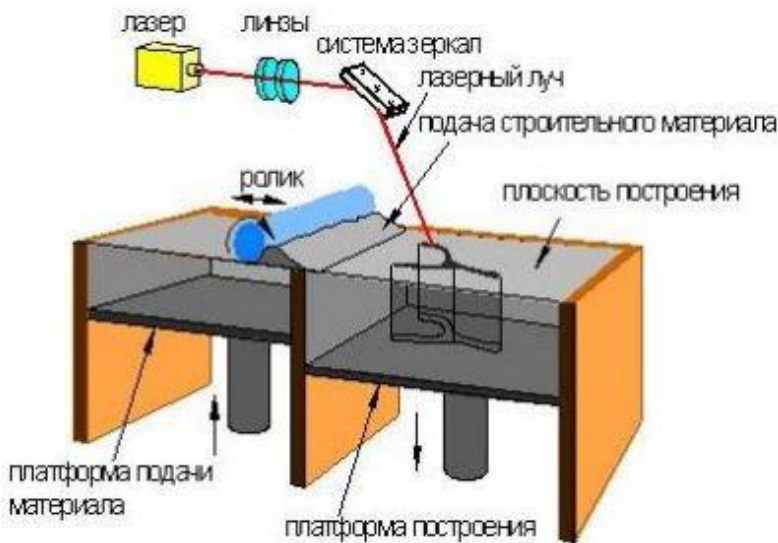


Образцы моделей из фотополимеров

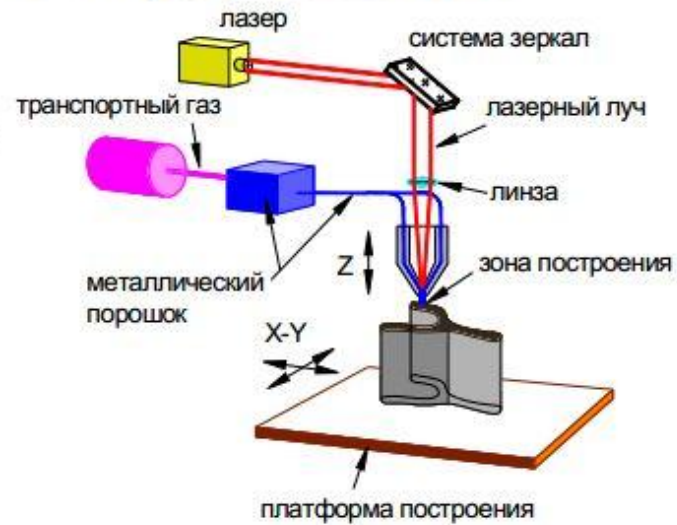
Технологии аддитивного производства

Аддитивные технологии

Классификация: по методу формирования слоя



а – Bed Deposition



б – Direct Deposition



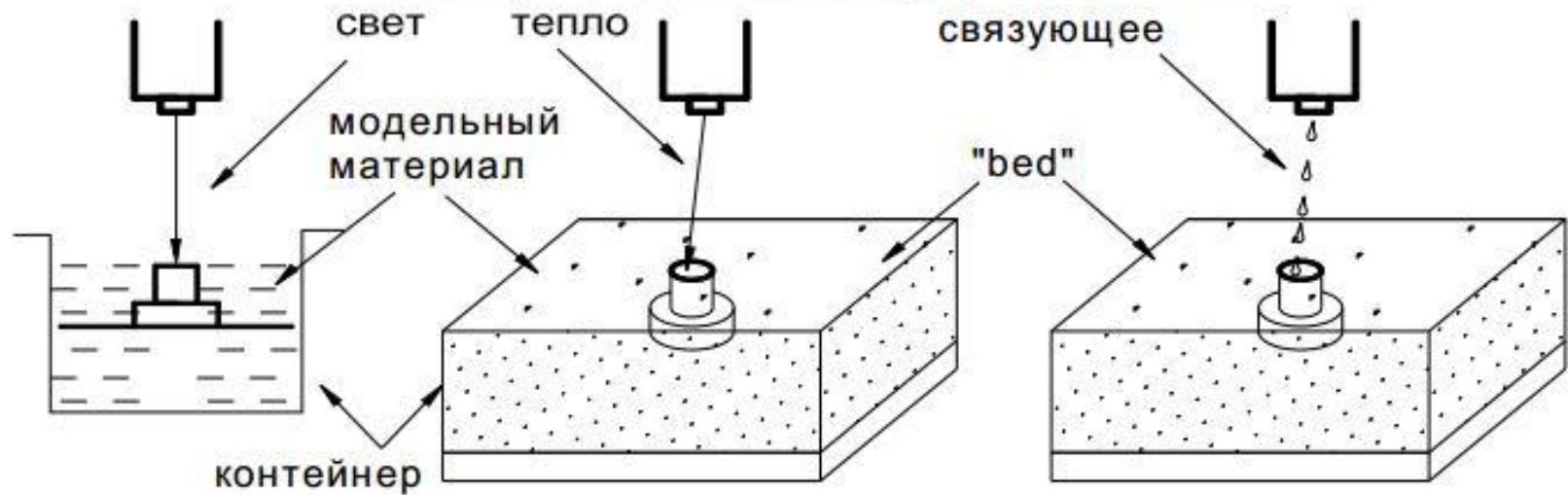
(Источник: www.ipmd.net)

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

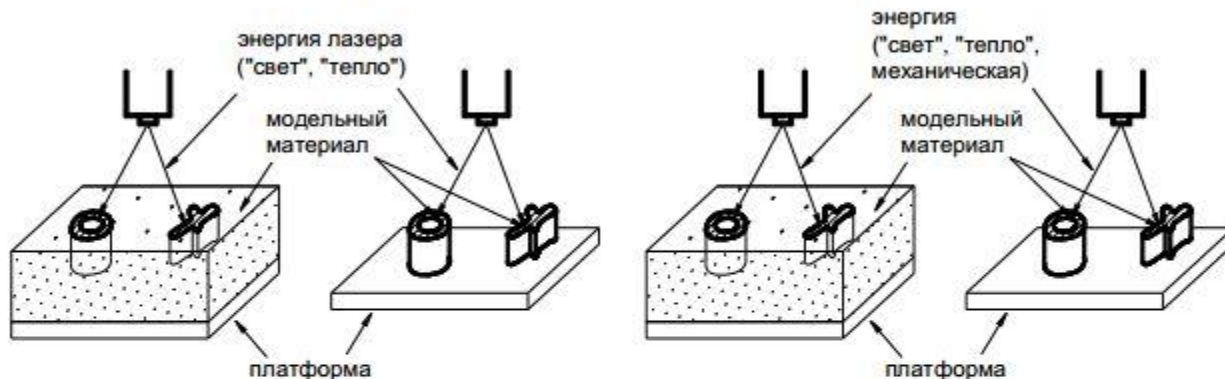
Технологии аддитивного производства

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;

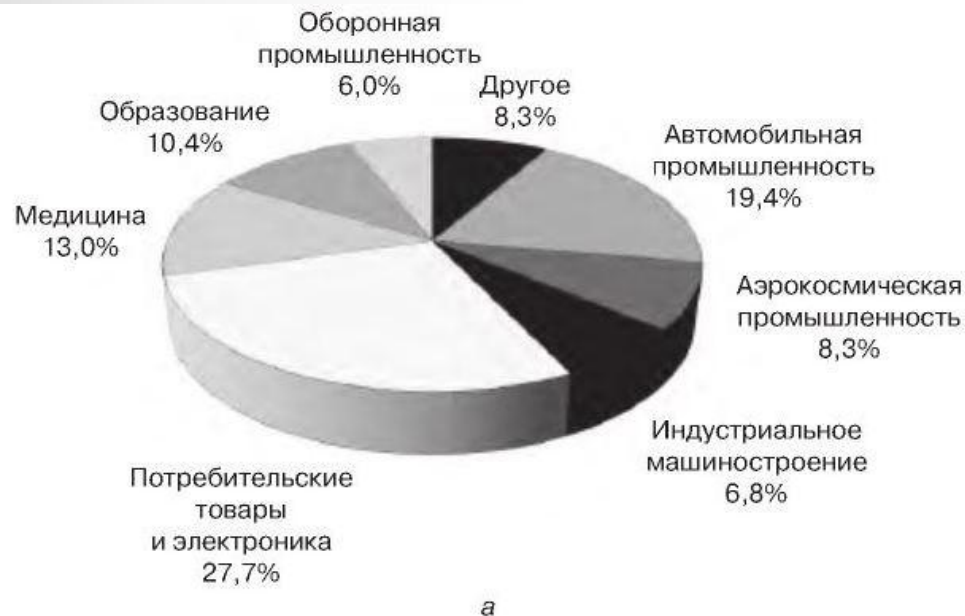
5. Vat Photopolymerization – «фотополимеризация в ванне» или послойное отверждение фотополимерных смол;

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;

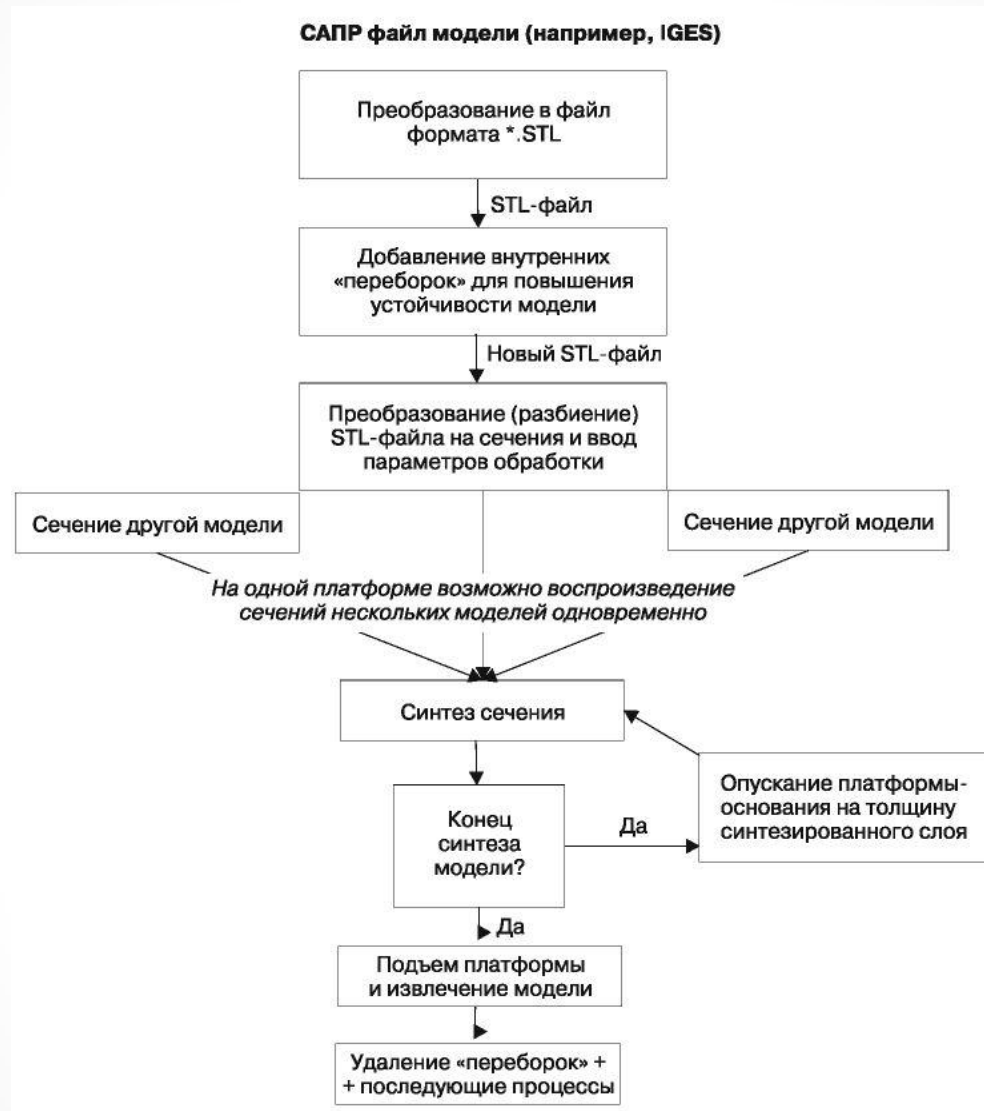
б - по странам.

Технологии аддитивного производства



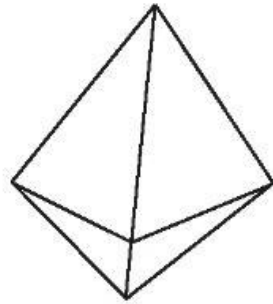
Задачи, решаемые аддитивными технологиями

Технологии аддитивного производства

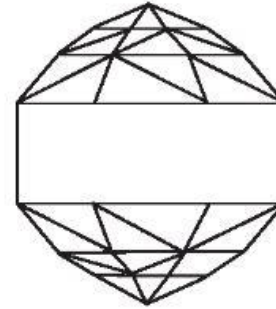


- Блок-схема управляющей программы обработки с STL-файлом •

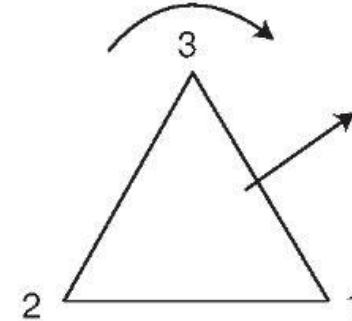
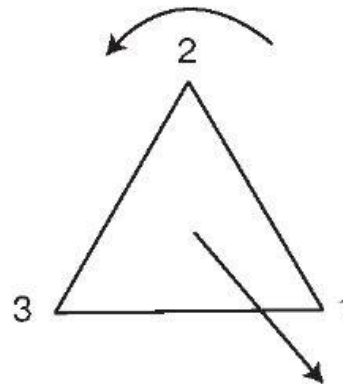
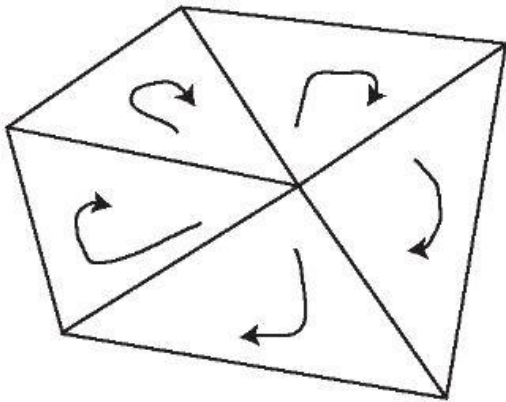
Технологии аддитивного производства



Грубое сглаживание
сферы

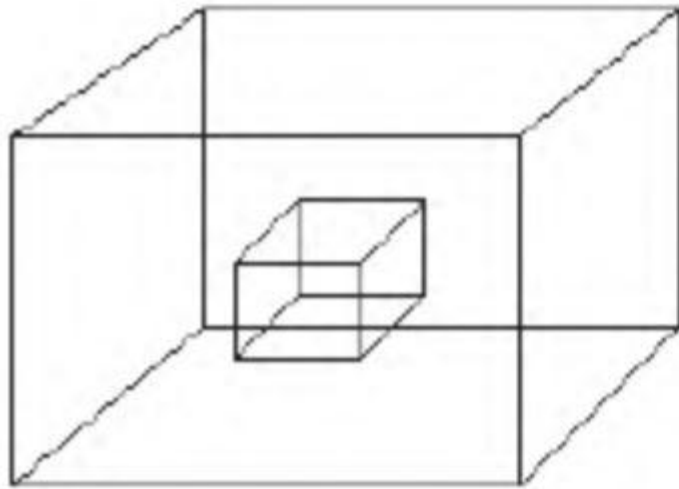


Тонкое сглаживание
сферы



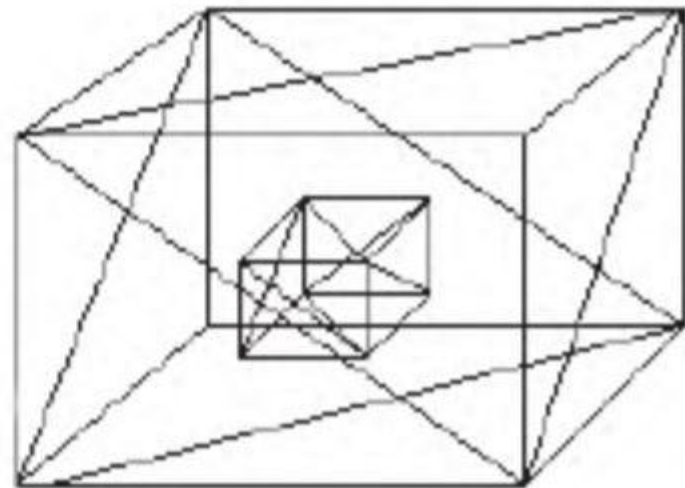
Триангуляция сферы, правила обхода вершин треугольников
на поверхности 3D-объектов
и направление нормали ячейки в формате STL

Технологии аддитивного производства



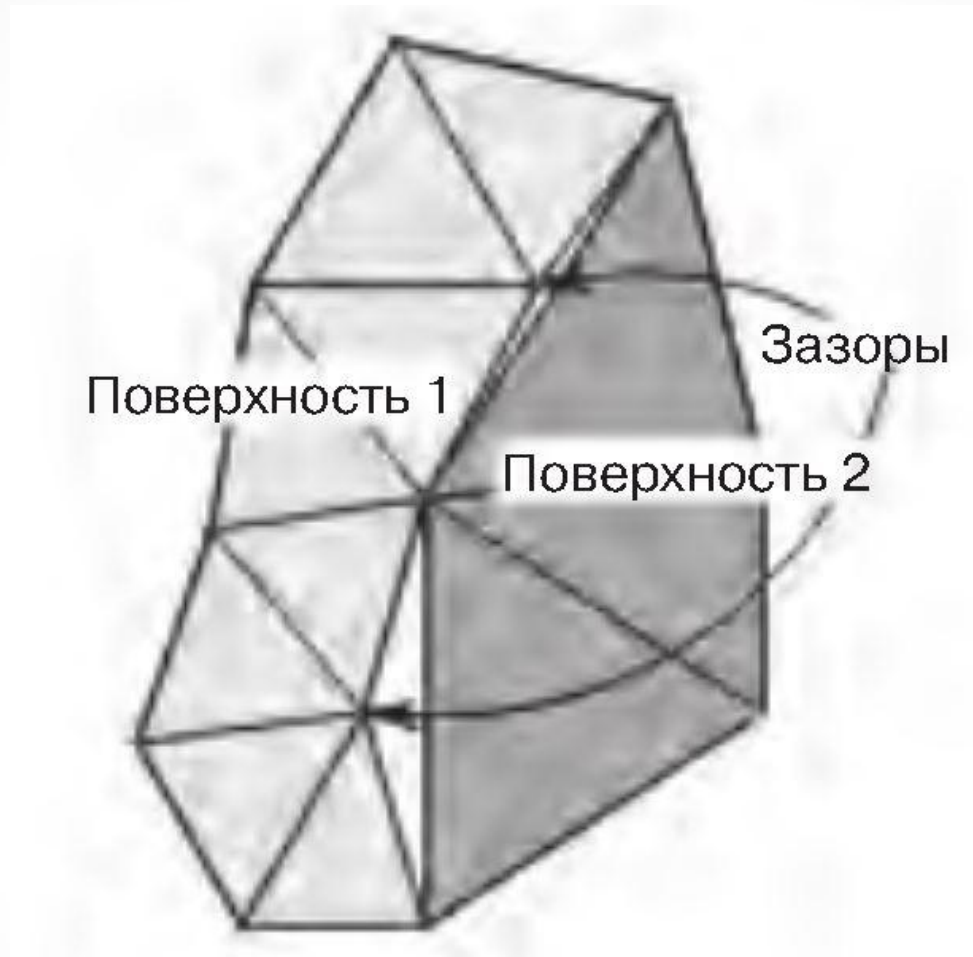
Пустотелый блок

STL триангуляция блока



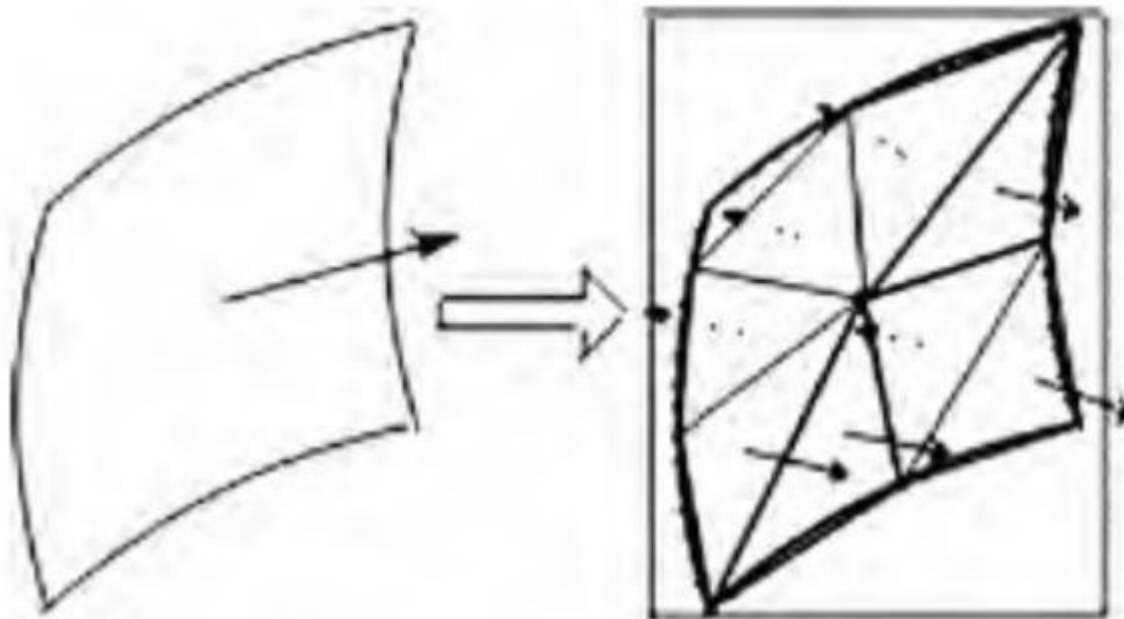
Метод поиска промежутков (пустоты) в объекте

Технологии аддитивного производства



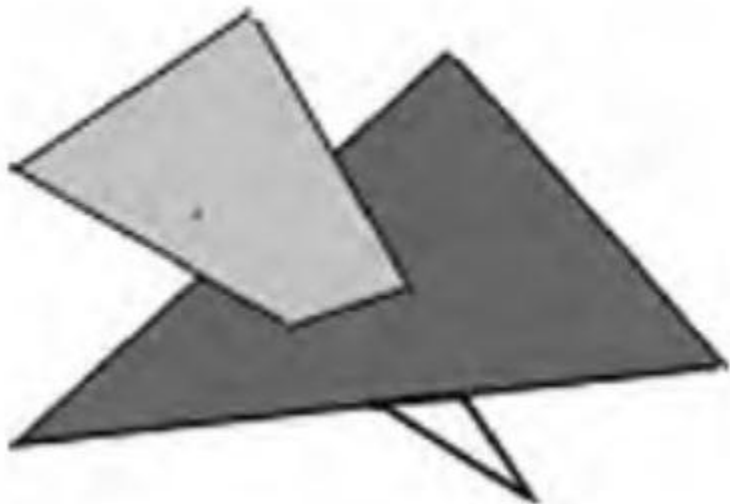
Зазоры в STL-файле (*отсутствие четкого различия между внутренней и внешней областями*)

Технологии аддитивного производства

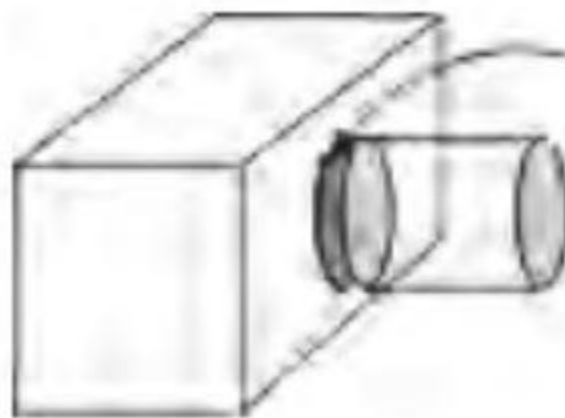


Обращенные нормали в ячейке
(нормали не согласованы с направлением исходной поверхности)

Технологии аддитивного производства



Пересечение двух треугольников
не по сторонам
(возникновение перекрывающихся
ячеек)



Внутренняя стенка

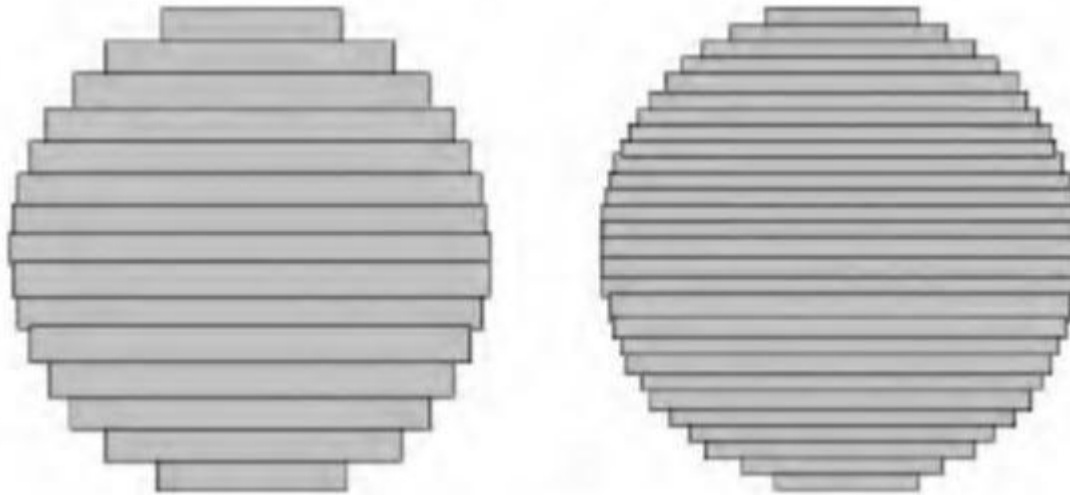
Ошибка STL-модели с
появлением внутренней стенки
(неоднородное затвердевание
материала)

Технологии аддитивного производства



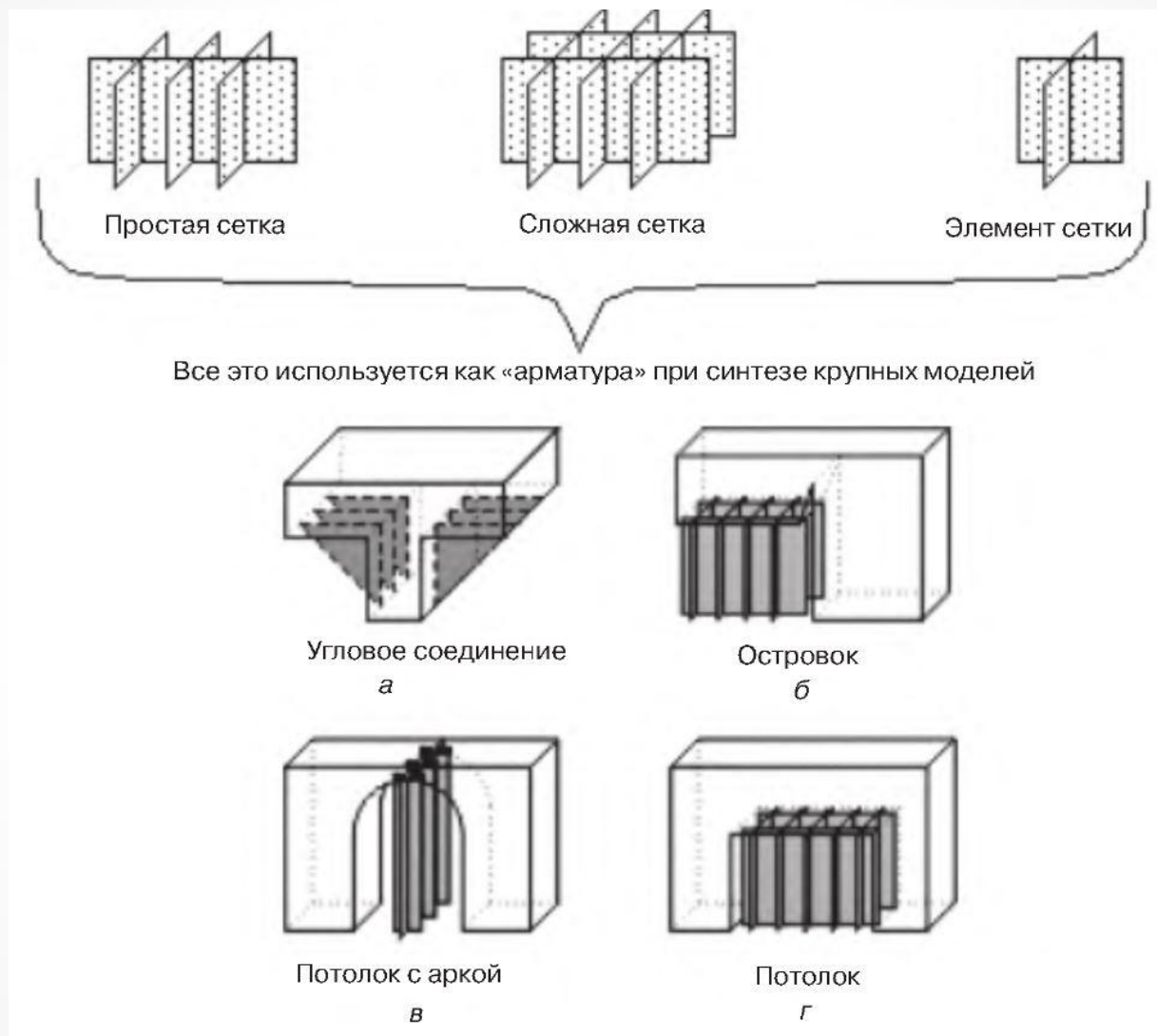
Оптимальные направления наращивания при прототипировании *(в соответствии с основными параметрами процесса)*

Технологии аддитивного производства



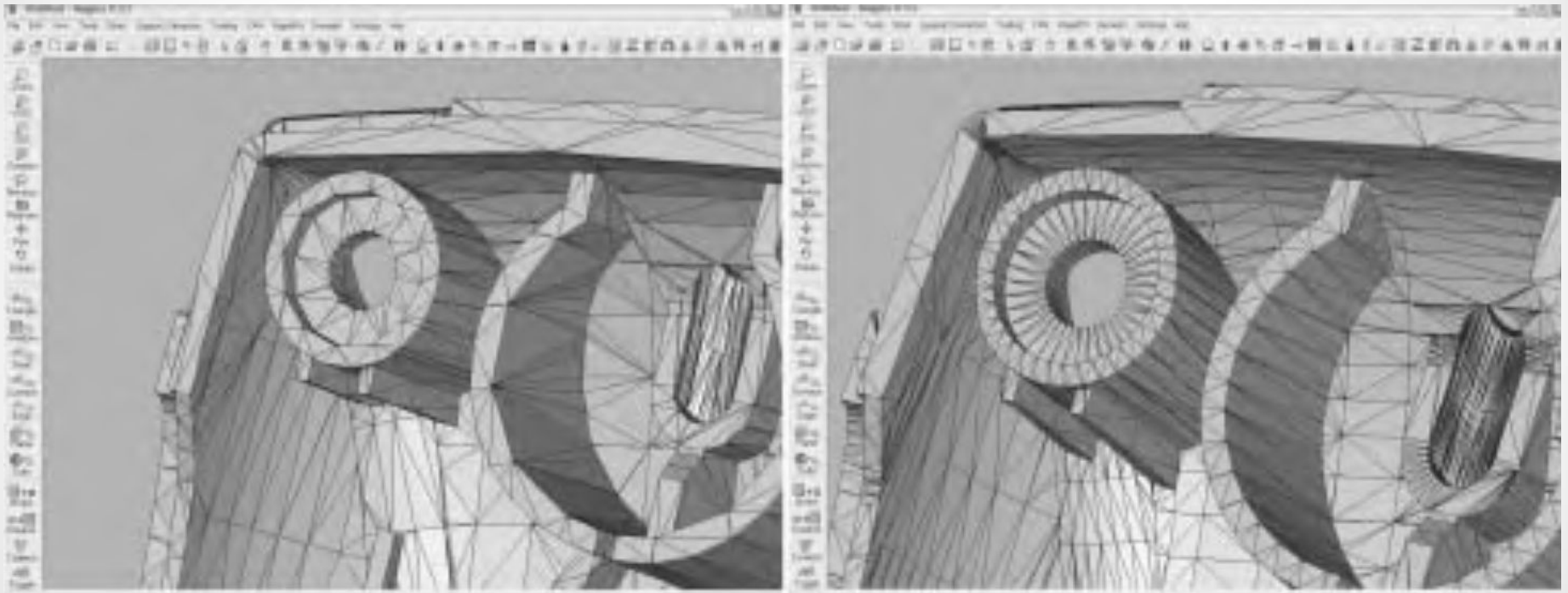
Ступенчатый вид кривой поверхности при прототипировании

Технологии аддитивного производства



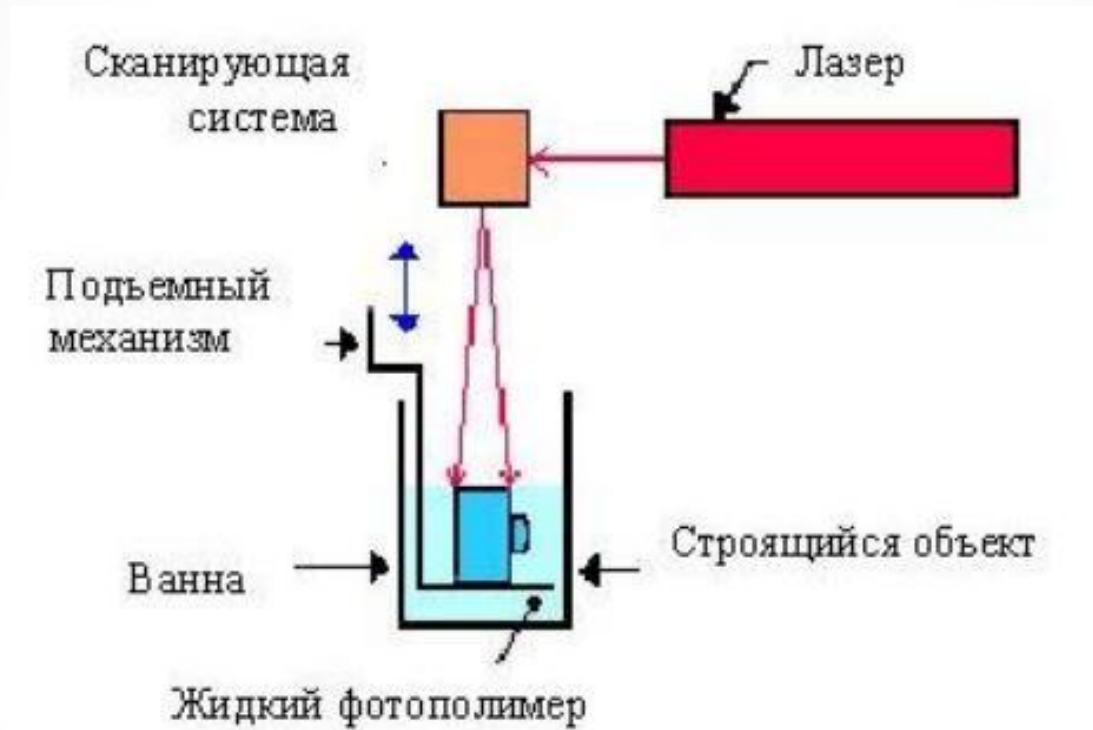
Примеры поддержек при прототипировании:
а – клин; *б* – островок; *в*, *г* – потолок.

Технологии аддитивного производства



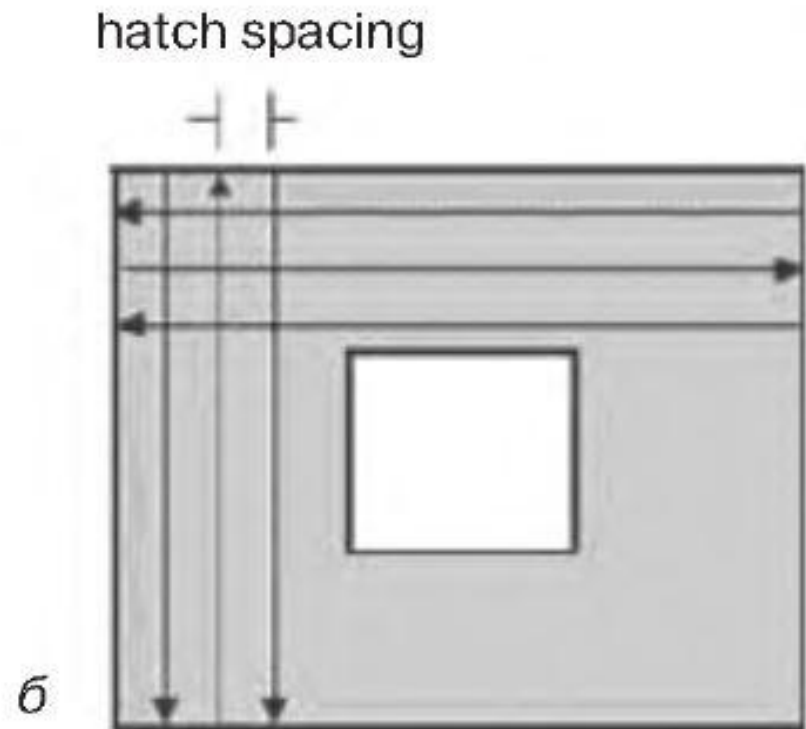
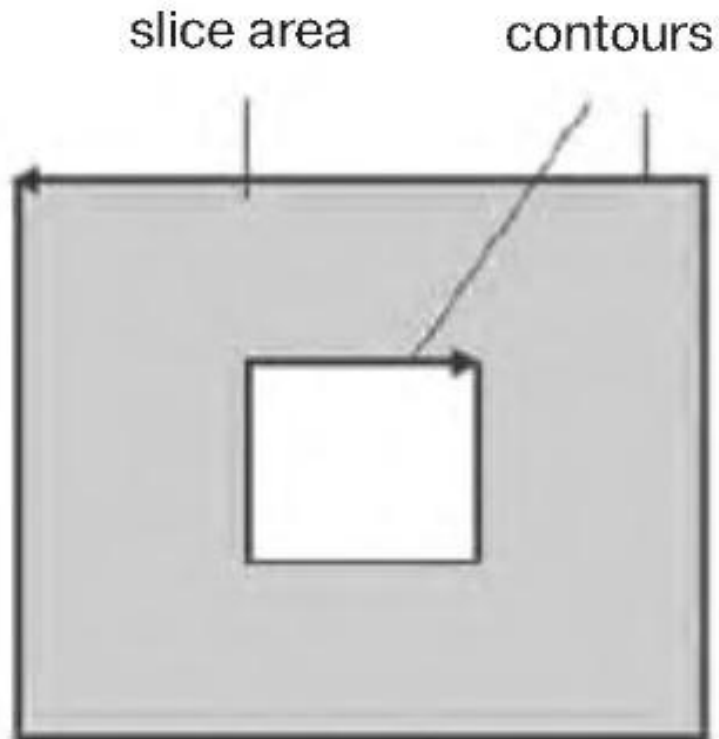
Влияние выбора разрешения на детальность представления модели
(слева – грубая установка, справа – точная установка)

Технологии аддитивного производства



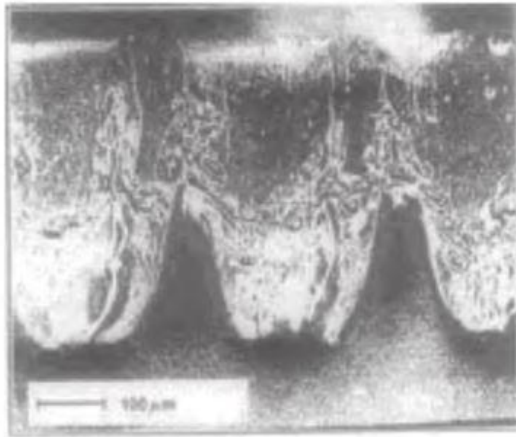
Технология лазерной стереолитографии с использованием жидких модельных материалов

Технологии аддитивного производства

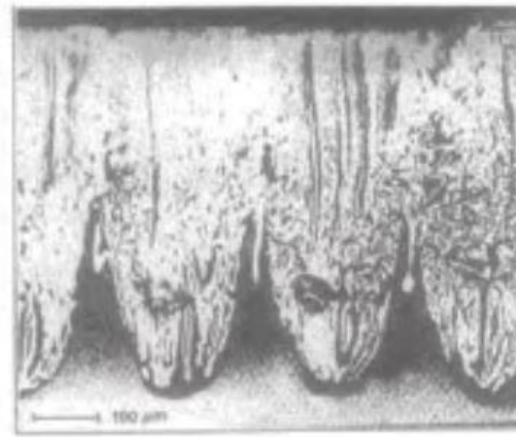


Методика обхода лазерного излучения при сканировании поверхности:
а – контур; б – штриховка.

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

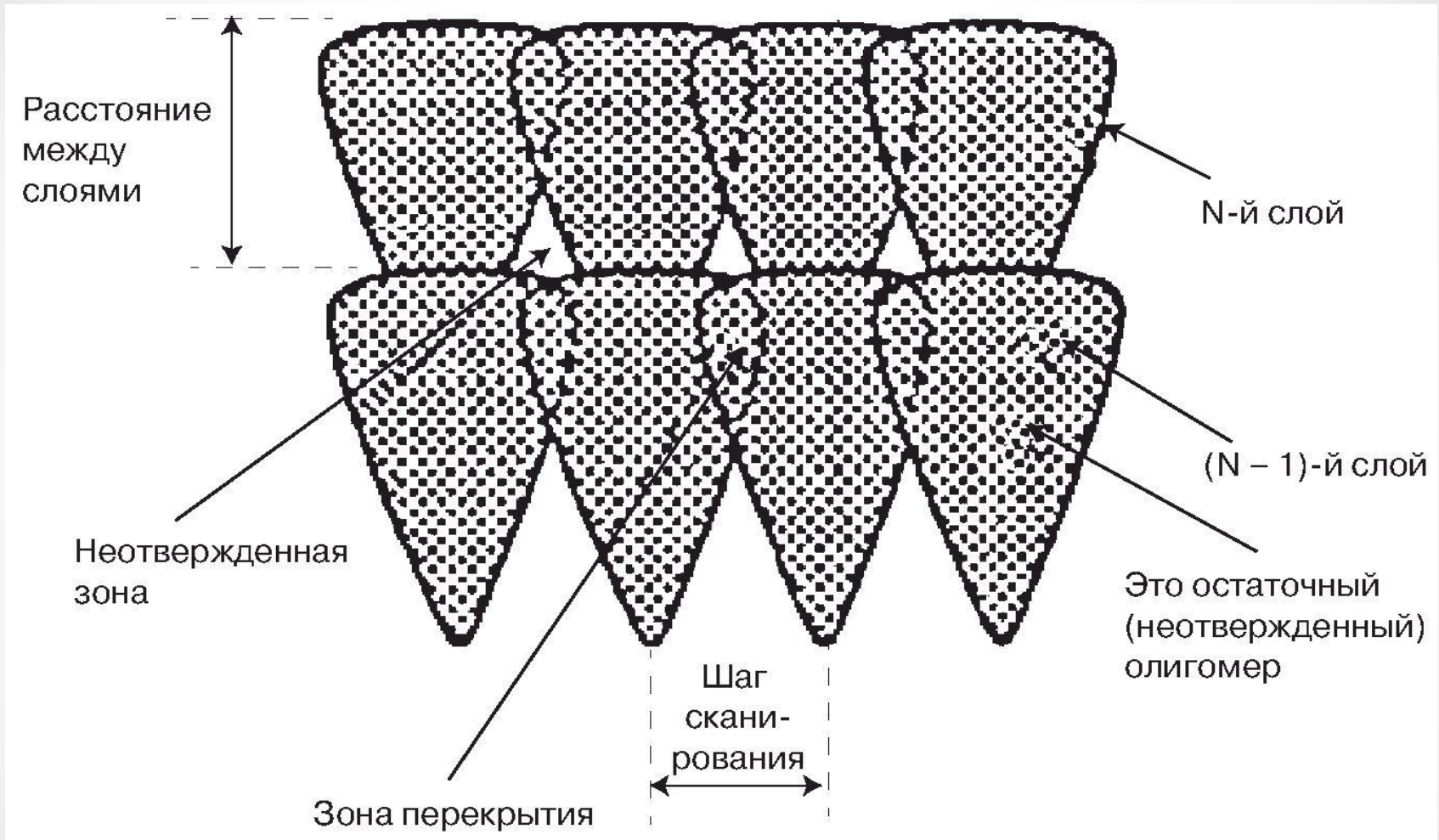


Схема организации многопроходной обработки при послойной полимеризации

Технологии аддитивного производства

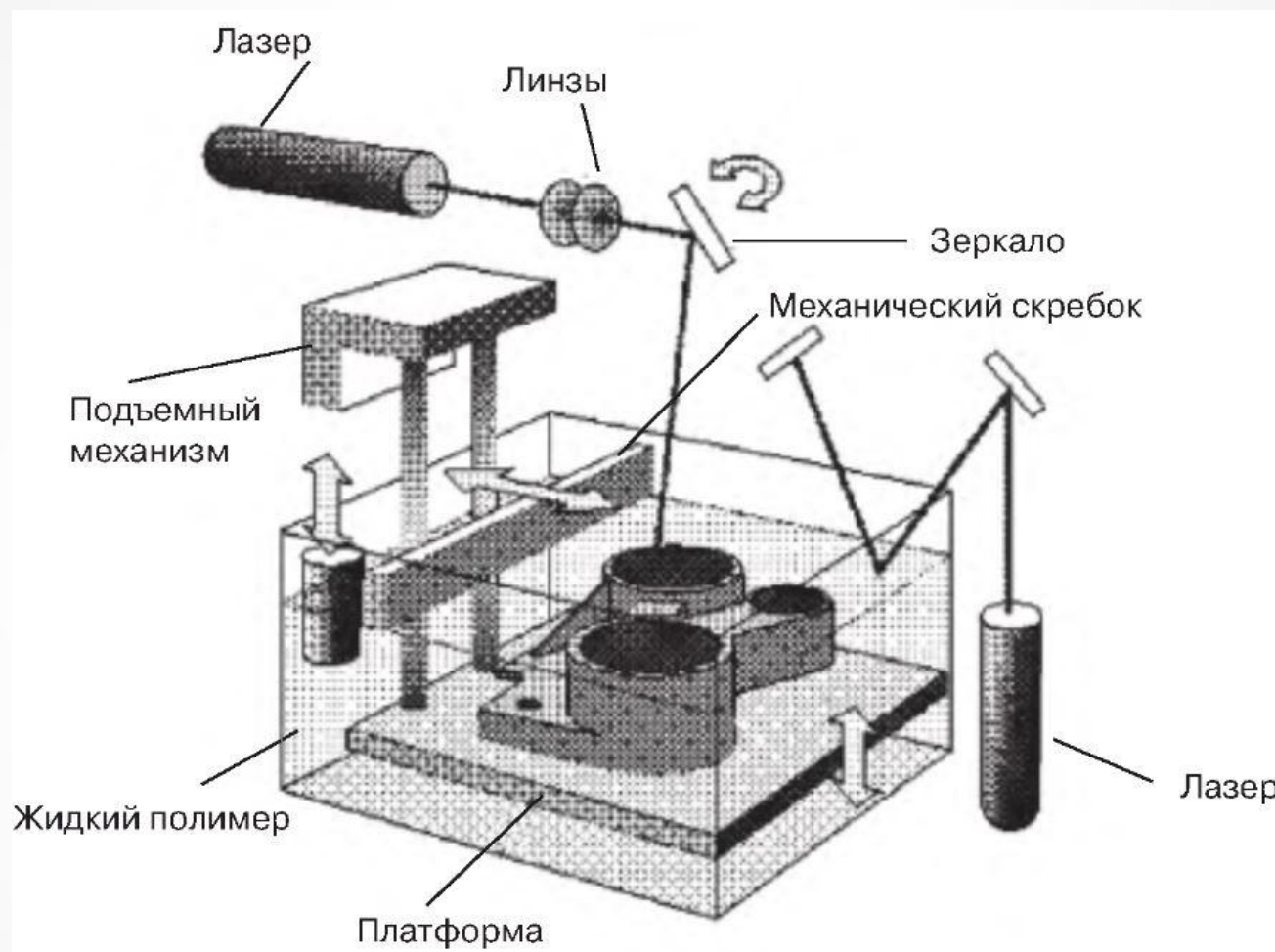
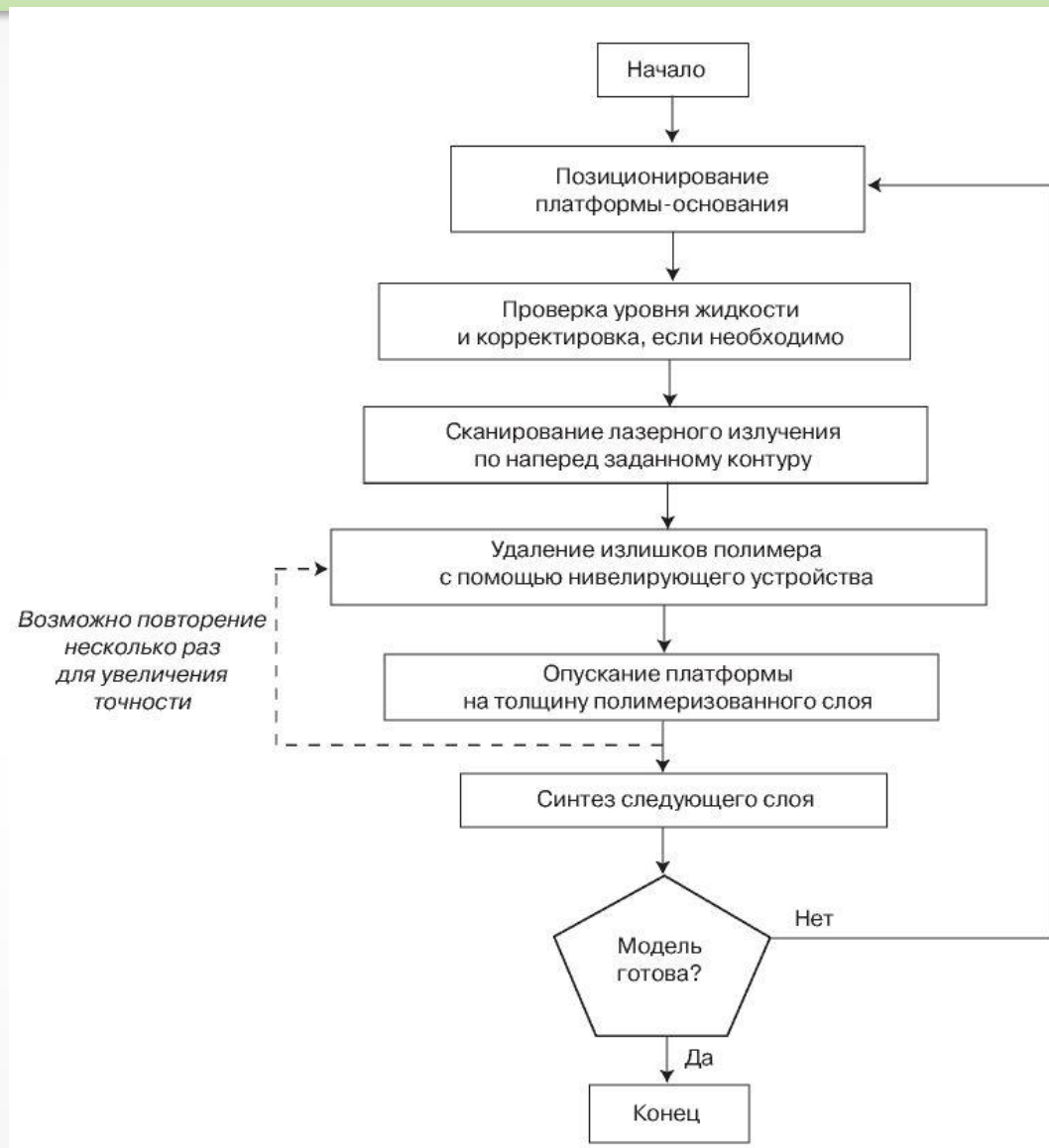


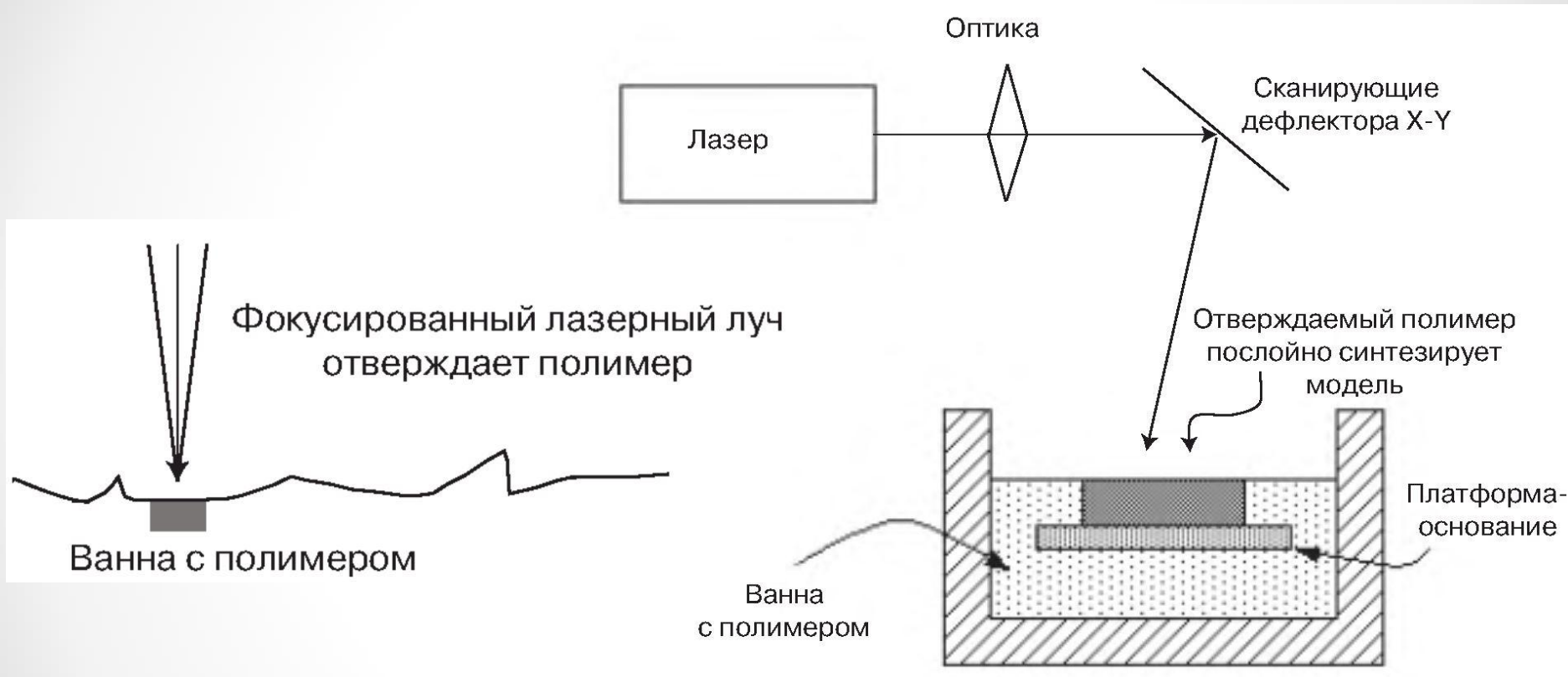
Схема установки для лазерной стереолитографии

Технологии аддитивного производства



- Программная блок-схема процесса лазерной стереолитографии •

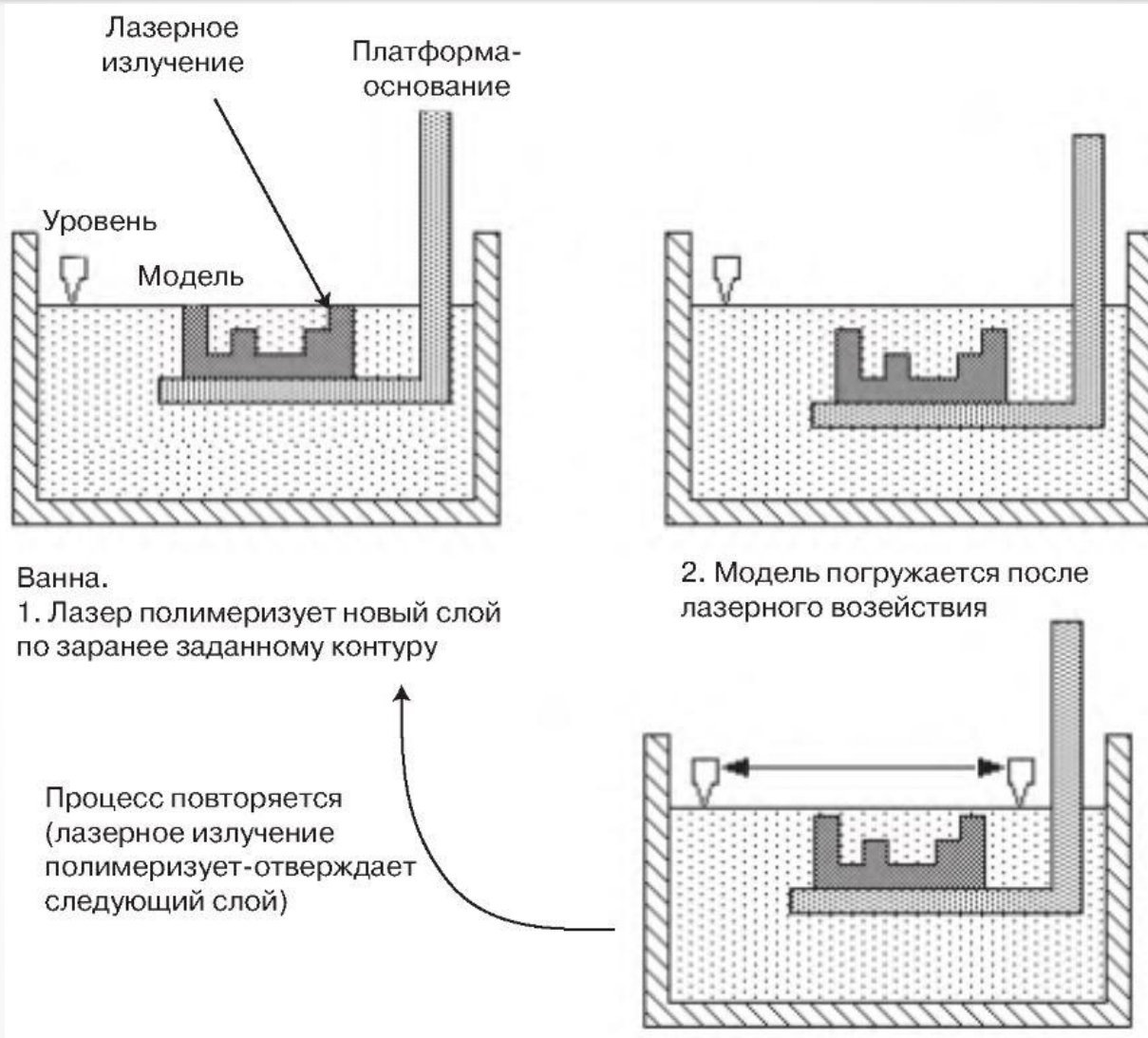
Технологии аддитивного производства



Позиционирование
лазерного излучения
на поверхности полимера

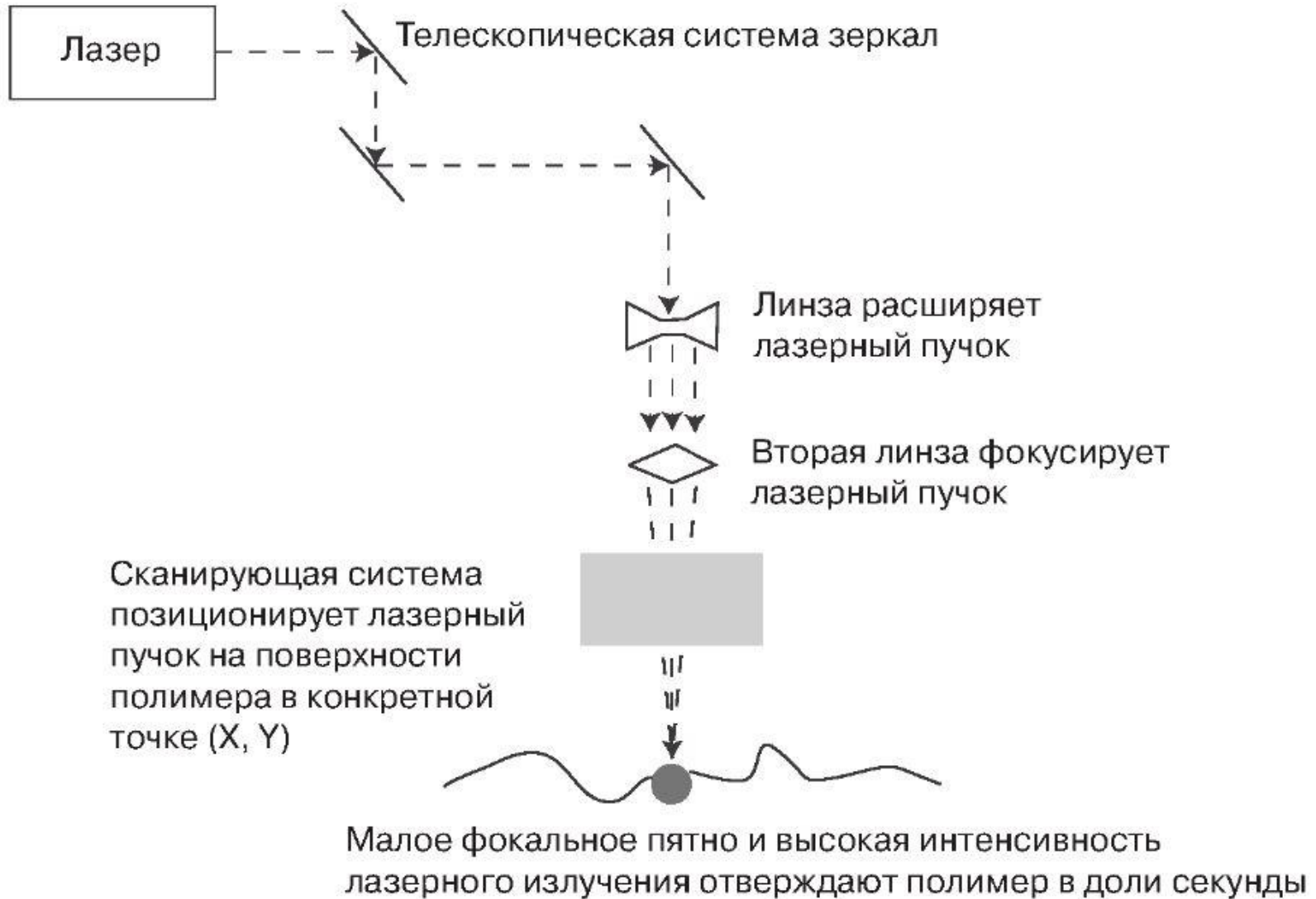
Синтез слоя

Технологии аддитивного производства



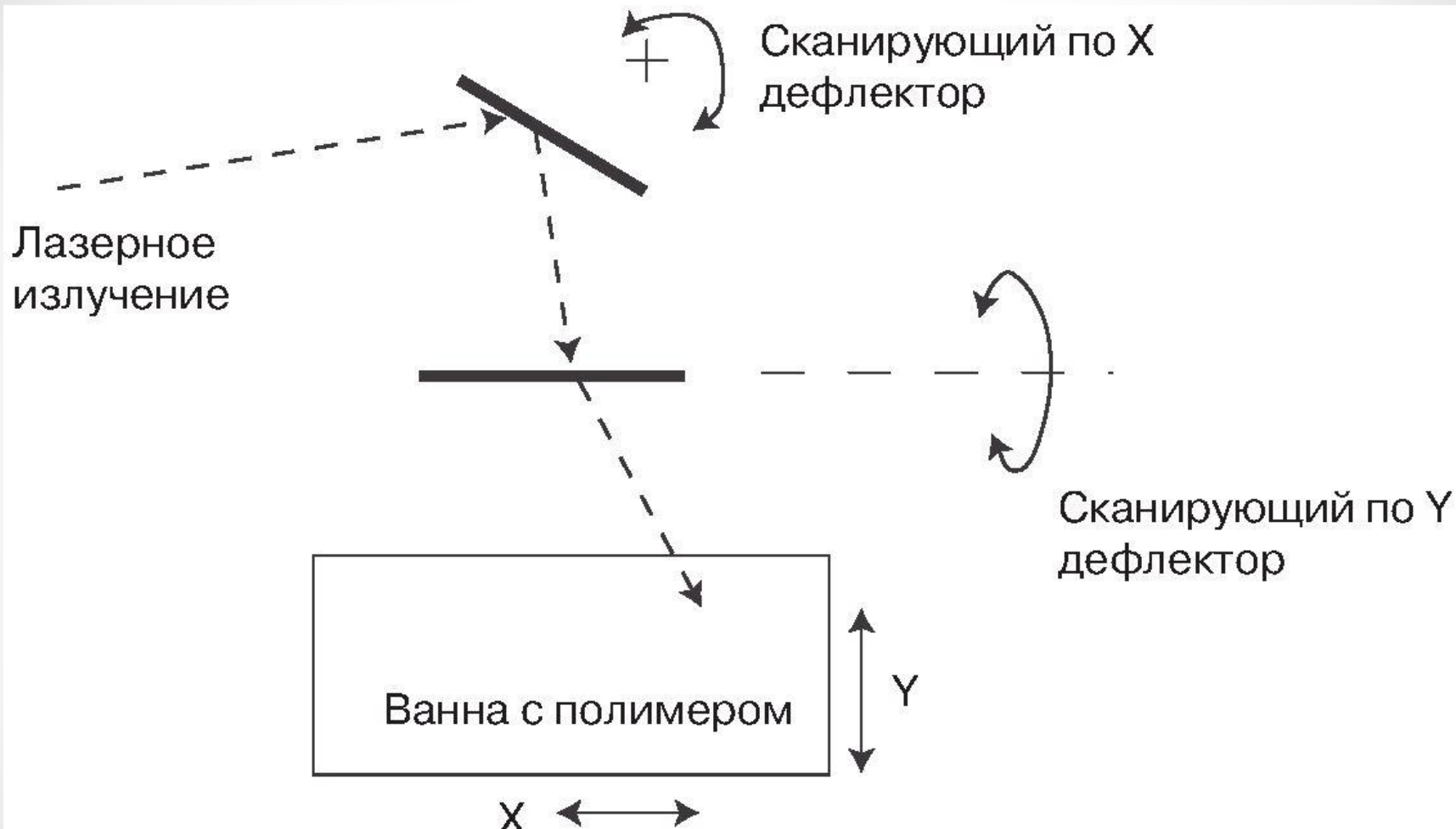
Шаги платформы за цикл синтеза

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 ³	250 × 250 × 250 мм ³	250 × 250 × 250 мм ³
<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 ³	508 × 508 × 584 мм ³	508 × 508 × 600 мм ³	250 × 250 × 250 мм ³
<i>Объем</i>				
Литры (галлоны)	99,3 (25,6)	253,6 (67)		32,2 (8,5l)
<i>Лазер</i>				
Тип	Solid-State (Nd:YVO ₄)			
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

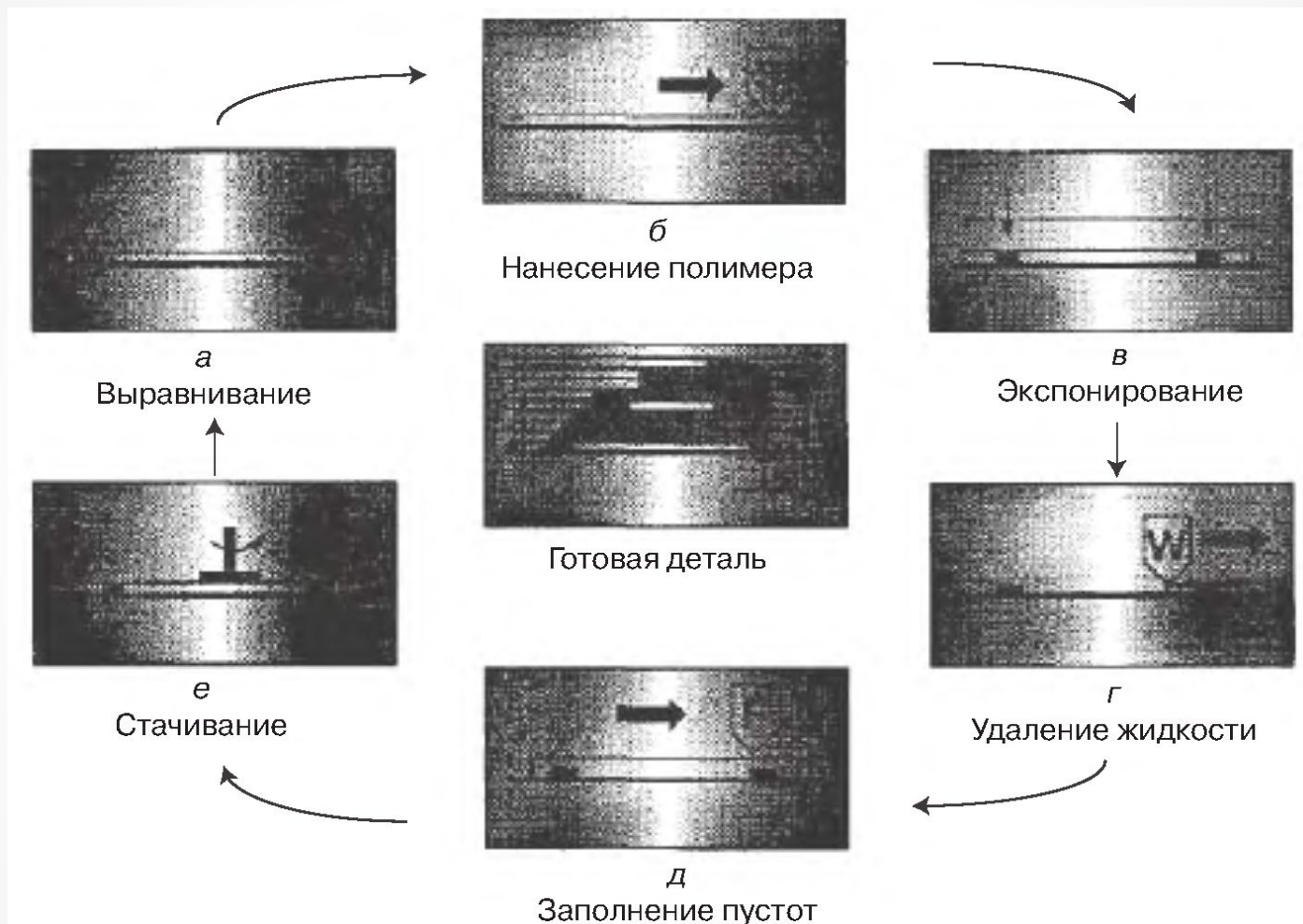
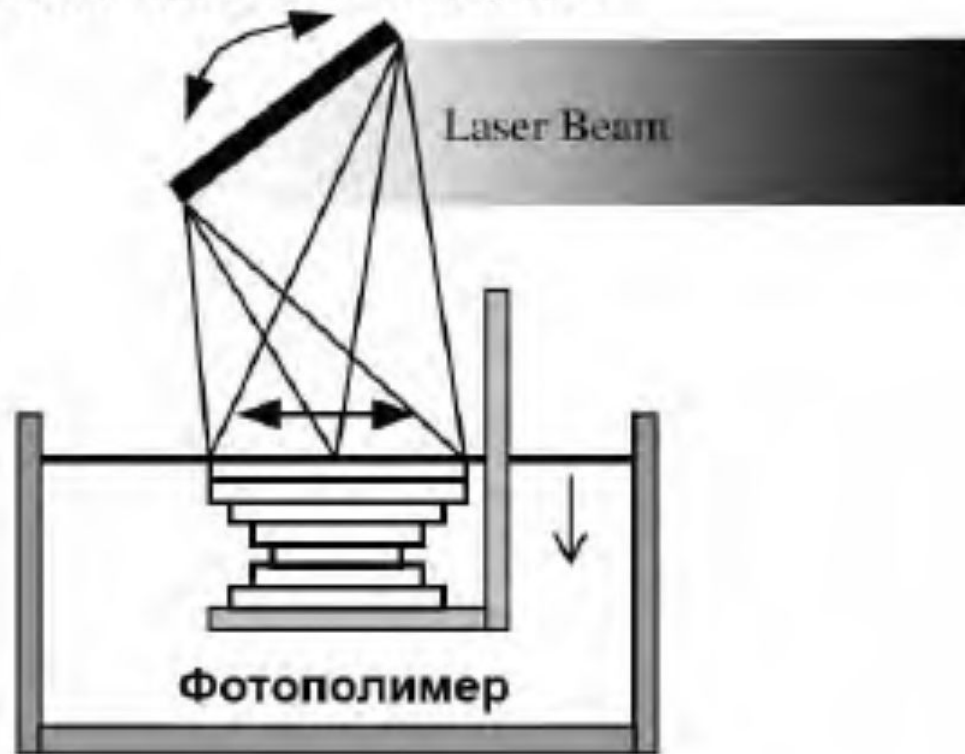


Схема процесса отверждения на твердом основании

Технологии аддитивного производства



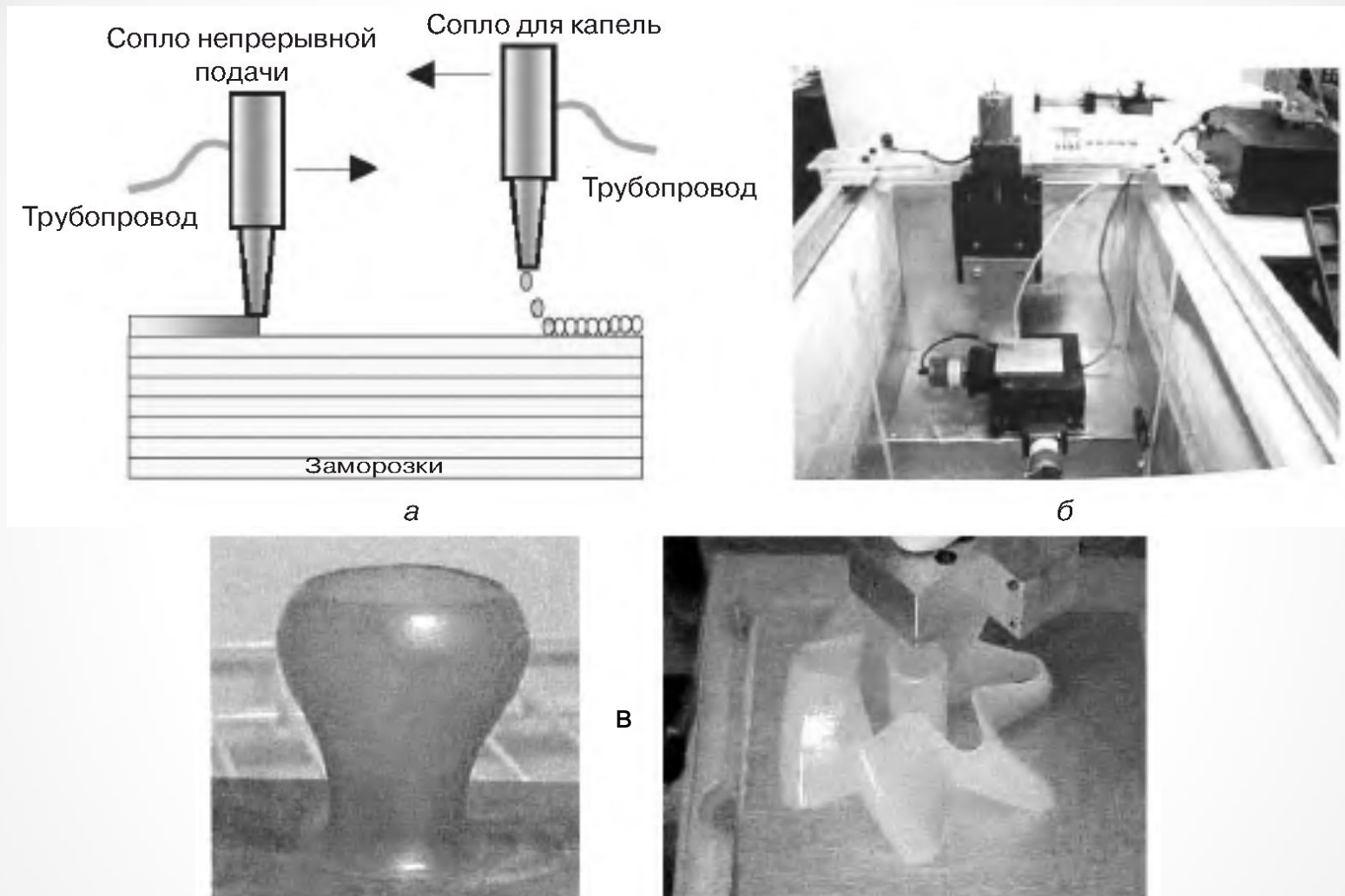
Гальвано система зеркал



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

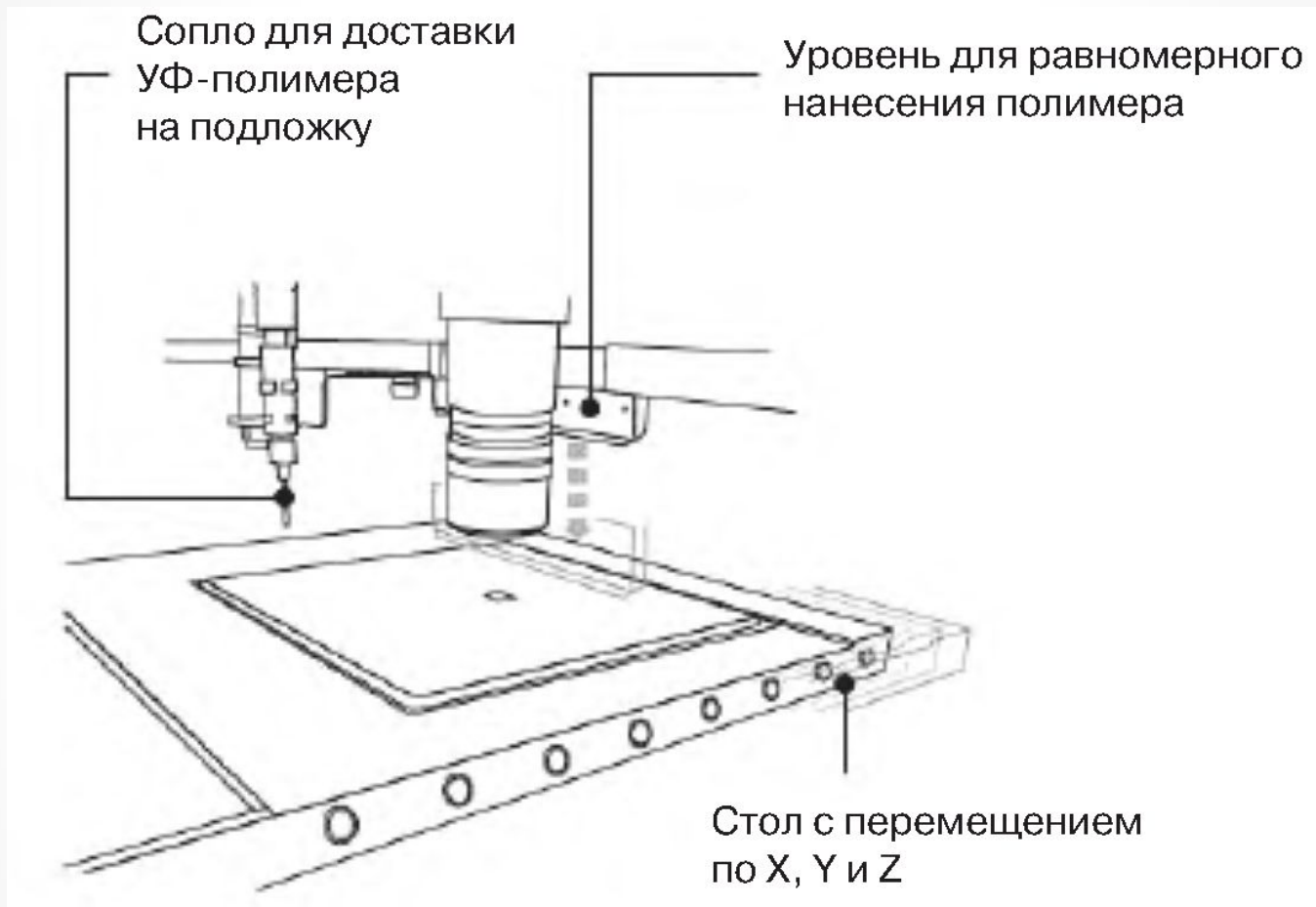
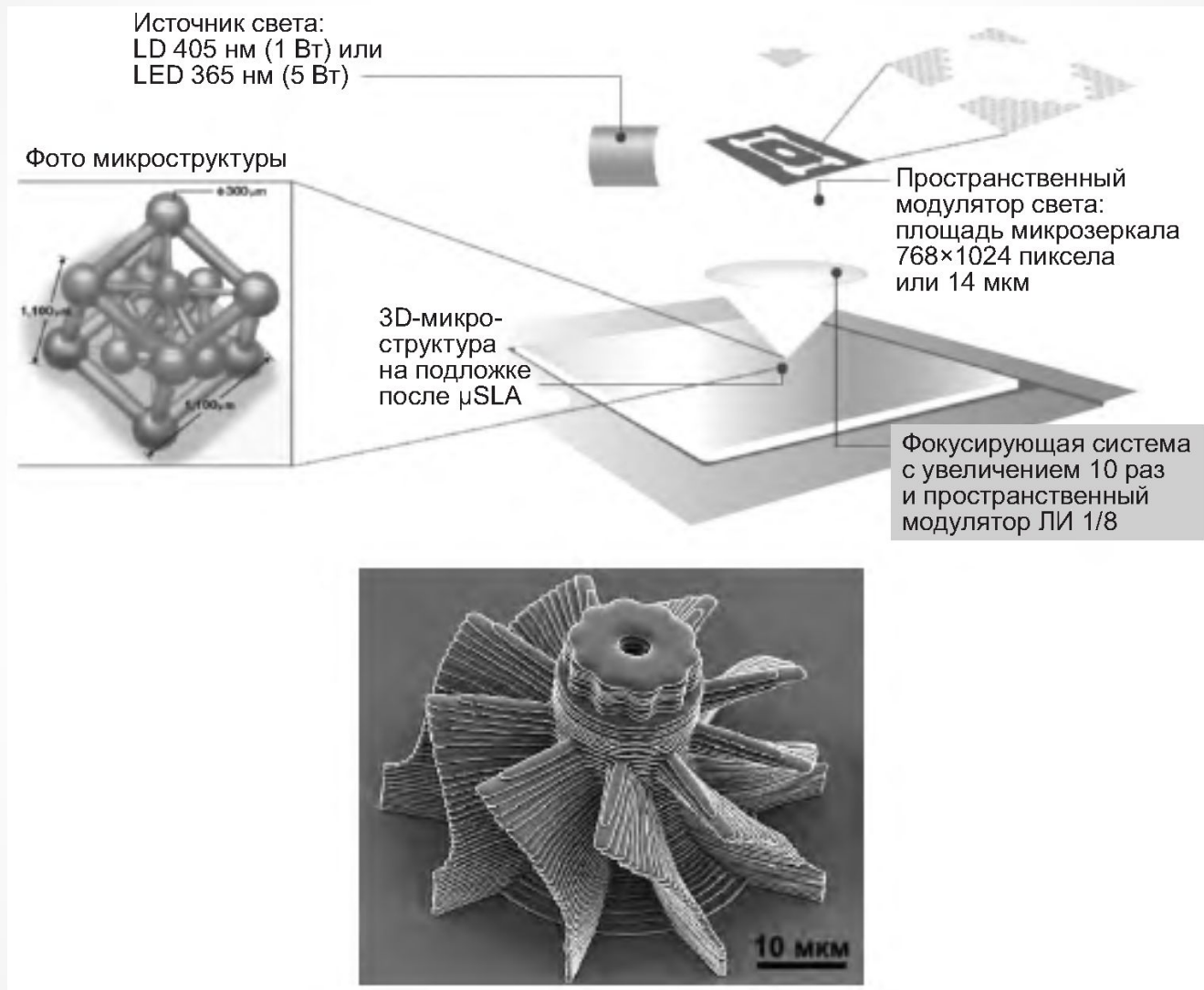


Схема установки для микростереолитографии

Технологии аддитивного производства



Образование 3D-структур после микростереолитографии

Технологии аддитивного производства

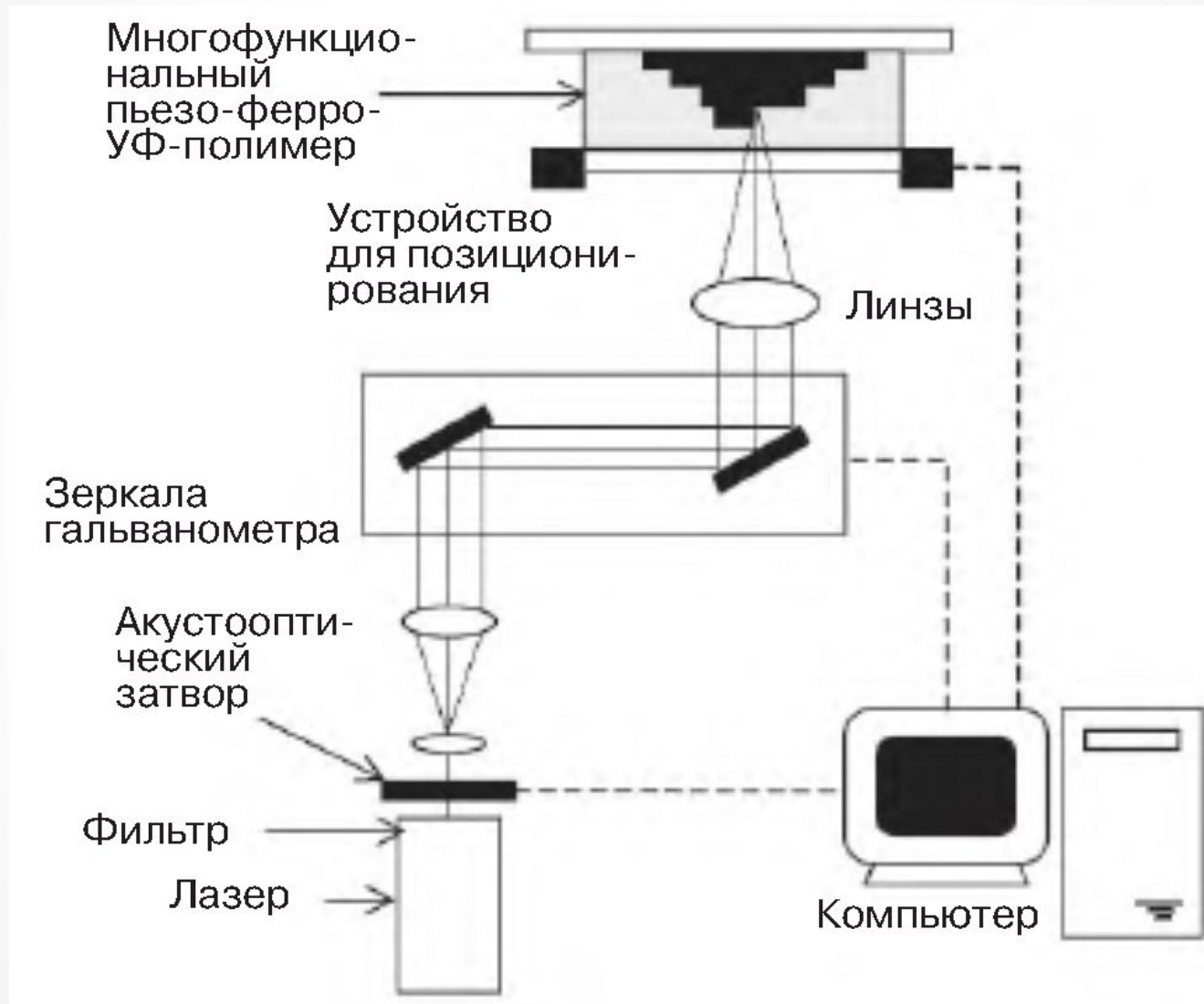
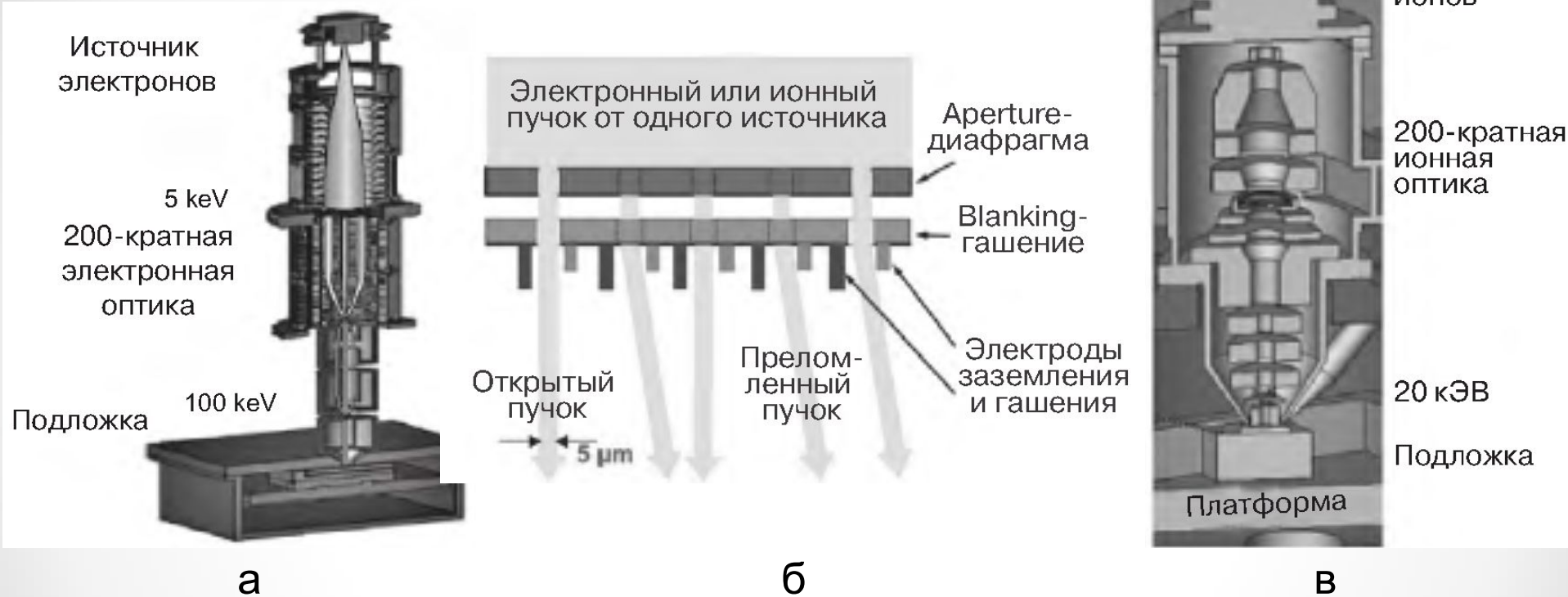


Схема процесса микростереолитографии

Технологии аддитивного производства



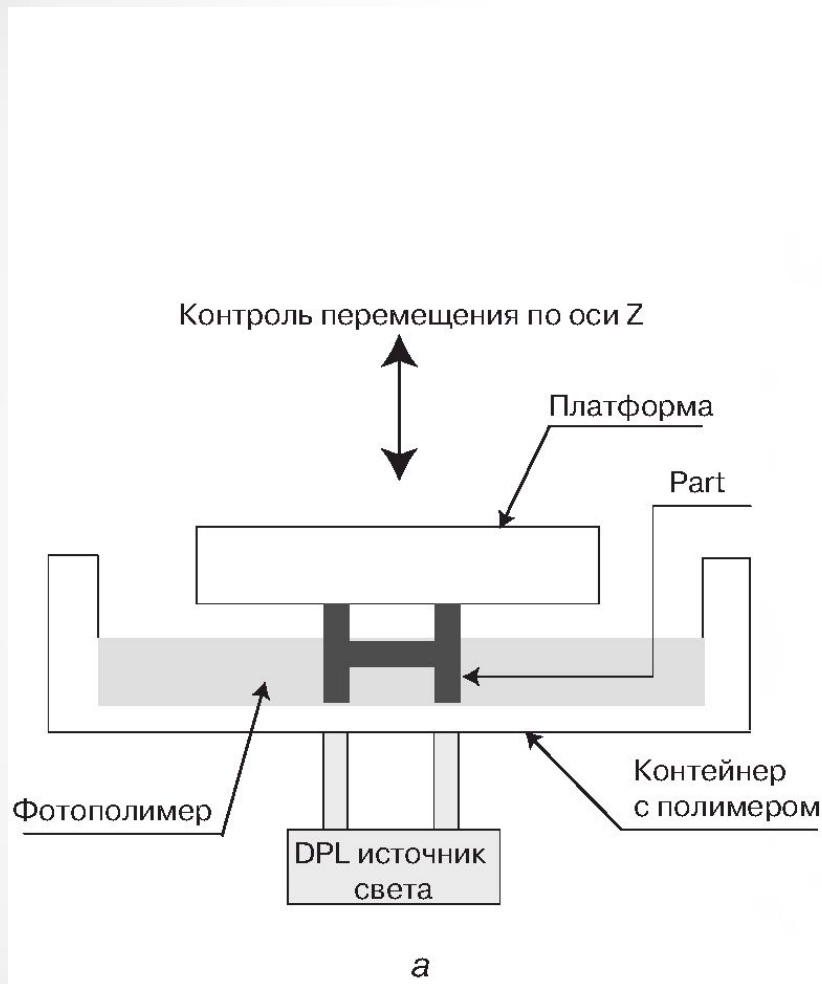
Микро- и нанолитографические процессы:

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

б – программируемая система апертур;

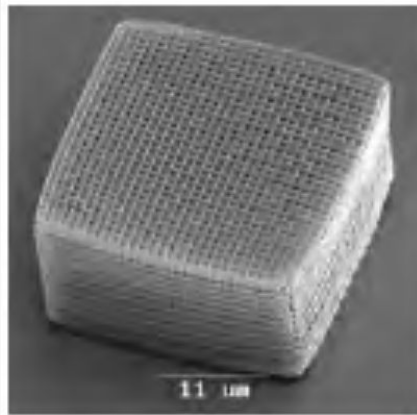
в – прямое наноструктурирование ионными пучками (<20 нм)

Технологии аддитивного производства

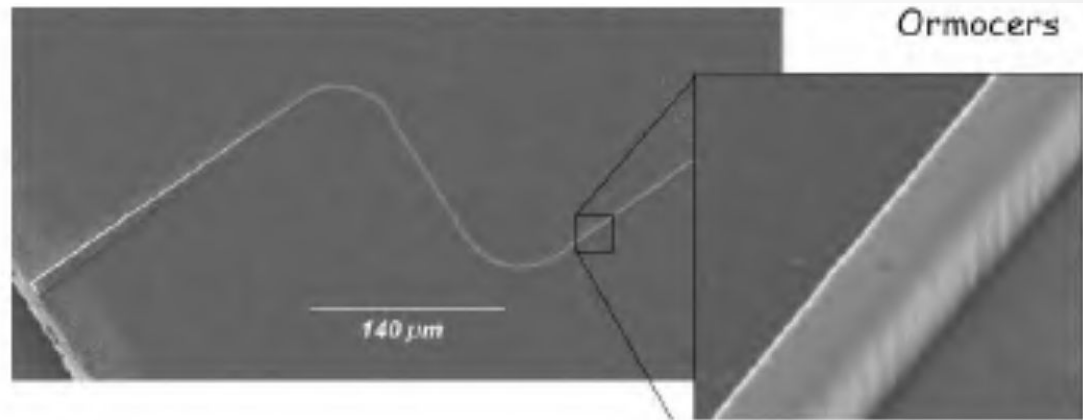


Масочная методика прототипирования:
a – схема процесса; *б* – структура установки

Технологии аддитивного производства



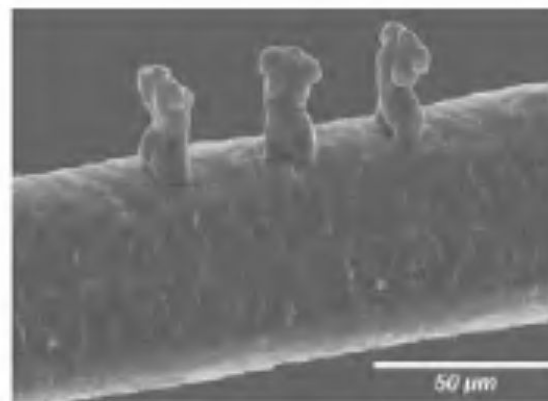
а



б



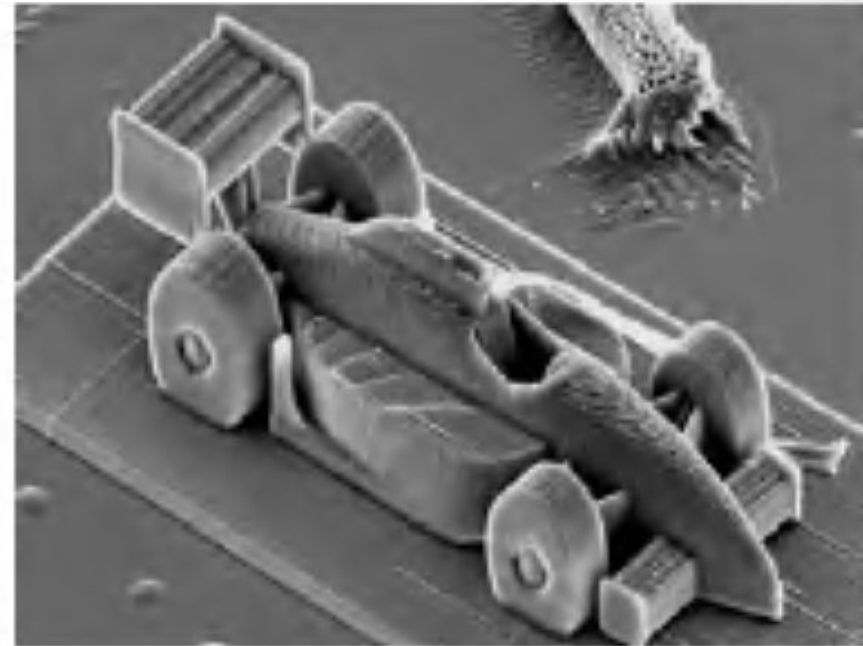
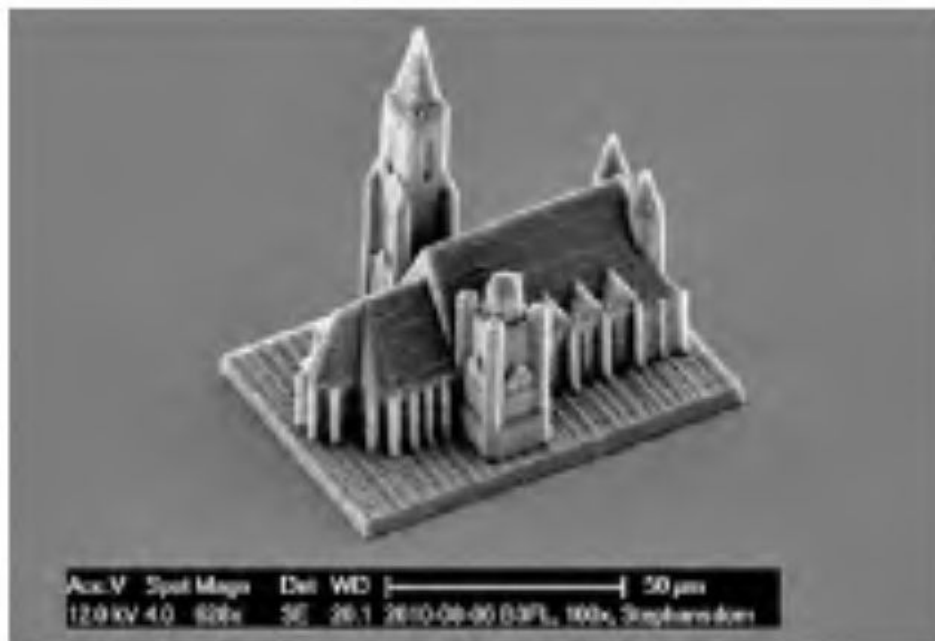
в



г

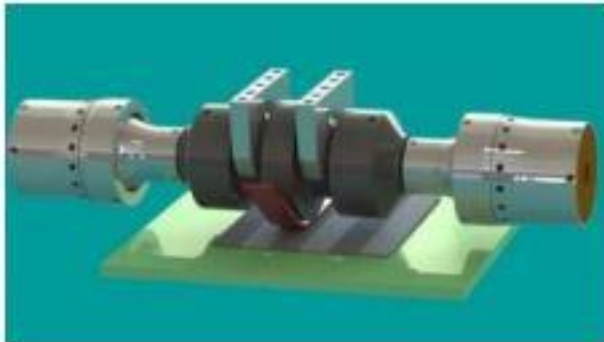
Примеры приложений двухфотонной лазерной стереолитографии:
а — фотонный кристалл; б — 3D-волноводная структура;
в — нанофлюидный чип; г — 3D-нано- и микроструктуры

Технологии аддитивного производства

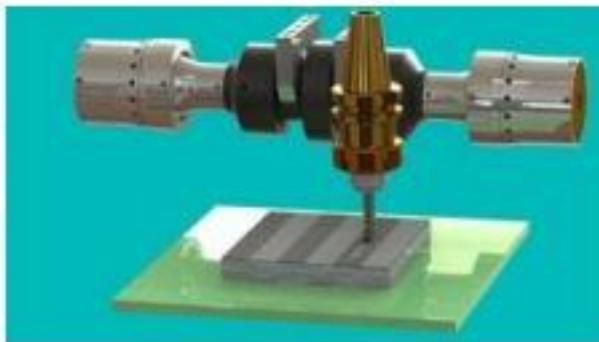


Примеры субмикронных изделий высокой точности

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

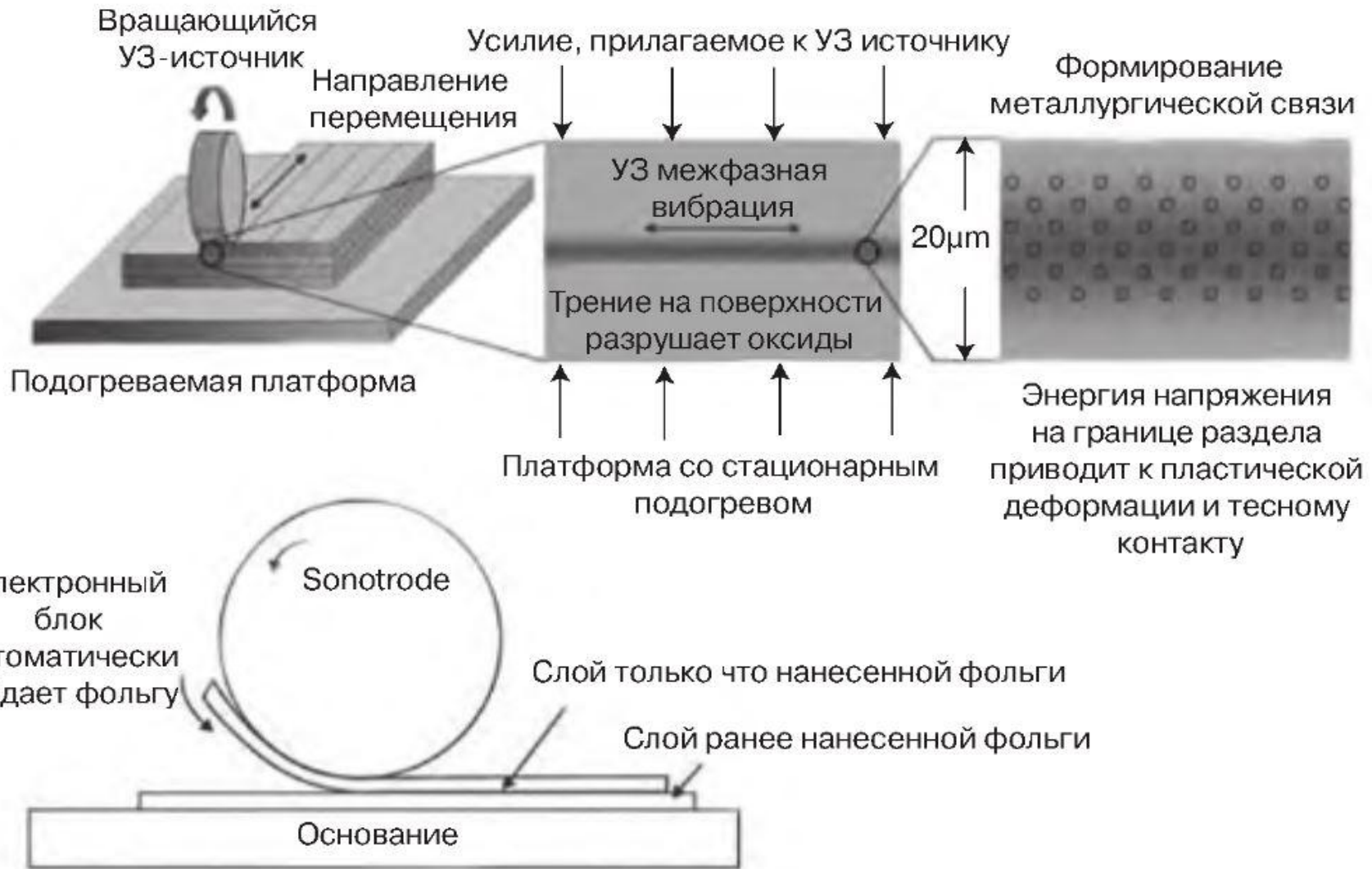


Схема процесса ультразвуковой консолидации (УЗК)

Технологии аддитивного производства

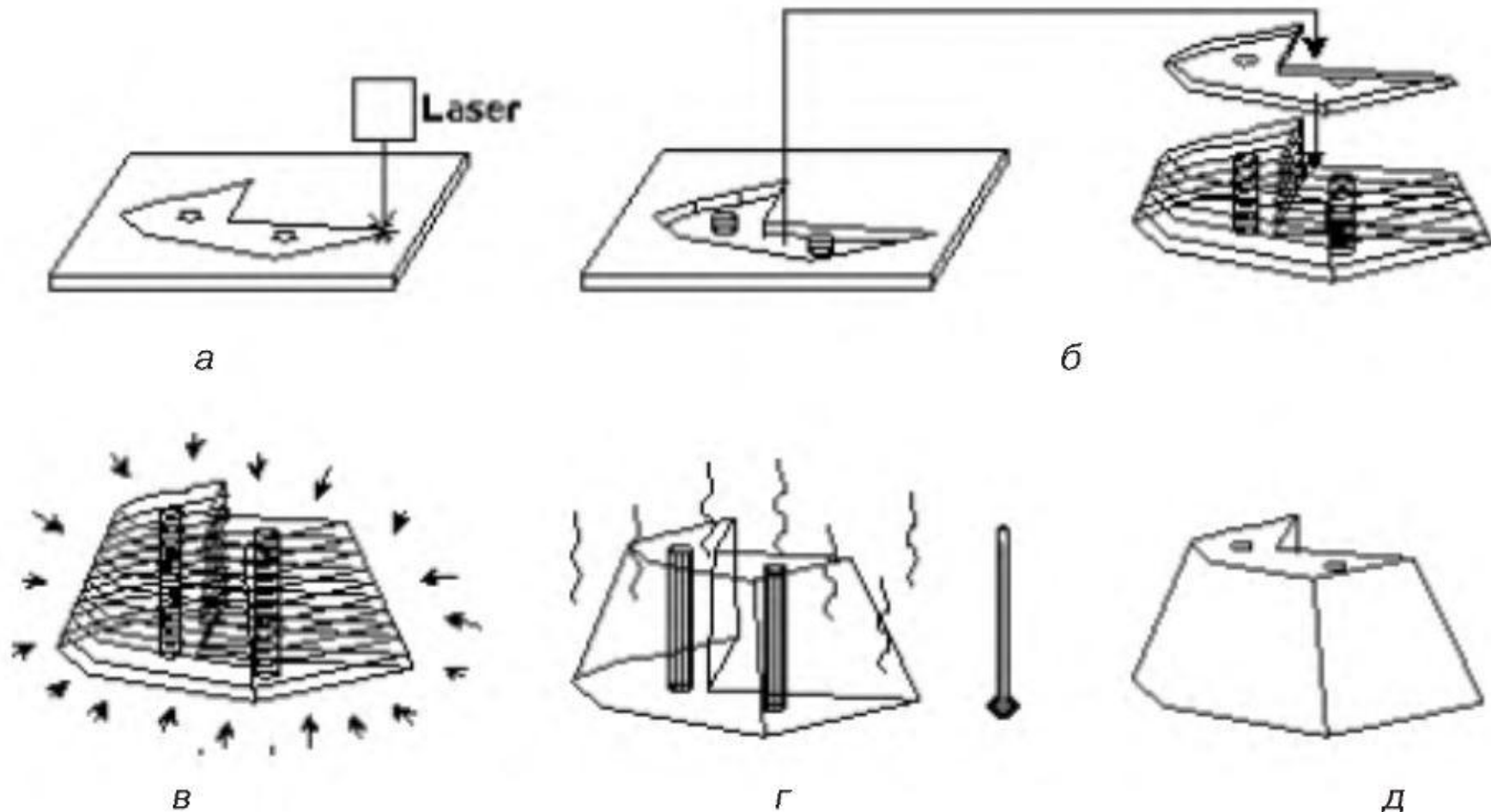


Схема процесса послойного ламинирования:

*а — лазерная резка слоев; б — наложение слоев;
в — ламинирование; г — удаление связующего и дополнительное спекание;
д — готовое изделие*

Технологии аддитивного производства



а



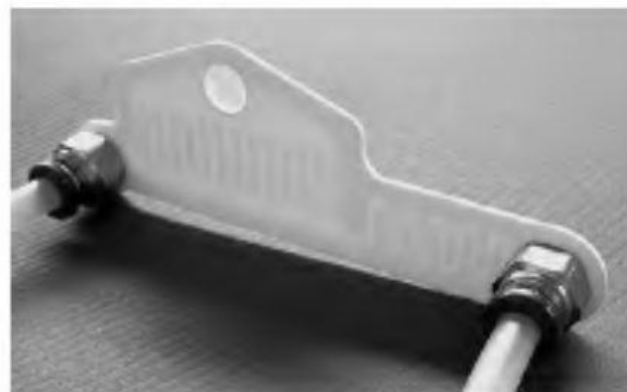
б



в



г



д

Примеры технологии послойного ламинирования:

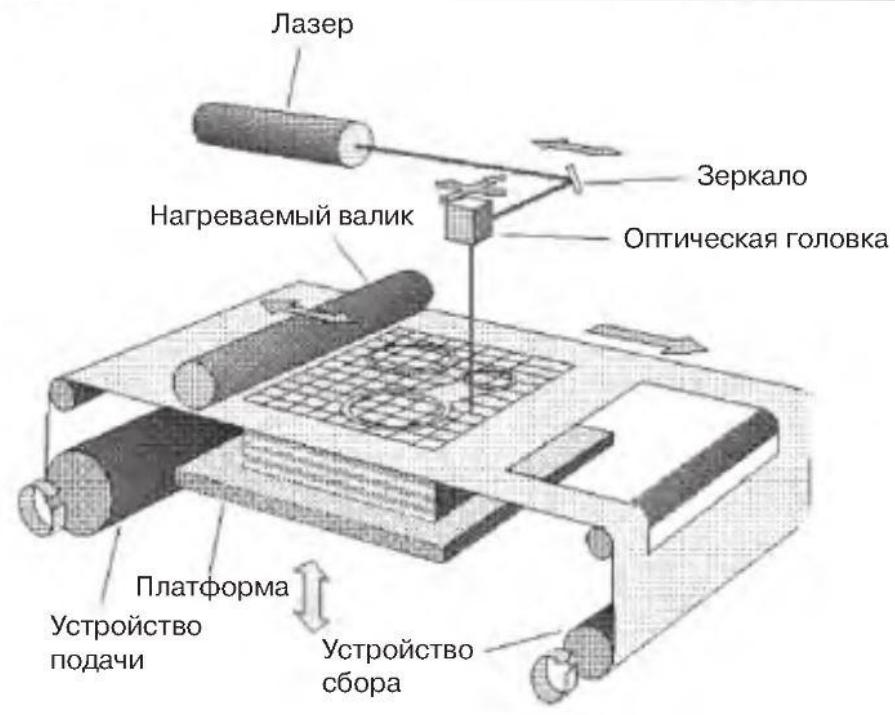
а — трехслойный стальной ротор диаметром 26 мм;

б — деталь из оксида алюминия;

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

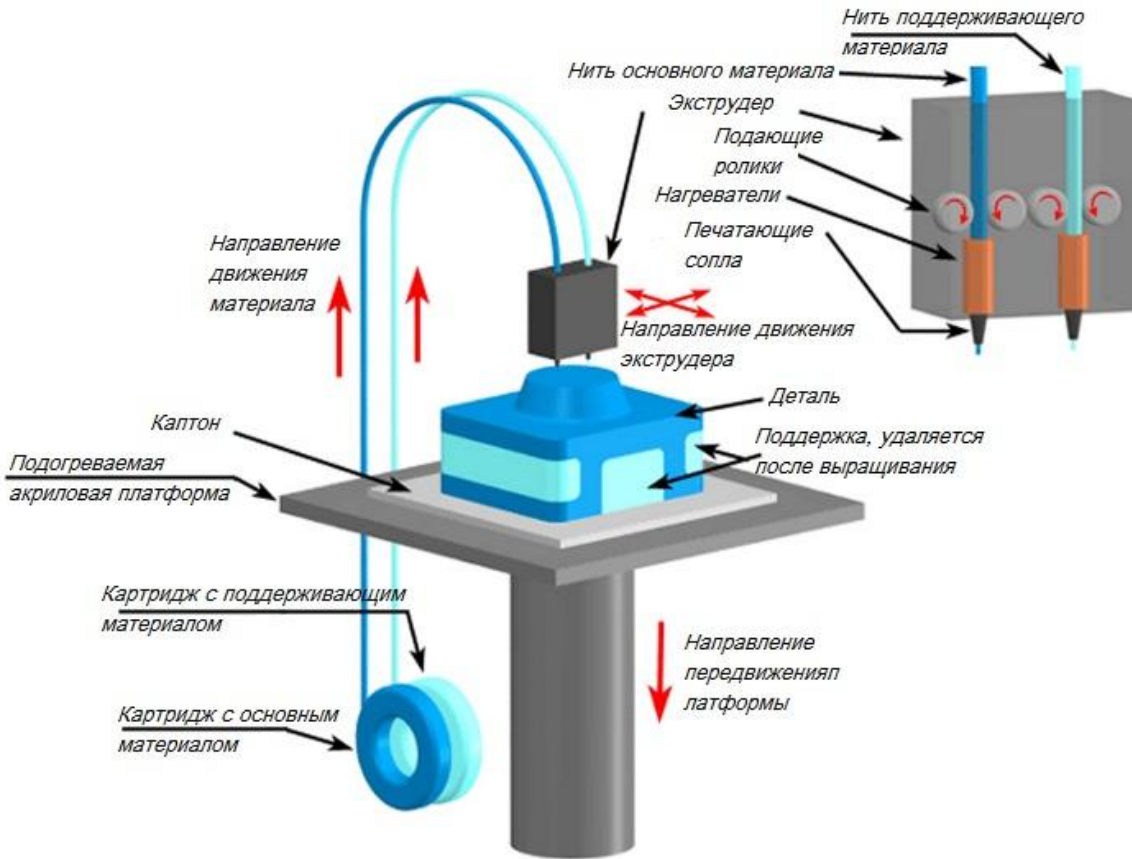
г — деталь из нитрида кремния; д — устройство сепарации жидкости с внутренними каналами

Технологии аддитивного производства



Послойная раскройка листового материала

Технологии аддитивного производства



Технологический процесс экструзии
(послойное нанесение расплавленного материала через экструдер)

Технологии аддитивного производства

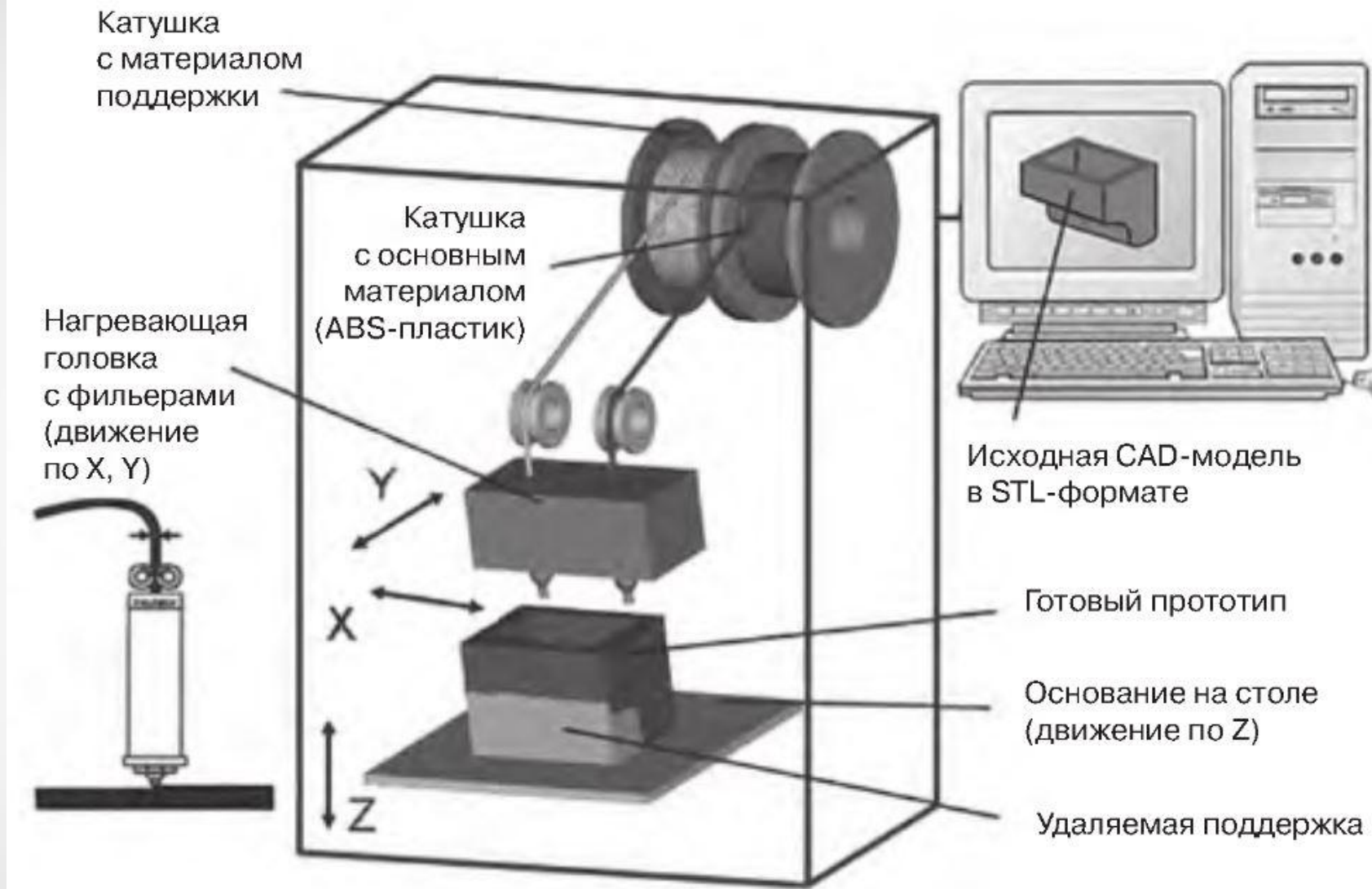


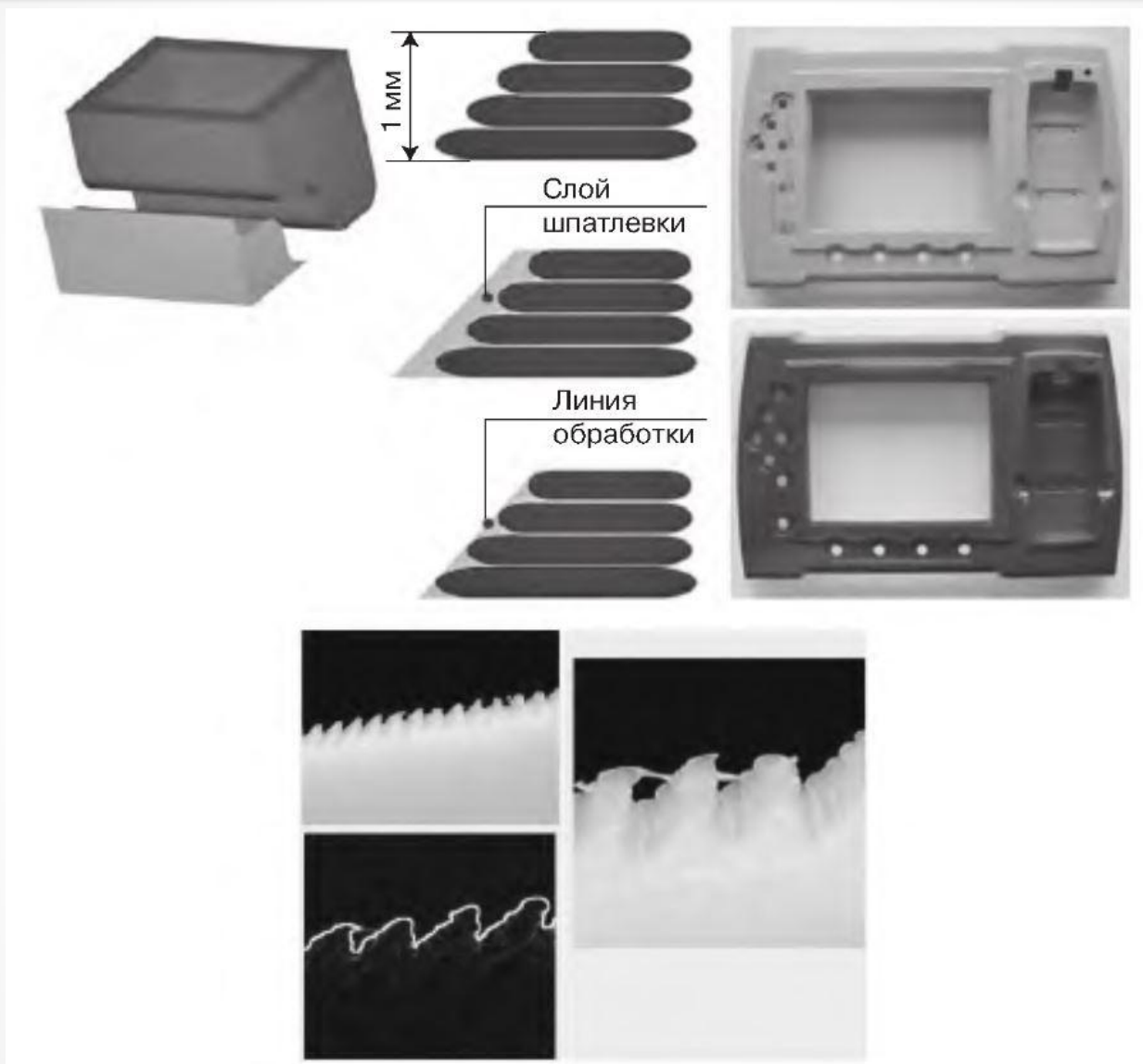
Схема процесса экструзии

Технологии аддитивного производства



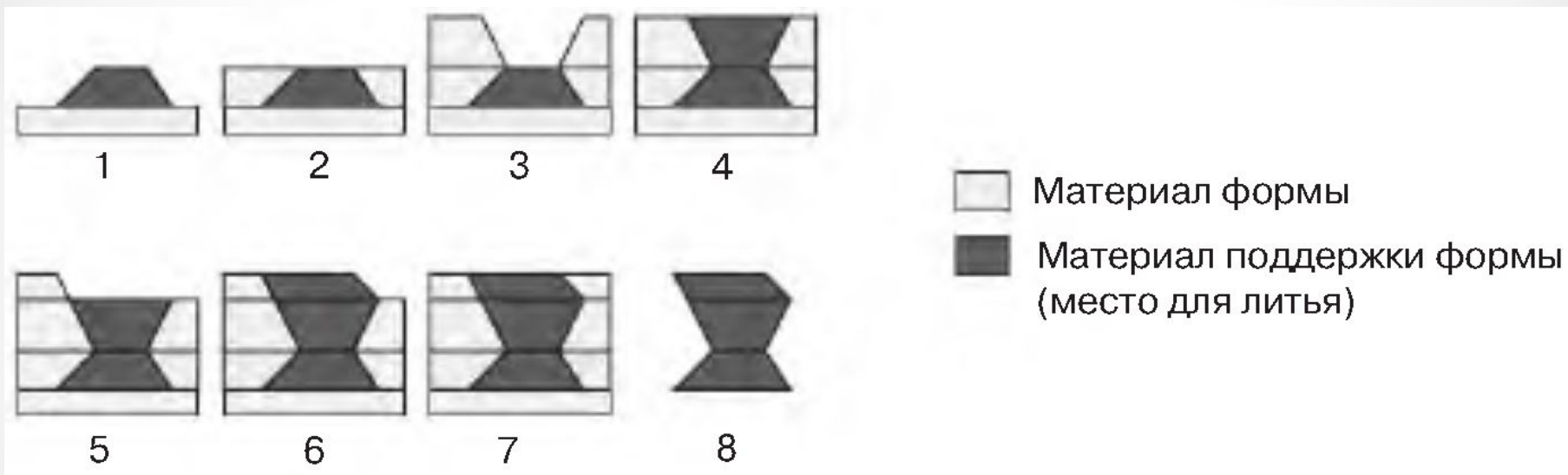
Внешний вид установок для экструзии

Технологии аддитивного производства



Финишная обработка внешней поверхности изделий после экструзии

Технологии аддитивного производства



Основы методики послойного создания литейной формы

Технологии аддитивного производства

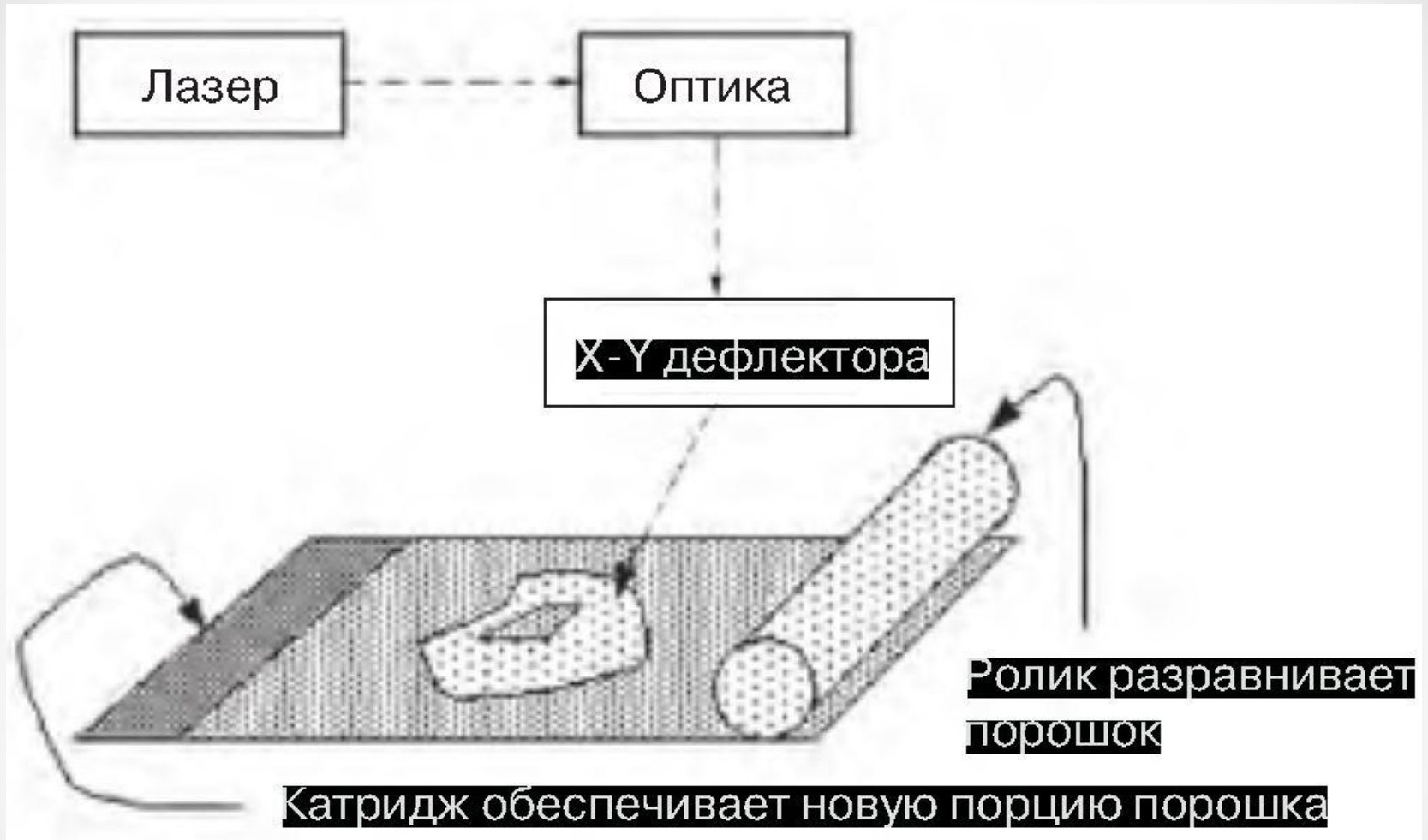
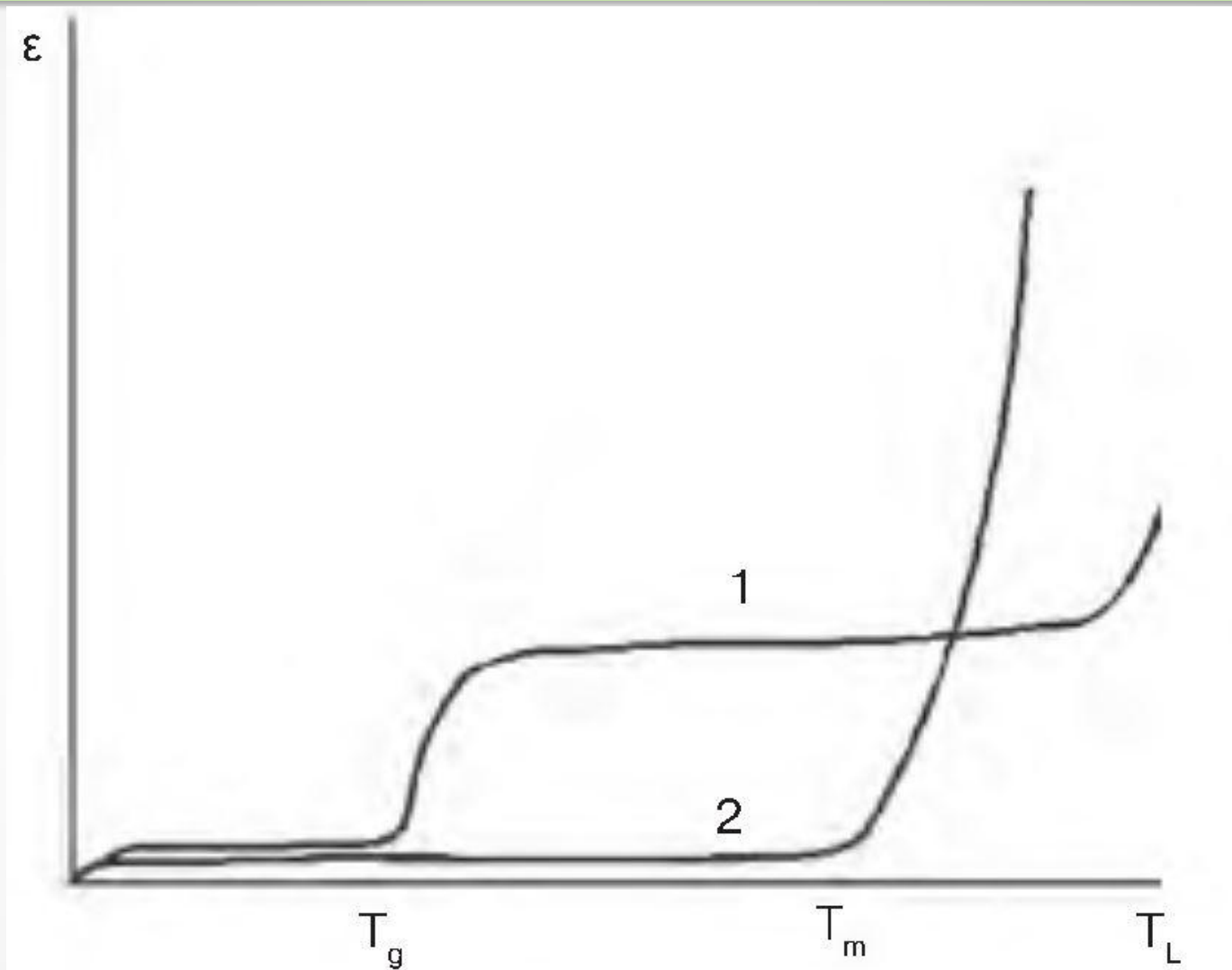


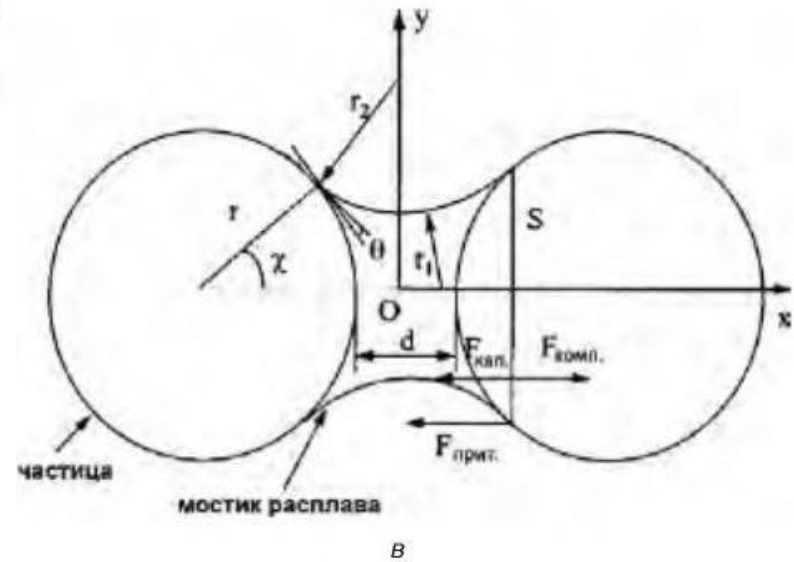
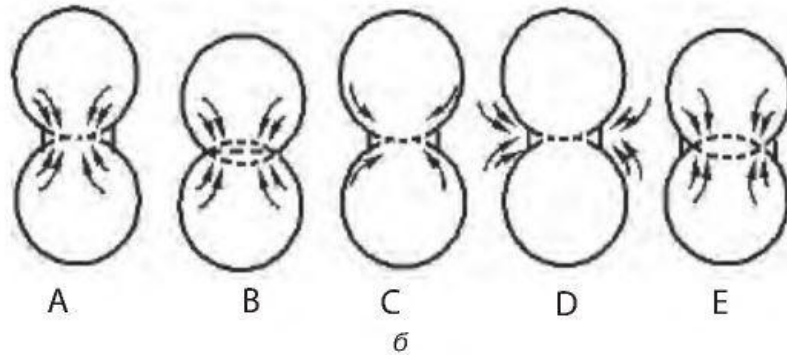
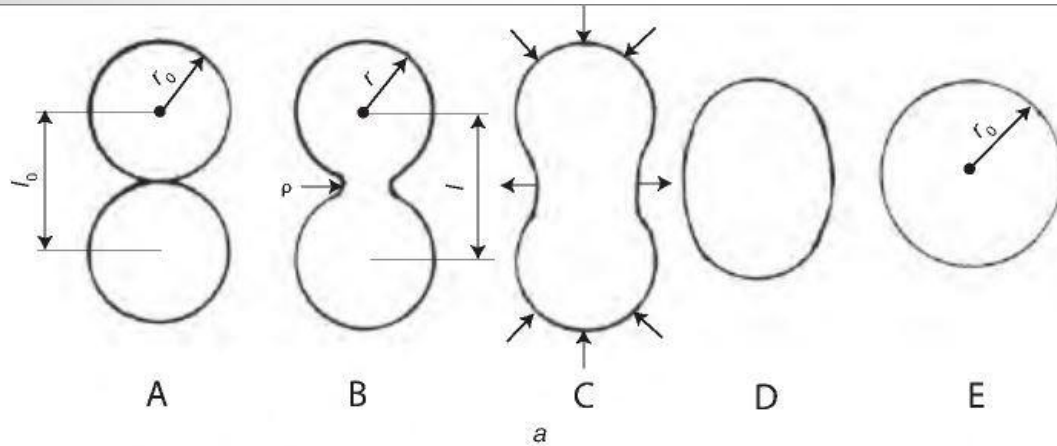
Схема процесса селективного лазерного спекания

Технологии аддитивного производства



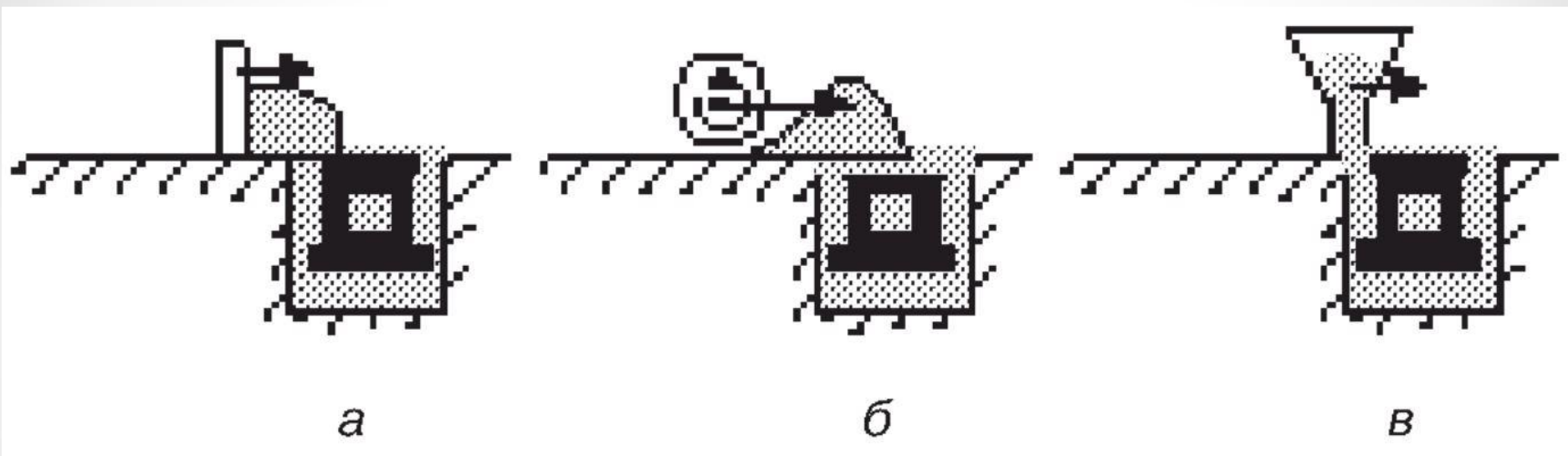
- Термомеханическая кривая зависимости деформации от температуры
- для аморфного (1) и кристаллического (2) полимеров •

Технологии аддитивного производства



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

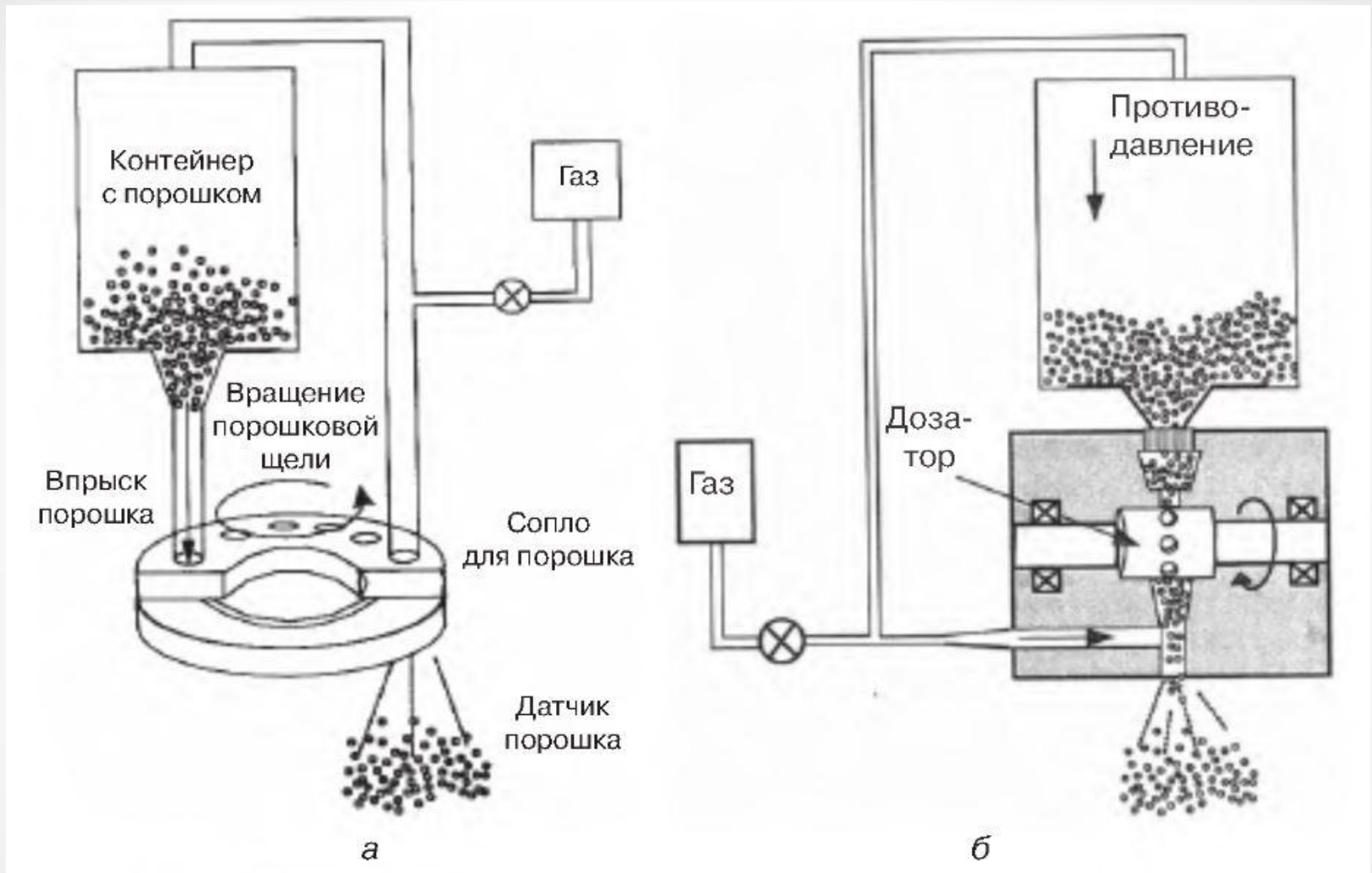
Технологии аддитивного производства



Способы нанесения и разравнивания порошка
на платформе-основании:

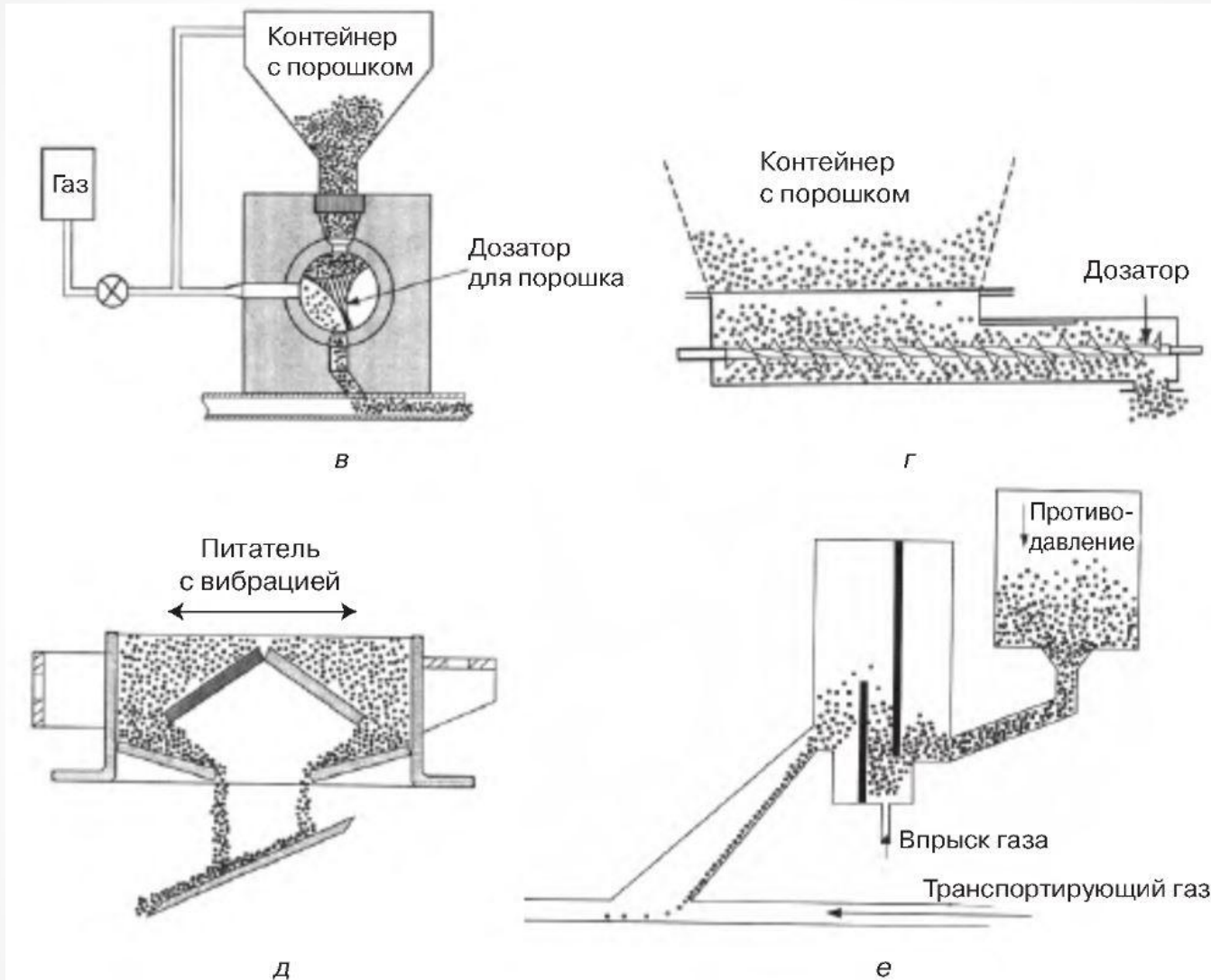
а — скребок; б — валик; в — бункер

Технологии аддитивного производства



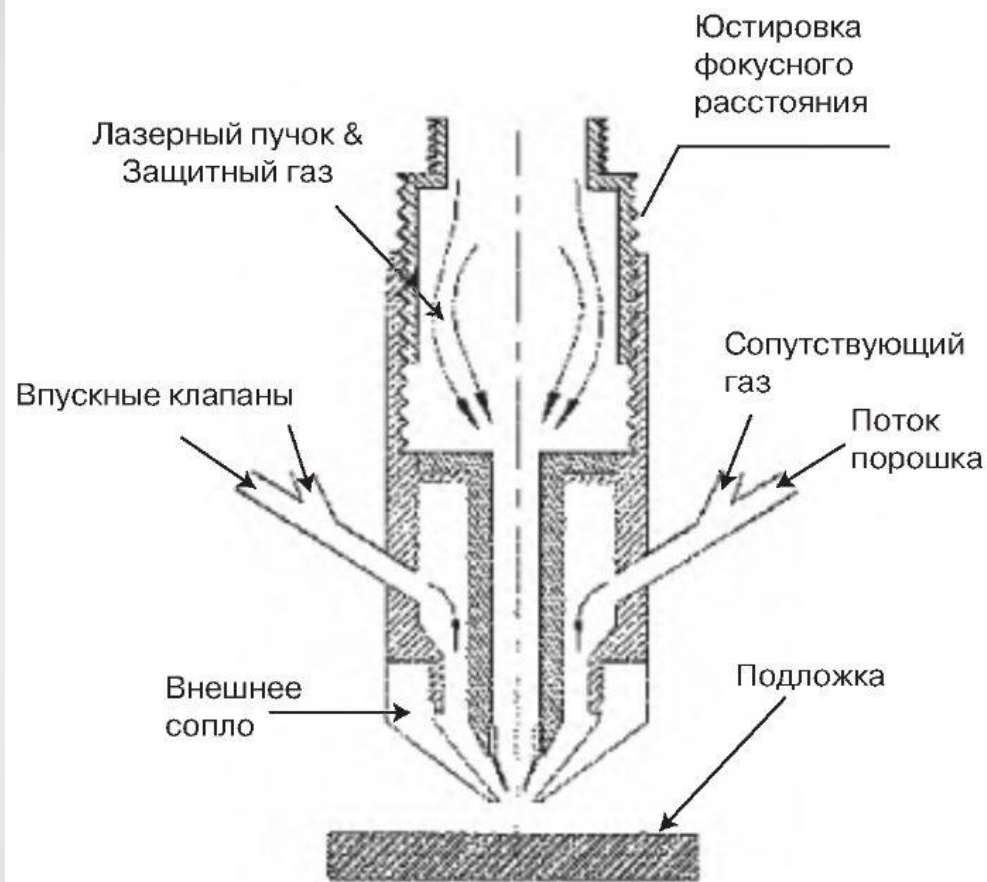
Способы дозирования порошков под действием сил гравитации:
а — с вращающимся колесом; б — с измерительным колесом

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



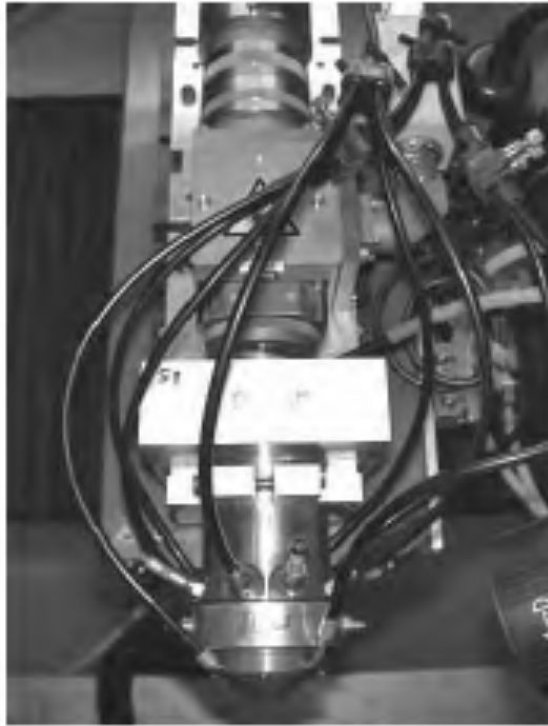
а



б

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

Технологии аддитивного производства



а



б

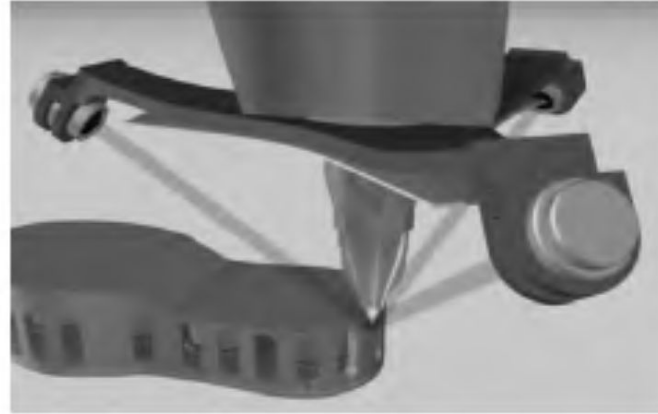
Установка для трехмерной лазерной наплавки
с координатным столом и дозирующей системой:

а — сопловой блок; б — общий вид

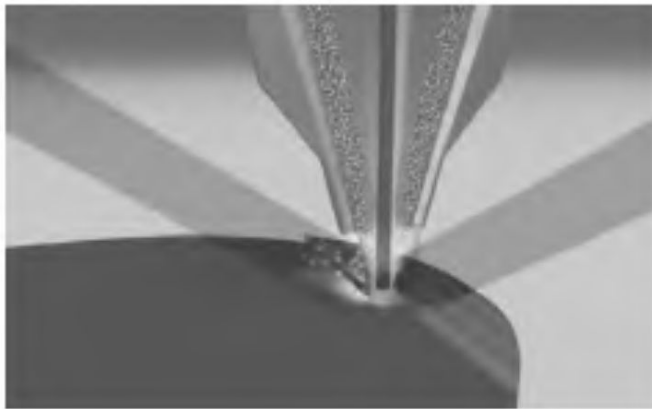
Технологии аддитивного производства



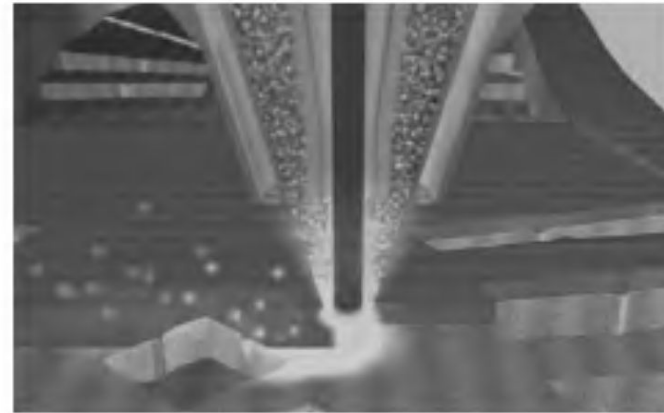
а



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

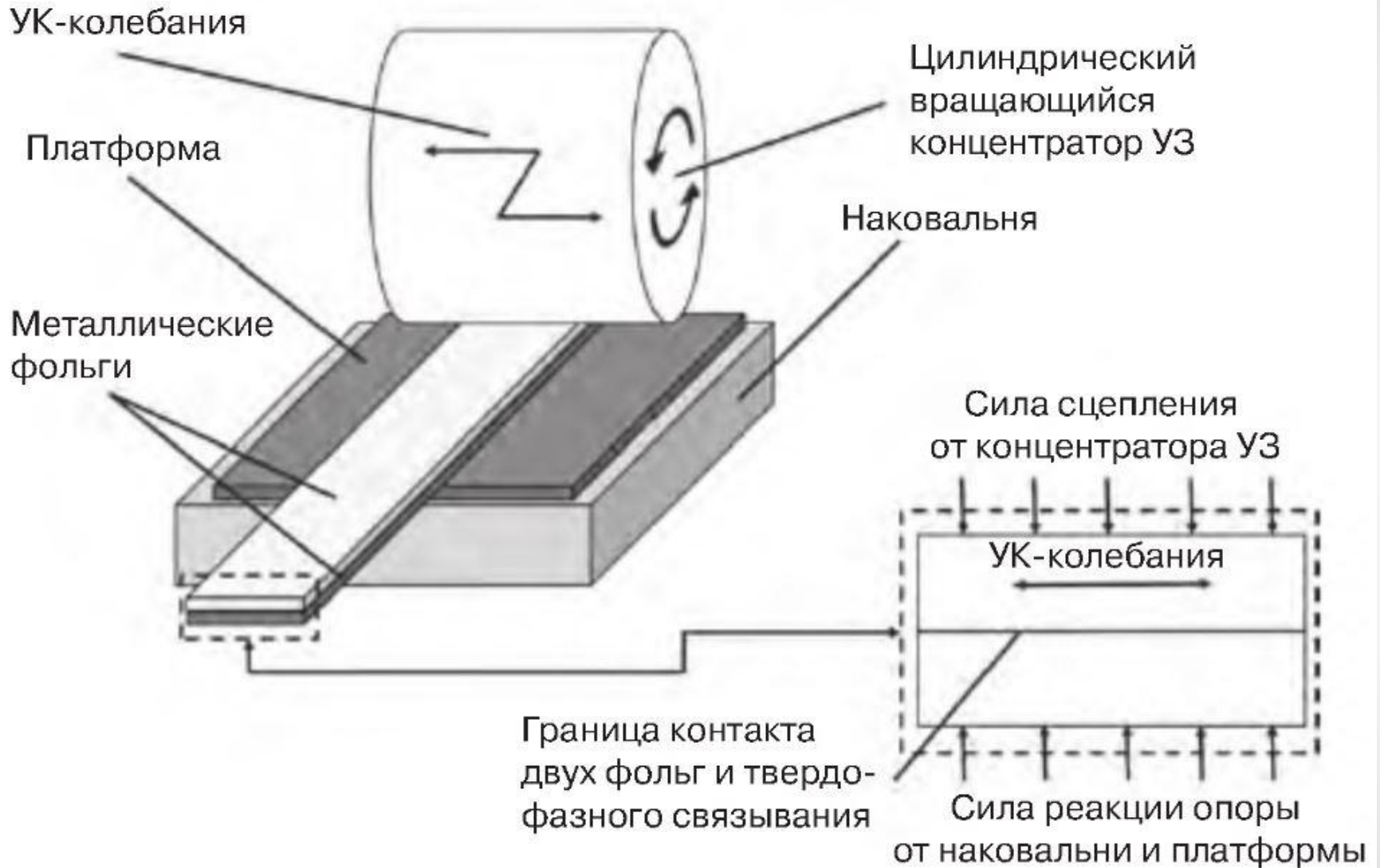


Схема процесса ультразвукового компактирования порошков

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

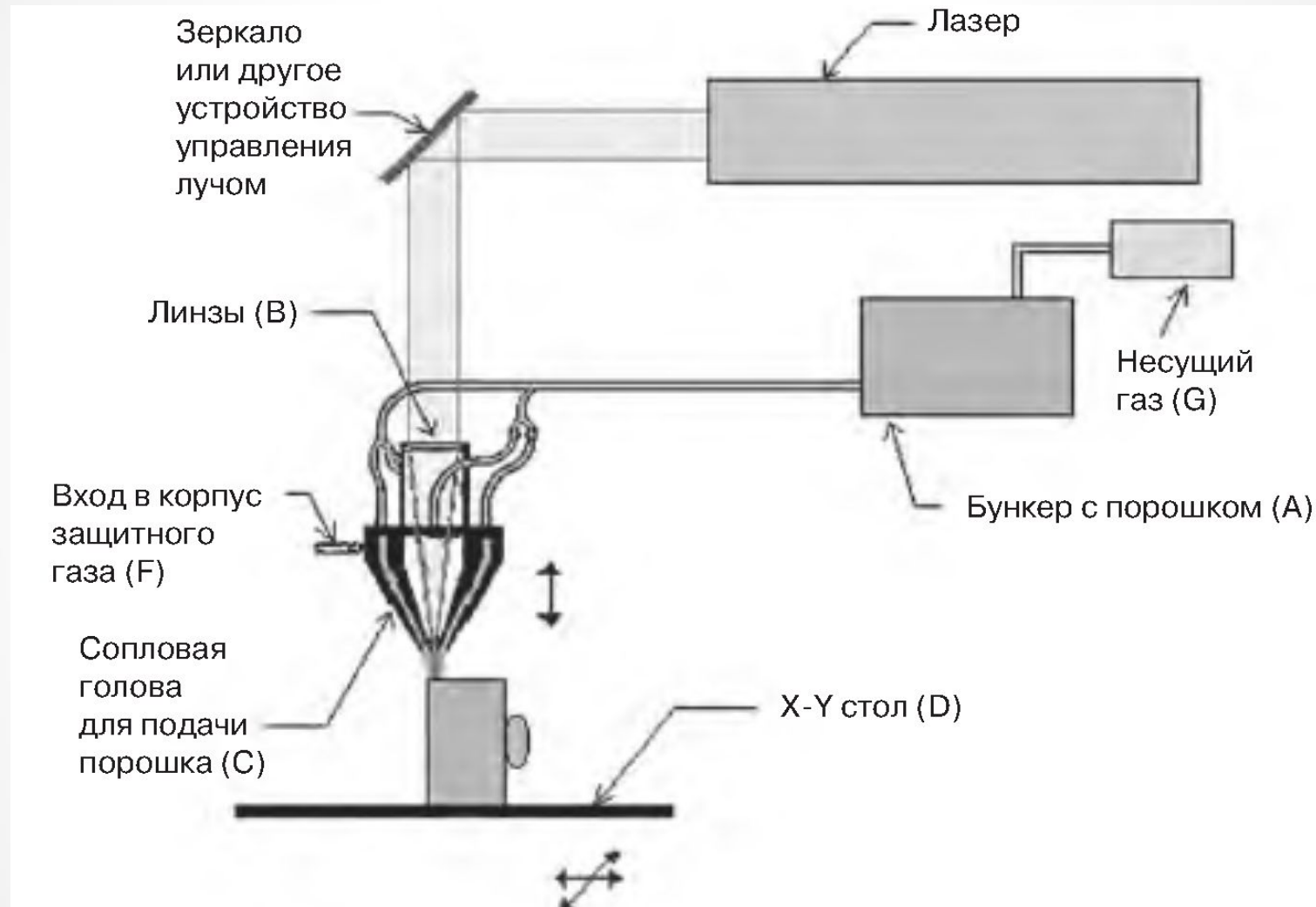


Схема процесса лазерного спекания точных форм

Технологии аддитивного производства

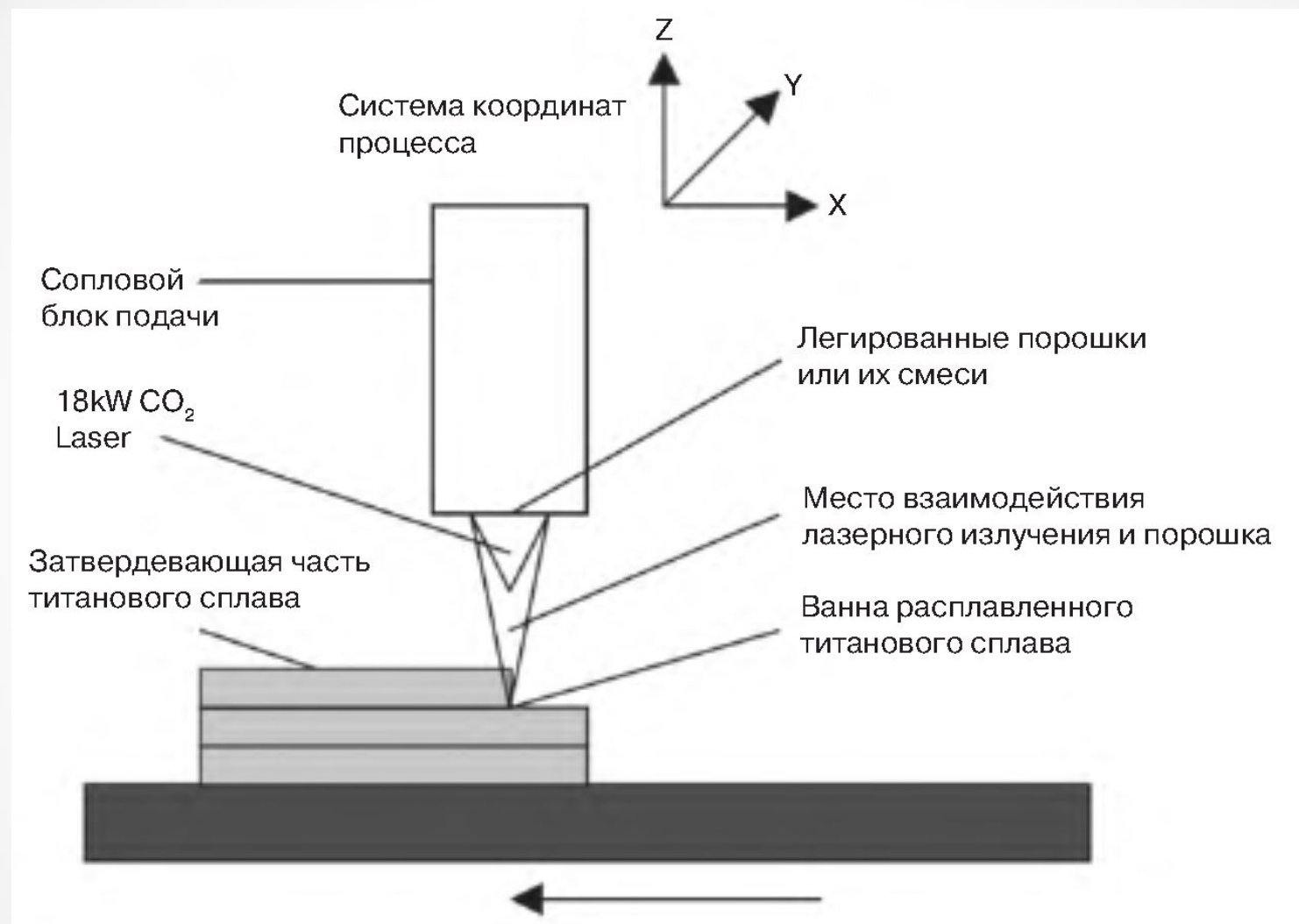


Схема процесса объемной лазерной наплавки

Технологии аддитивного производства



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

Технологии аддитивного производства

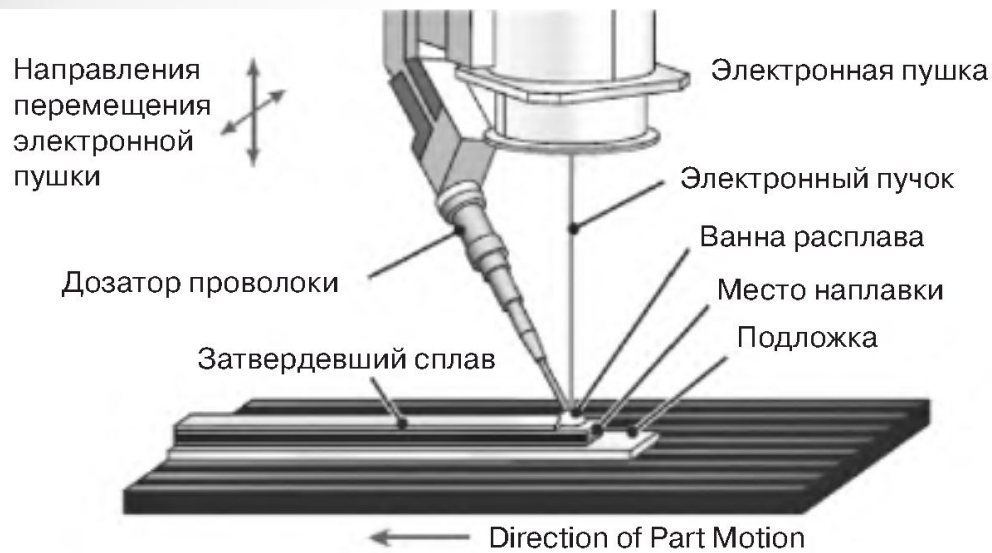


Схема подвода расходной проволоки и электронного луча

Изделие до и после механообработки

Метод послойного наваривания материалов в расплаве

Технологии аддитивного производства

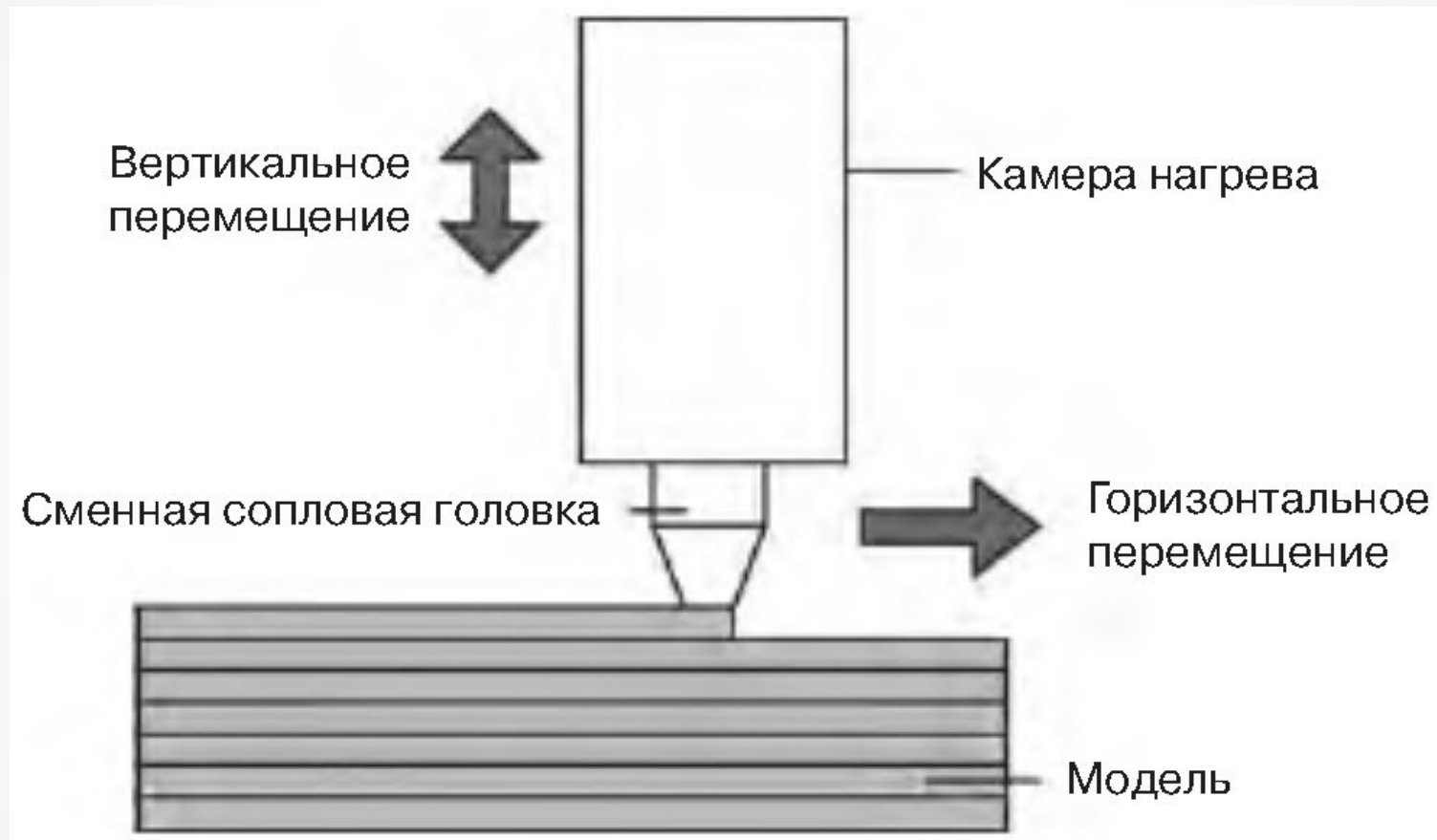


Схема процесса выдавливания легкоплавкого материала

Технологии аддитивного производства

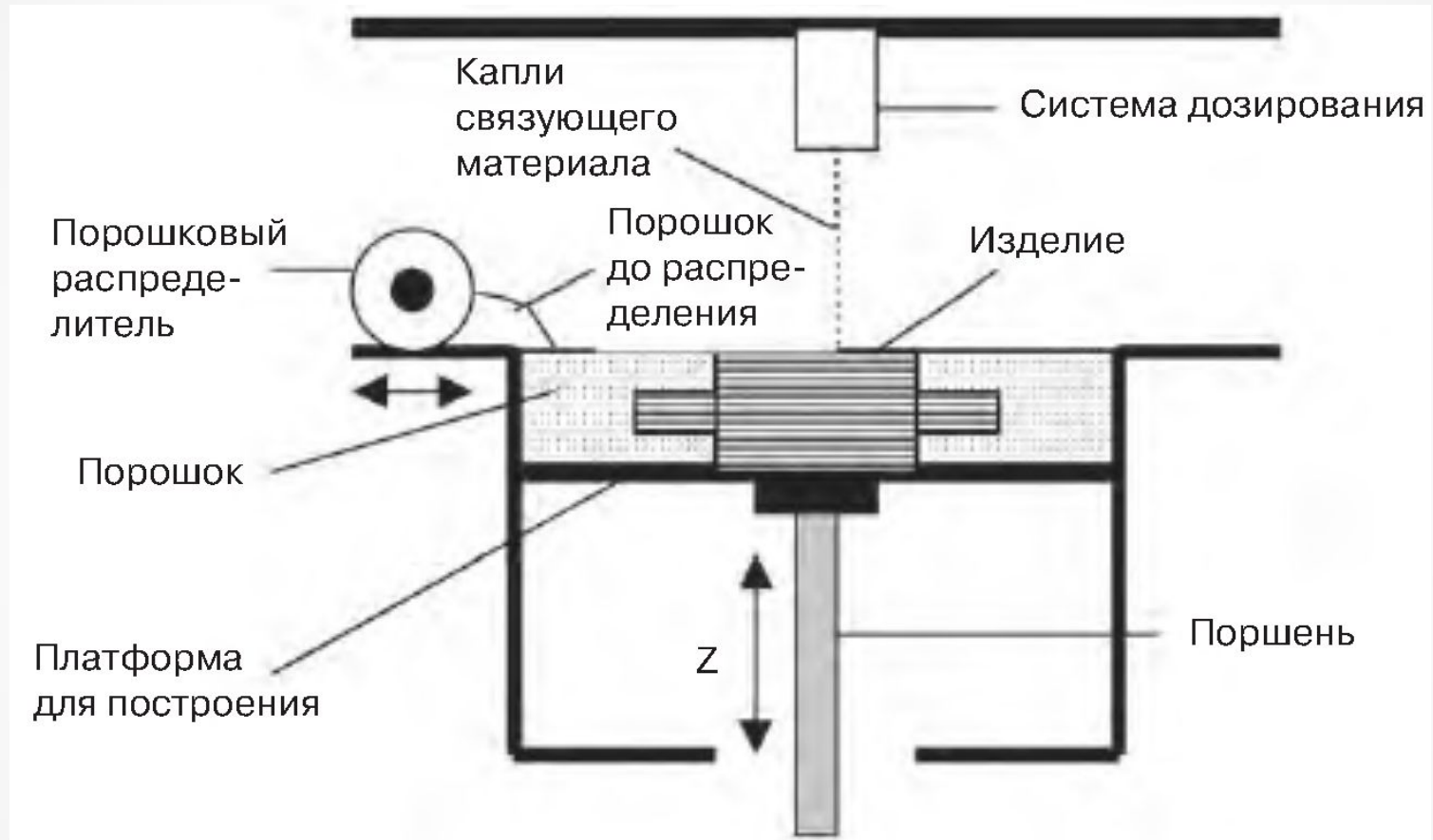
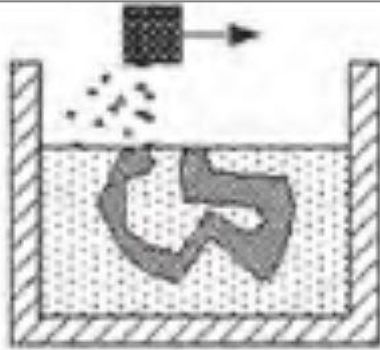


Схема процесса 3D-печати для биомедицинских приложений

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 SiO_2



3. Модель готова



4. Извлечение модели



5. Мастер-форма для отливки

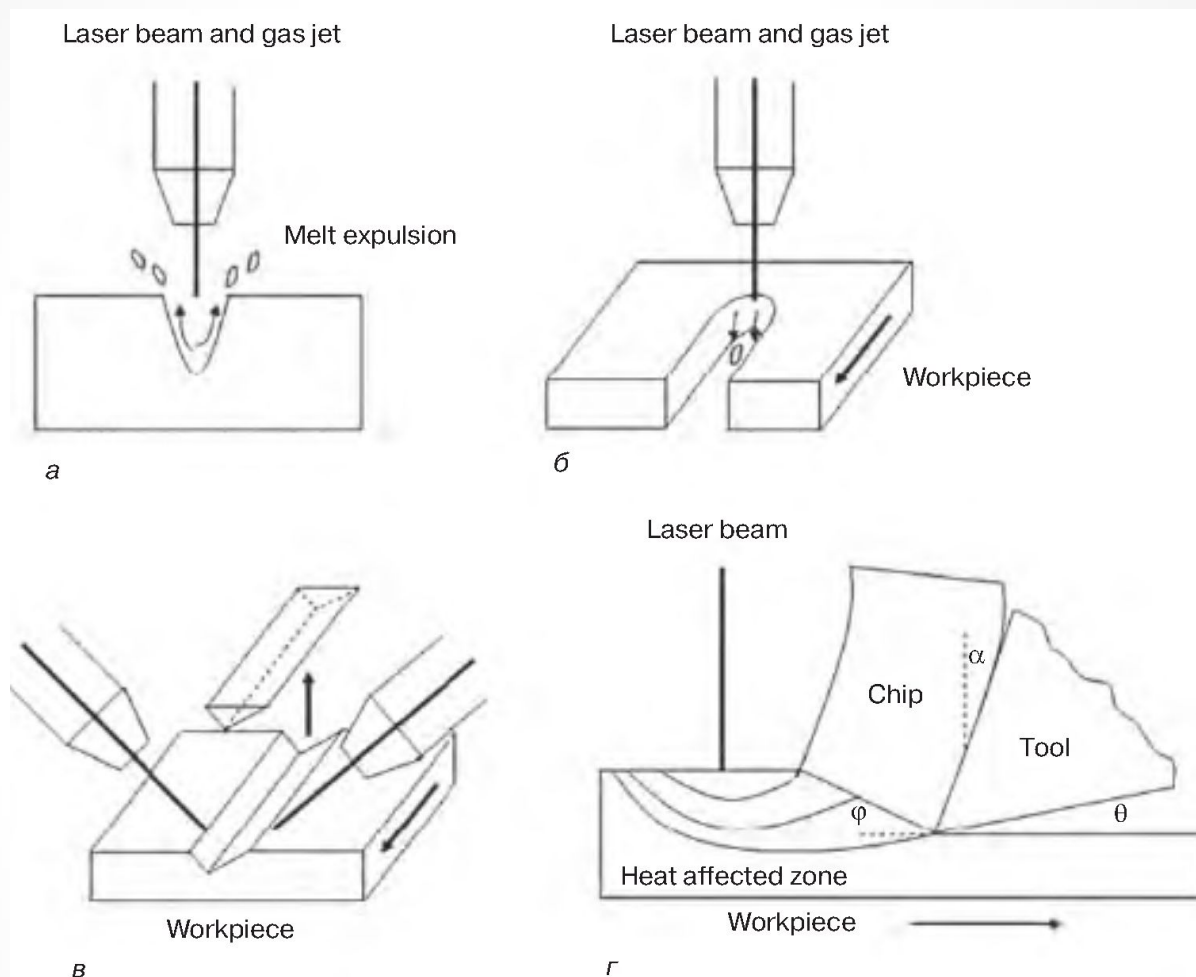
• Схема процесса трехмерной печати литейной формы

Технологии аддитивного производства



• Комбинированная технология струйной печати и УФ-печати •

Технологии аддитивного производства

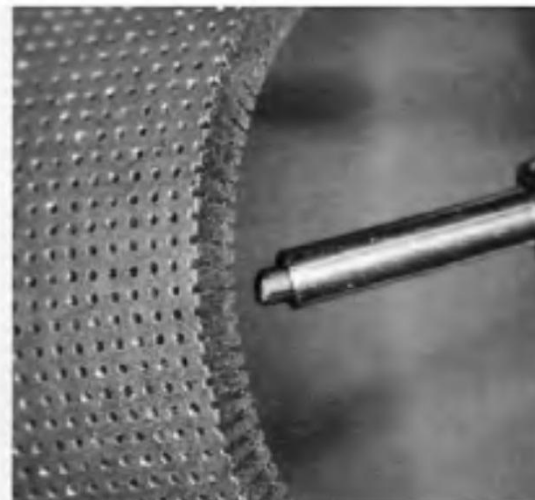


Микромеханическая обработка лазерным излучением:
а — лазерная прошивка отверстий (одномерное приближение);
б — лазерная резка (двумерное приближение);
в — лазерное фрезерование (трехмерное приближение);
г — комбинированная лазерно-механическая обработка

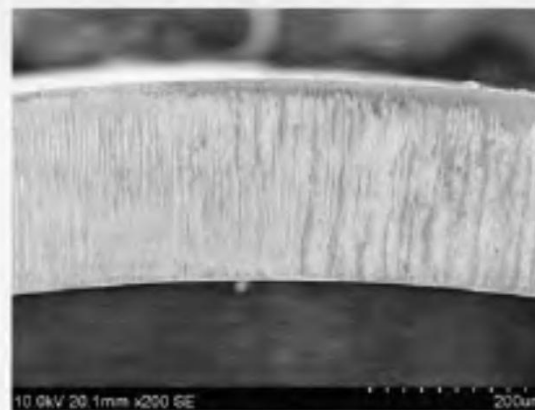
Технологии аддитивного производства



Pulsed YAG Laser: For fine cutting and welding



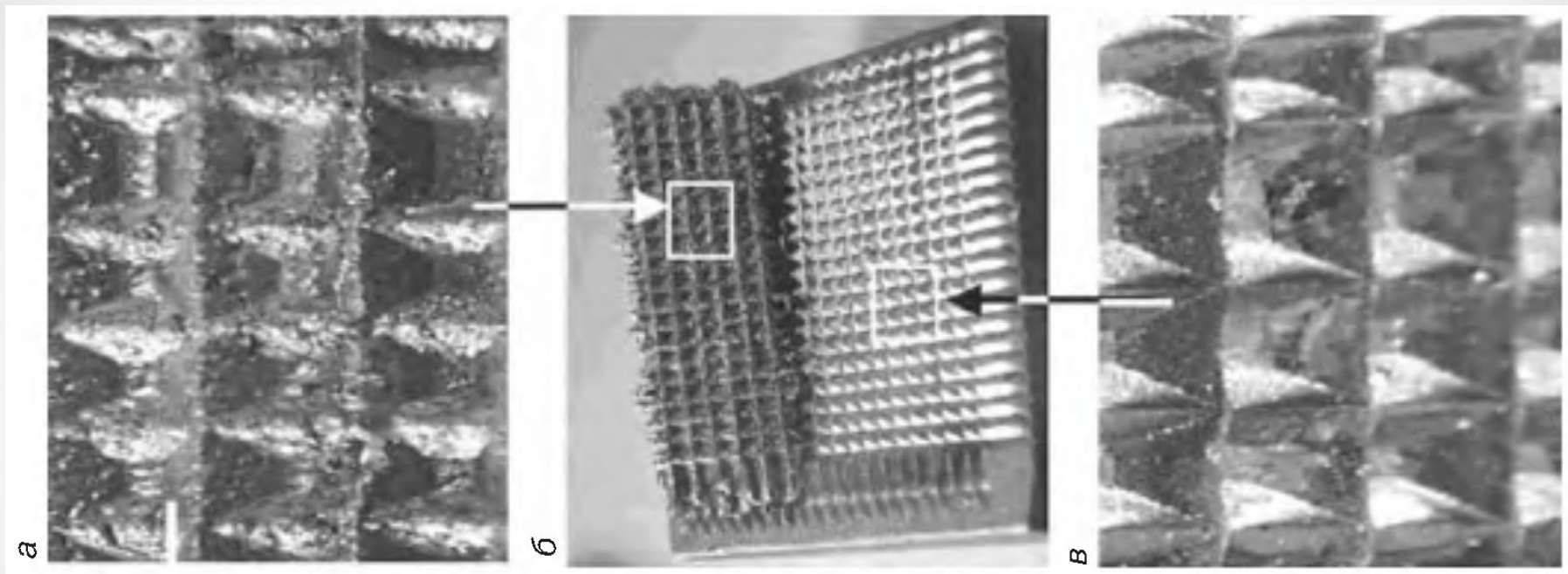
Drilling of 5,005 mm holes in stainless steel cut with a fibre laser



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

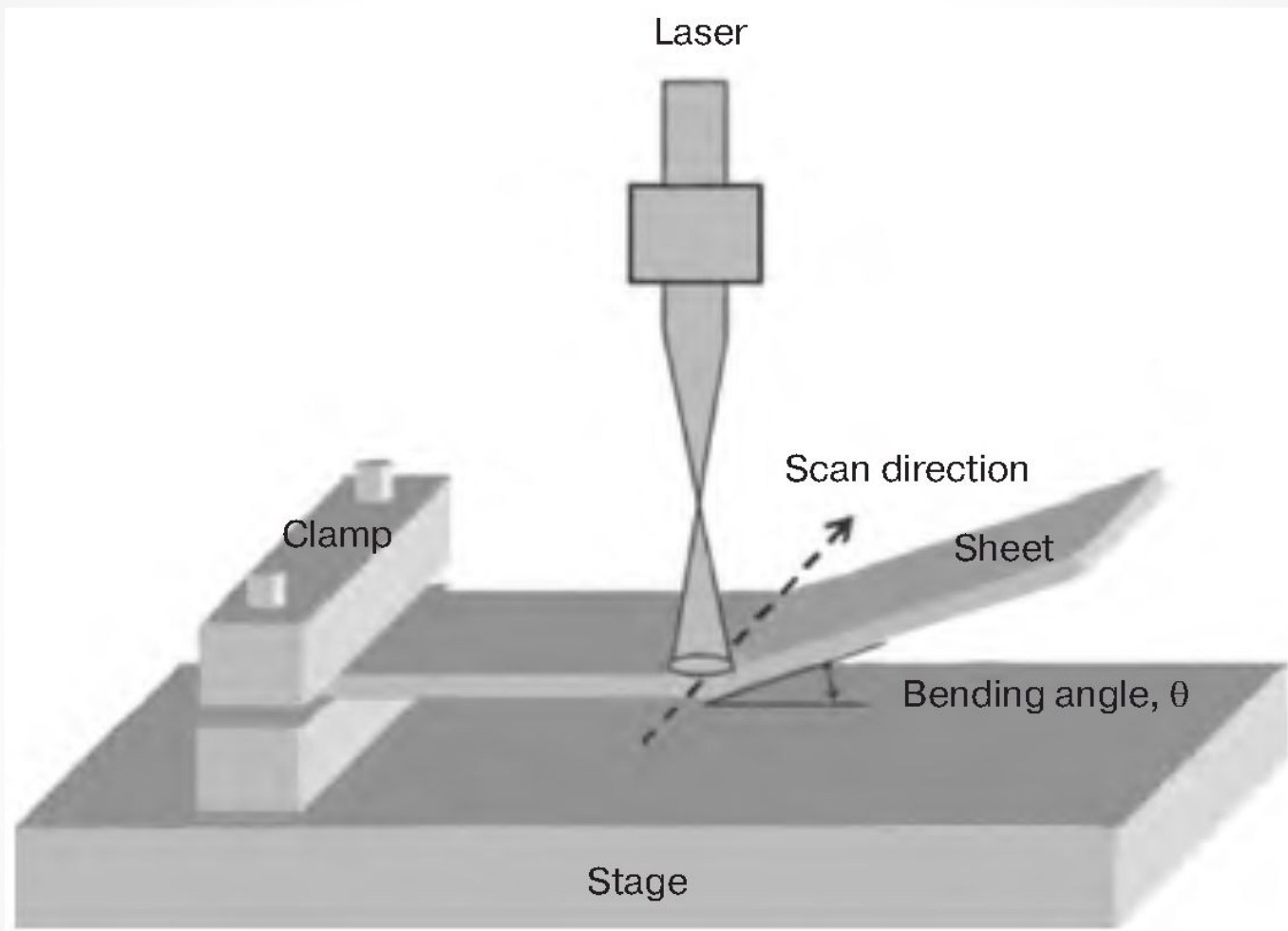
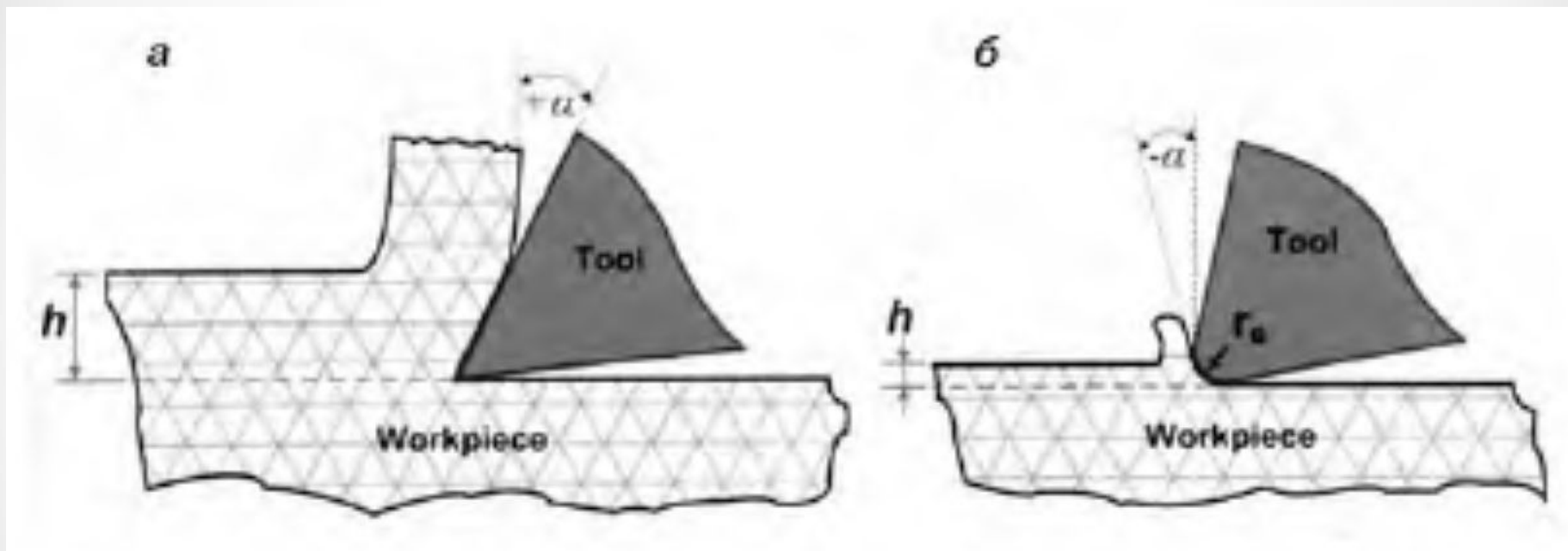


Схема процесса лазерного формования по месту изгиба

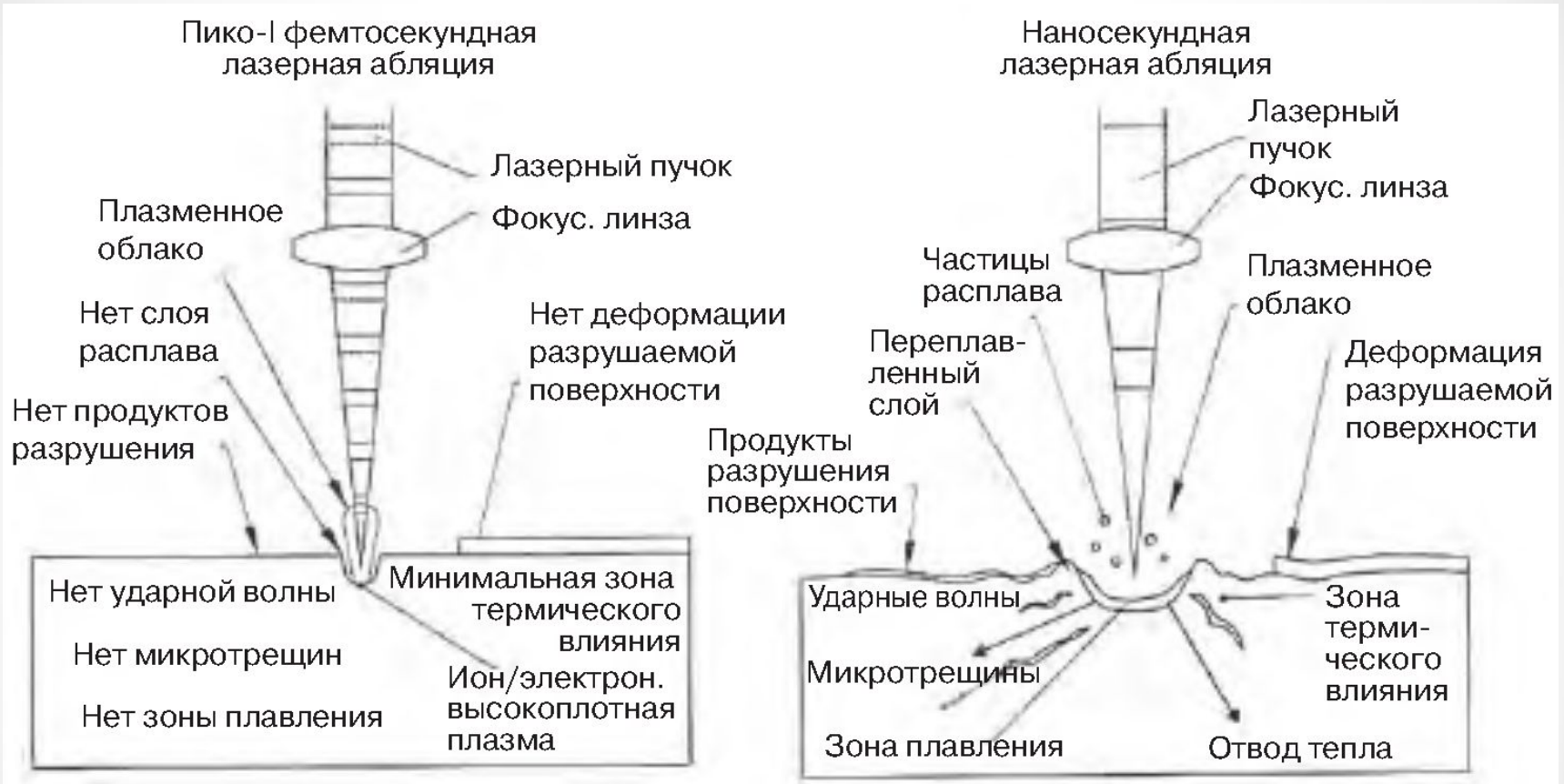
Технологии аддитивного производства



Сравнение процессов фрезерования:

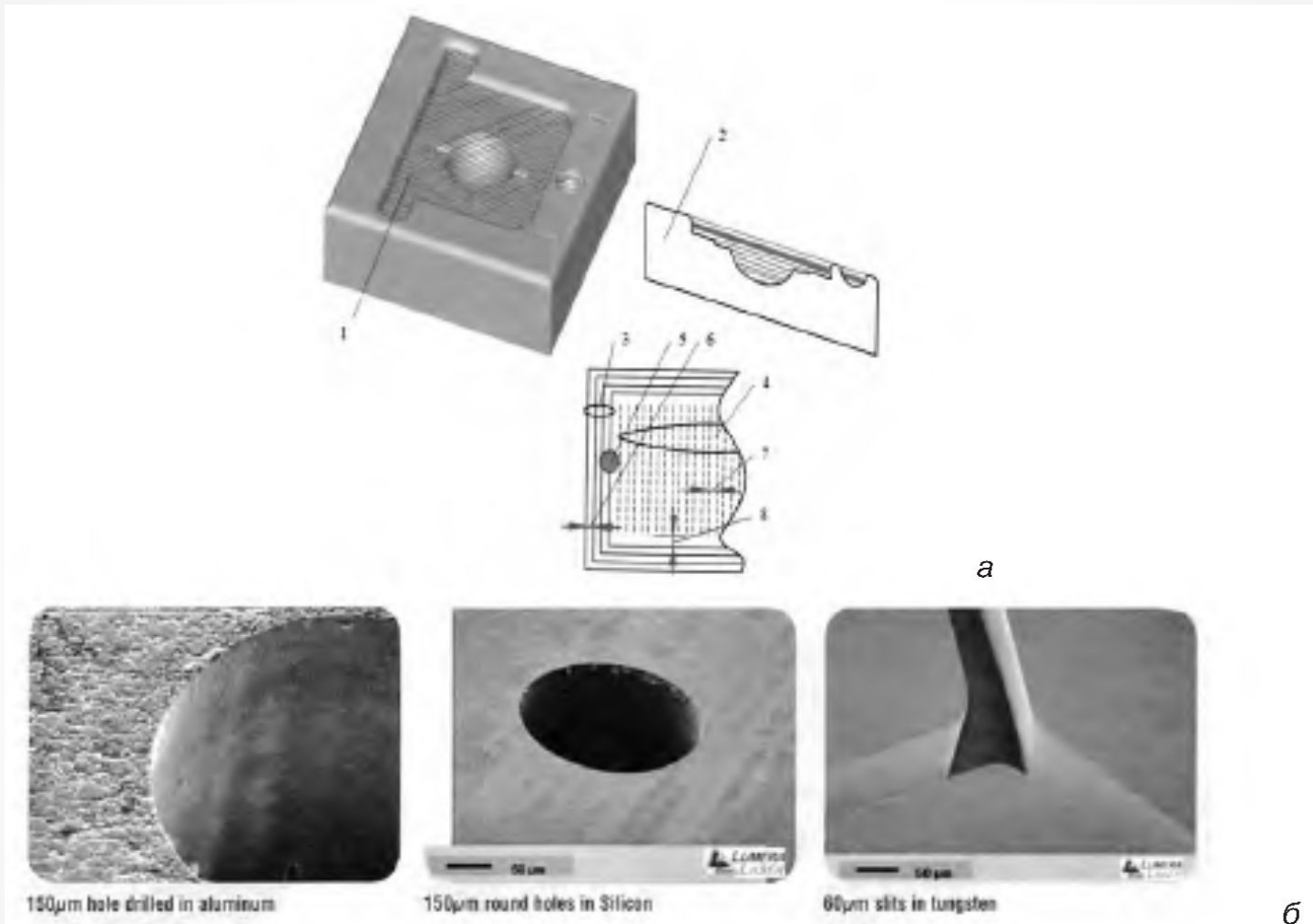
а — механическое фрезерование; б — лазерное микрофрезерование

Технологии аддитивного производства



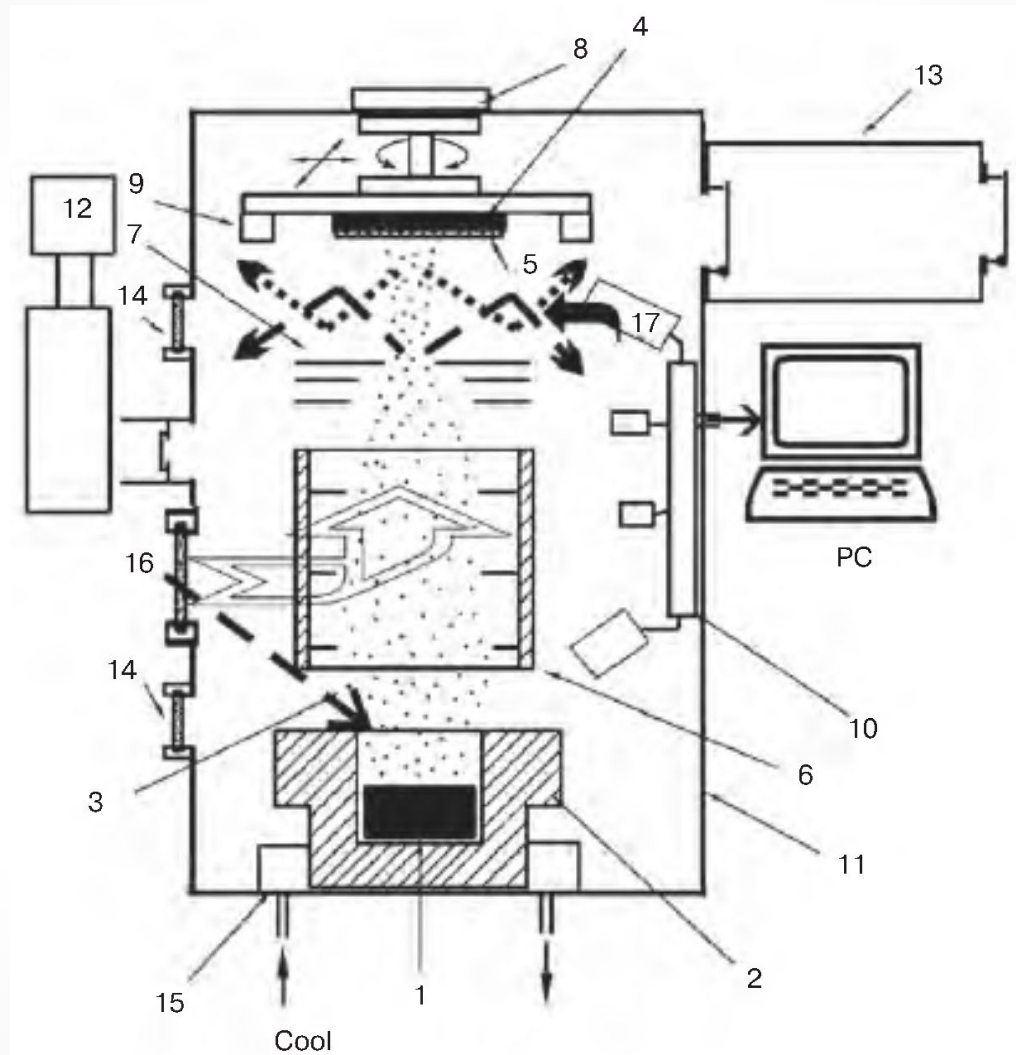
Основные различия пико- и наносекундной абляции при лазерном воздействии

Технологии аддитивного производства



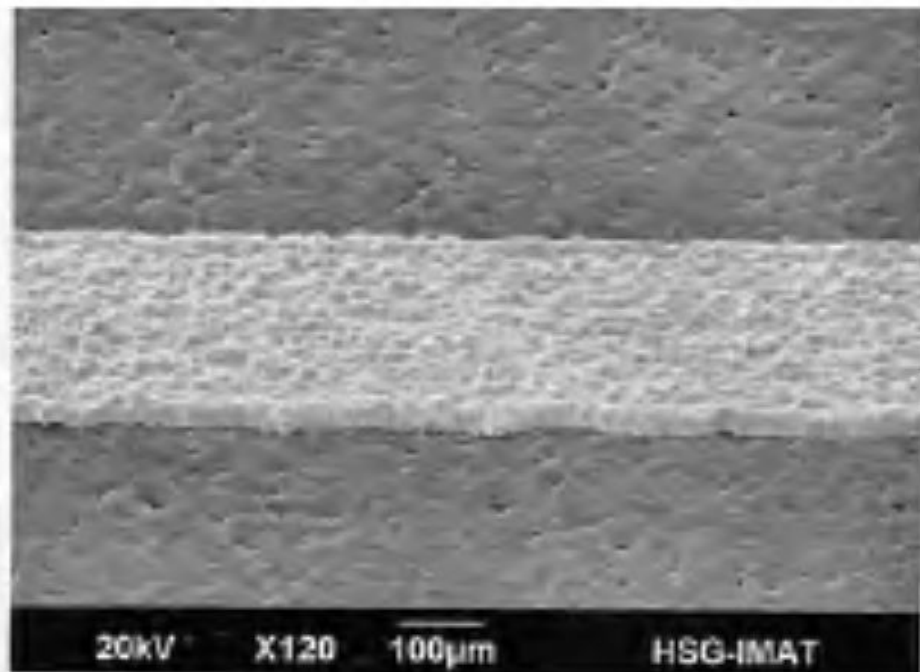
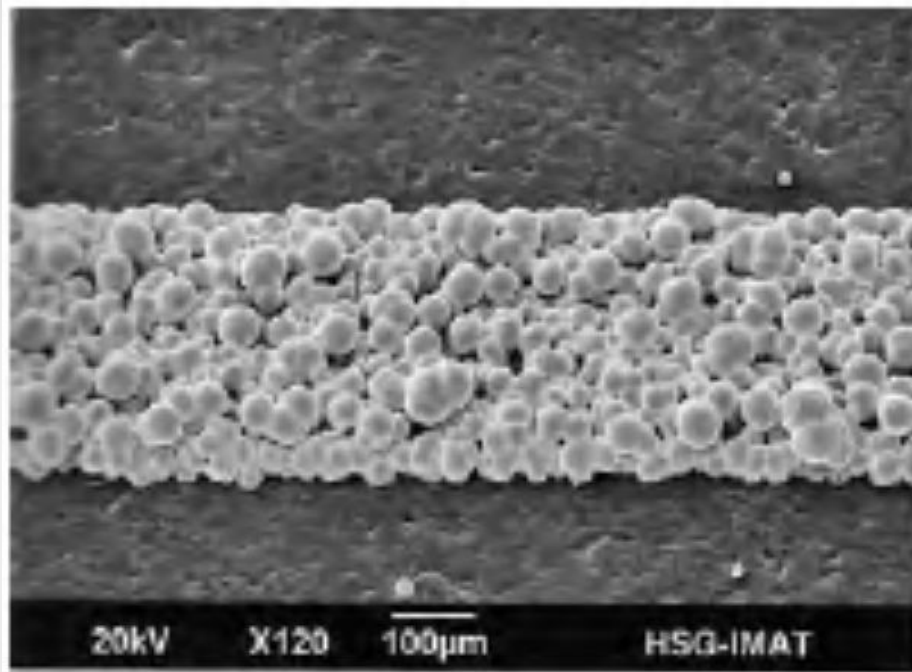
- Различие результатов лазерного микрофрезерования и прошивки:
 - a* — фемтосекундное;
 - б* — пикосекундное

Технологии аддитивного производства



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

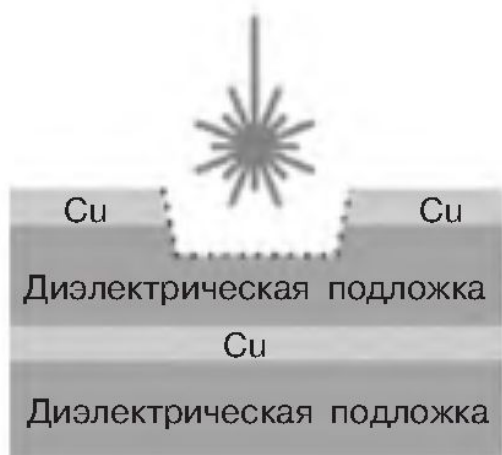
Технологии аддитивного производства



Качество процесса микроструктурирования
(формирование микросхемы)

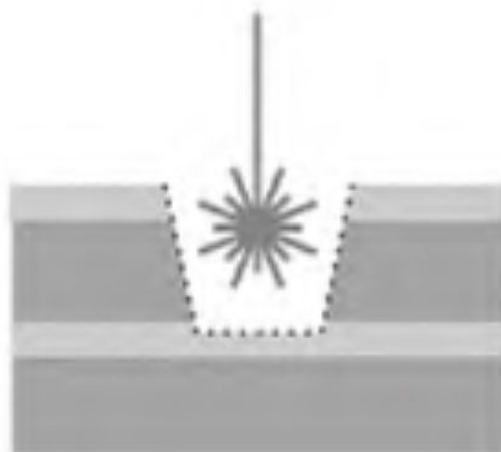
Технологии аддитивного производства

Лазерное излучение
большой мощности



Снятие медного покрытия

Лазерное излучение
малой мощности



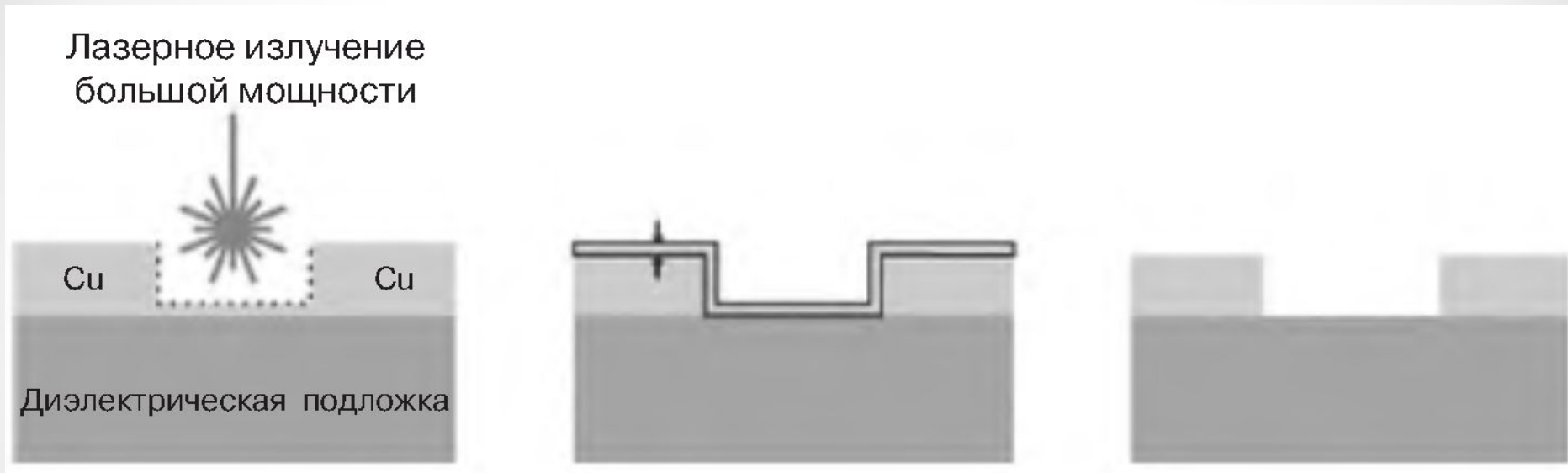
Сверление отверстия
в подложке



Металлизация отверстия

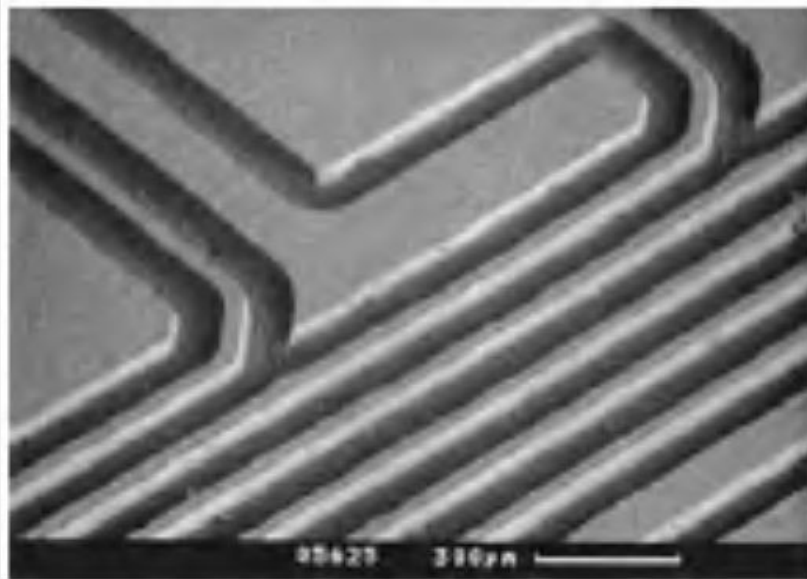
Обработка прецизионных переходных отверстий
в многослойных материалах

Технологии аддитивного производства

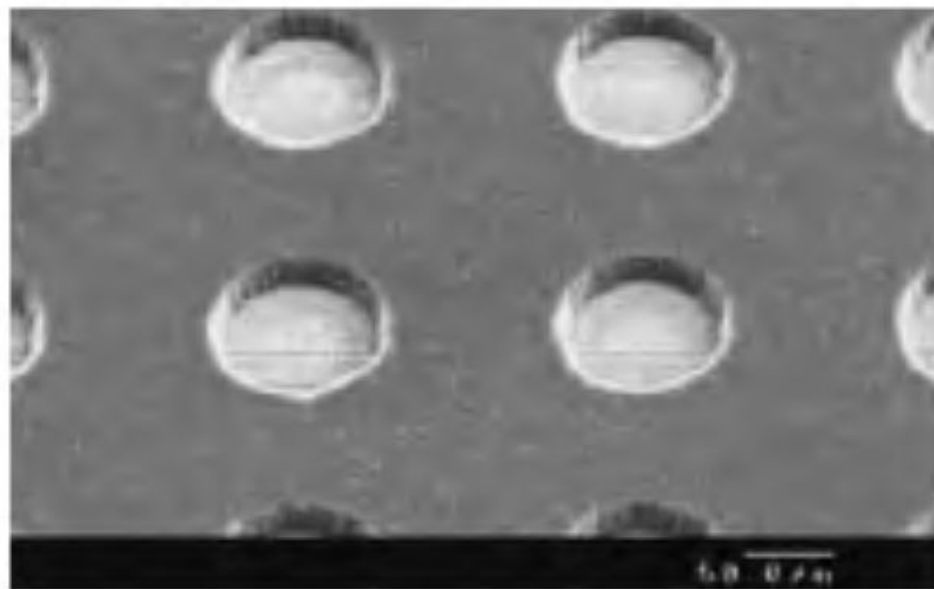


Обработка изолирующих дорожек в проводящем покрытии
на поверхности печатной платы

Технологии аддитивного производства



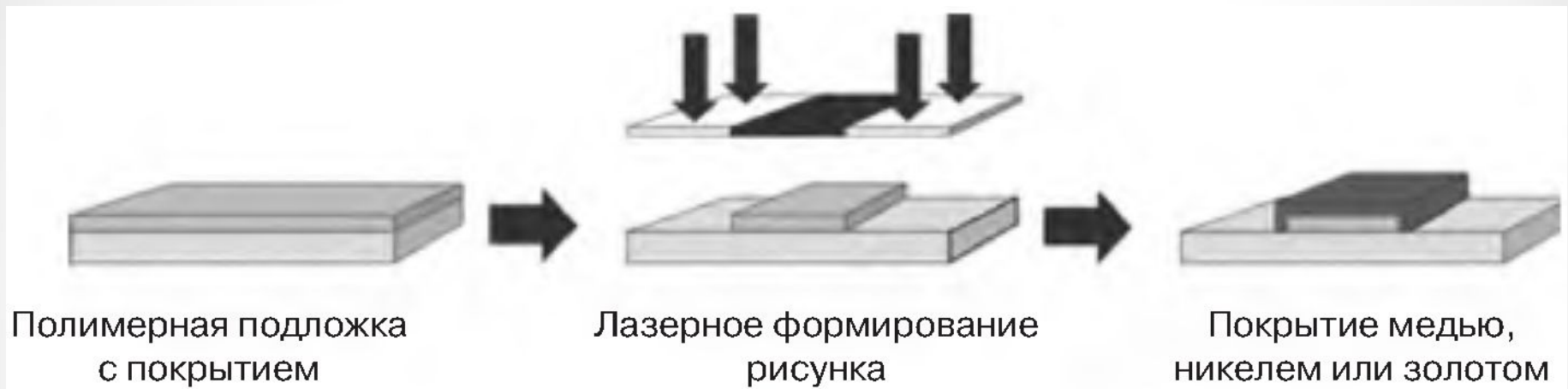
а



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