



ЦНИИТМАШ  
РОСАТОМ

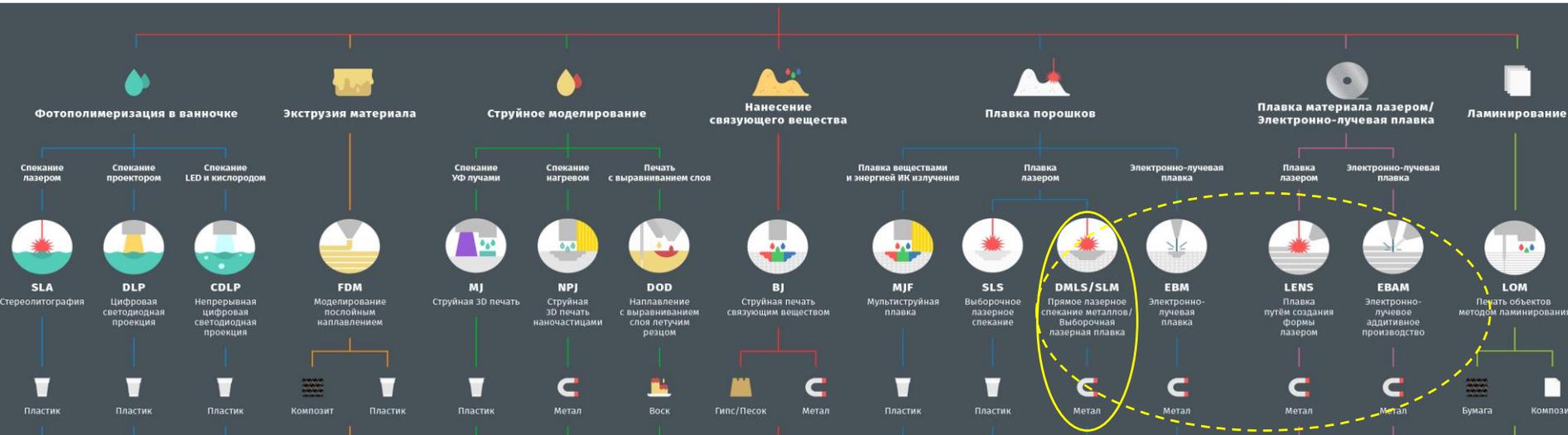
# Развитие аддитивных технологий в АО «НПО «ЦНИИТМАШ»

Орлов В.В., Иванов И.А., Юдин А.В.

# Классификация аддитивных технологий



ЦНИИТМАШ  
РОСАТОМ



Параметр	Проволока + EBF3	Проволока + лазер	Проволока + WAAM	Проволока + плазма	Порошок + DED
Стоимость	+++	++	+	+	+++
Эффективность процесса	80%	10%	60%	60%	10%
Металлургическое качество	+++	++	+++	+++	++
КИМ	95%	95%	95%	95%	40-60%
Требования к безопасности	+++	++	+	+	+++
Производительность	+++	+	++	++	+

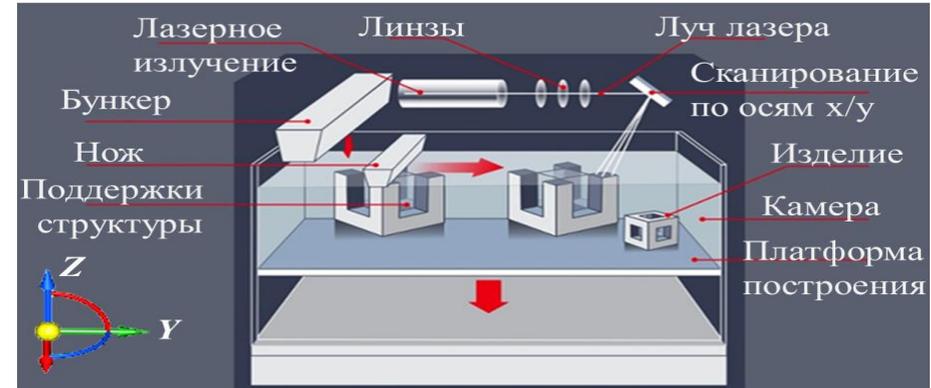
- formlabs
- envisiontec
- carbon
- envisiontec
- stratasys
- ultraker
- makerbot
- zortrax
- prusa
- printbot
- markforged

# Аддитивные технологии в АО «НПО «ЦНИИТМАШ»

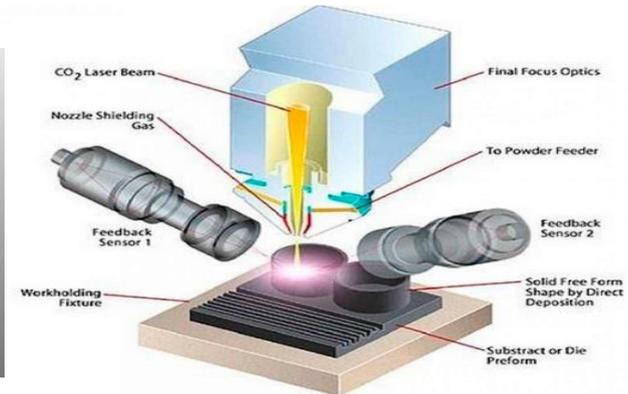


ЦНИИТМАШ  
РОСАТОМ

Технология селективного лазерного сплавления (SLM/СЛС) предназначена для изготовления заготовок деталей с характерными размерами деталей до 0,6 м. В качестве исходного материала использует порошок (как правило сферической формы), который сплавляется сфокусированным лучом лазерного излучения.



Технология прямого лазерного выращивания (DMD/ПЛВ) предназначена для изготовления заготовок деталей с характерными размерами деталей от 0,1 до 2 мм. В качестве исходного материала использует порошок (или проволока), который сплавляется сфокусированным лучом лазерного излучения.

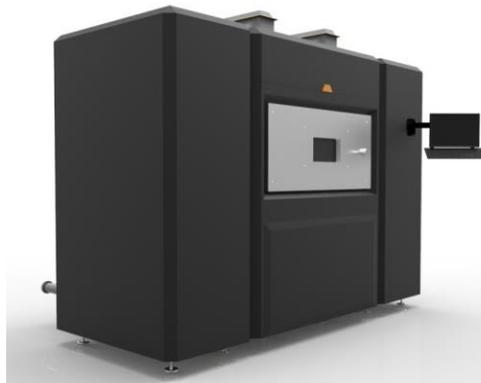
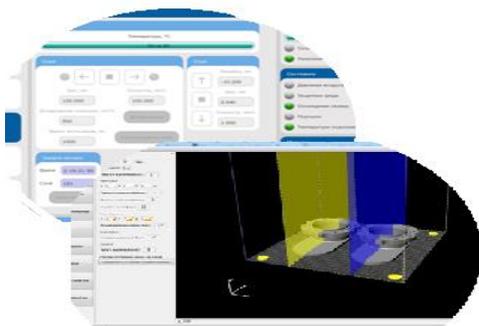


# Создание и совершенствование головных образцов аддитивного оборудования



ЦНИИТМАШ  
РОСАТОМ

Оборудование и ПО для АТ разработки АО «НПО «ЦНИИТМАШ»



ПО управления и подготовки 3D-моделей к печати собственной разработки

MeltMaster3D-160

MeltMaster3D- 250

MeltMaster3D-550

Рабочие размеры, мм	160×160×160	250×250×250 (100×100×150)	550x450x450 (D75x75; 150x150x150; 300x300x300)
Производительность (макс.), см <sup>3</sup> /час	10	40	15
Мощность лазера, Вт	200	400	1000
Толщина слоя, мкм	20÷50	20÷250	20÷250
Скорость сканирования (макс.), м/с	10	15	15
Сплавляемые материалы	Нержавеющие и инструментальные стали, сплавы на основе цветных металлов (Ni-Co и др.), титан и его сплавы, сплавы алюминия и др.		

# Первый 3D- принтер разработки АО «НПО «ЦНИИТМАШ»



ЦНИИТМАШ  
РОСАТОМ

## Основные Технические Характеристики

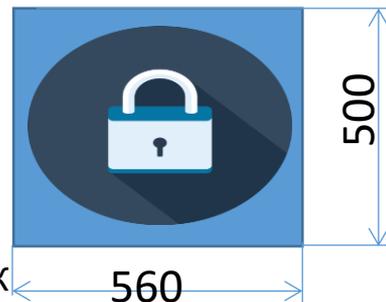
Зона построения, мм	550×450×450*
Точность построения при макс. Габарите	11 квалитет / 440 мкм
Количество лазерно-оптических систем	1/ (2 или 4 опция)
Используемые материалы	МПК из стали, титановых и никелевых сплавов
Температура подогрева платформы, С°	200
Системы контроля печати (есть ?\ тип)	Предусмотрена установка
Габариты установки без упаковки, мм	2940 × 2500 × 3000
Вес установки без упаковки. кг	2500
Требование к материалу фракция\сферичность	МПК сферический до 100мкм

\*- Модульная архитектура позволяет увеличить зону построения до 580x450x800 мм



Первый 3D- принтер серии MeltMaster3D- 550 создан в 2016 году в рамках соглашения с Министерством образования и науки РФ

На оборудовании MeltMaster3D-550 в 2020 году в интересах ЯОК было распечатано методом СЛС самое большое изделие в РФ из никелевого жаропрочного сплава ВЖ159 (Вес изделия 50 кг)



Среднее значение остаточной пористости материала равно 0,03%

T, °C	$\sigma_B$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\sigma_{0,2}$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\delta_5$ , %	$\psi$ , %
20	1020	757	32	30
850	390	350	17	40

# Примеры изделий для медицины напечатанных на оборудовании АО «НПО «ЦНИИТМАШ»



ЦНИИТМАШ  
РОСАТОМ

Прототипы имплантатов распечатанные на 3D-принтере MeltMaster3D-550 из титана BT1-00

## Челюстно-лицевая хирургия



Сегмент нижней челюсти



Сегмент нижней челюсти



Чашка тазобедренного сустава

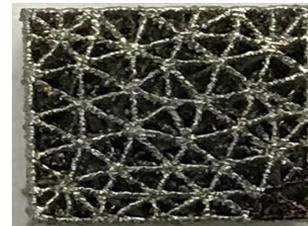


Глазница

Работы выполнены совместно с предприятием  
АО «Наука и инновации» и НИТУ «МИСиС»

## Механические характеристики материала с остаточной пористостью менее 0,1%

Материал	Предел прочности, МПа	Предел Текучести, МПа	Отн. удлинение, %	Отн. сужение, %
СЛП +ТО	522	423	19,1	29,2
Информация по мех. свойствам ГОСТ Р ИСО 5832-2 (Grade)				
2	345	275	20	-
3	450	380	18	-
4А	550	483	15	-



## Экспериментальный результат

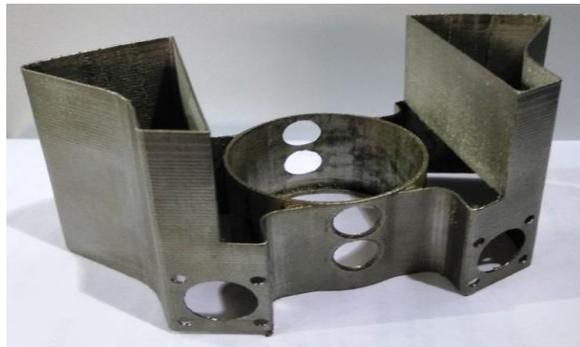
Е, ГПа	Б <sub>у</sub> , МПа	ΔL <sub>(P=50Н)</sub> , мм	ε <sub>(P=50Н)</sub> , %
1,68	47,4	0,0027	0,026
Расчетные значения			
1-2	50	~0	~0

# Примеры изделий напечатанных на оборудовании АО «НПО «ЦНИИТМАШ»



ЦНИИТМАШ  
РОСАТОМ

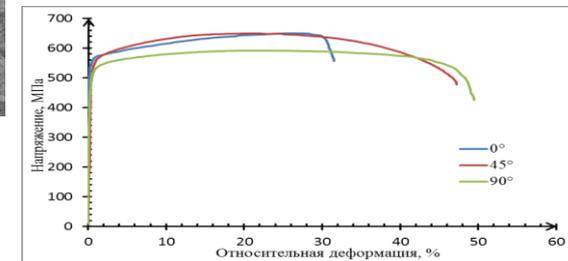
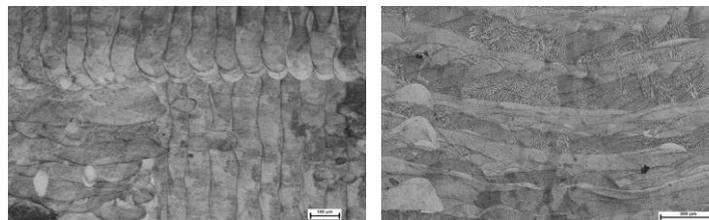
Сталь 316L



Механические характеристики материала с остаточной пористостью менее 0,1%

316L	Предел прочности, $\sigma_B$ Мпа	Удлинение, $\epsilon$ %	Модуль упругости (Юнга), Е Мпа	Предел текучести, $\sigma_{0,2}$ МПа
Тип	>520	>40	200	>220
Мин	485	40	-	170
Экспериментальные данные				
Ср	628	40,4	213	515
Мин	591	30	-	478

Тонкостенный корпус прибора



Элемент бурового насоса



# Второй 3D- принтер разработки АО «НПО «ЦНИИТМАШ»



ЦНИИТМАШ  
РОСАТОМ

## Основные Технические Характеристики



Зона построения, мм	160×160×160
Точность построения при макс. Габарите	10 квалитет / 160 мкм
Используемые материалы	МПК из стали, титановых и никелевых сплавов
Количество Лазеров	1
Температура подогрева платформы, С°	200
Системы контроля печати (есть \ тип)	Предусмотрена установка
Габариты установки без упаковки, мм	1177 × 1685 × 1790
Вес установки без упаковки, кг	1250
Требование к материалу фракция\сферичность	МПК сферический до 100мкм

Второй 3D- принтер серии MeltMaster3D- 160 создан в 2016 году в рамках соглашения с Министерством образования и науки РФ.

В инициативном порядке разрабатывается технология печати кейджей для позвоночника из титанового сплава (BT6)

## Отработка концепции непрерывной печати



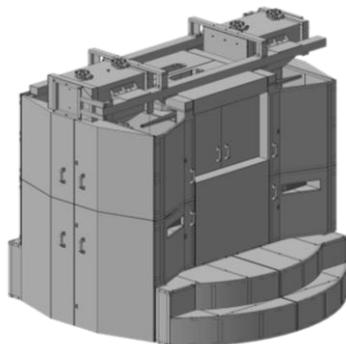
# Первая мультилазерная двух-порошковая установка СЛП



ЦНИИТМАШ  
РОСАТОМ

## Основные Технические Характеристики

Зона построения, мм	520×420×4200
Точность построения при макс. Габарите	10 квалитет / 160 мкм
Используемые материалы	МПК из стали, титановых и никелевых сплавов
Количество Лазеров	2
Температура подогрева платформы, С°	200
Количество одновременно сплавляемых материалов	2
Габариты установки, мм	2940 × 2500 × 3000
Вес установки без упаковки, кг	2800
Требование к материалу фракция\сферичность	МПК сферический до 100мкм



Основной особенностью данного 3D-принтера является возможность создания полиметаллических изделий за один производственный цикл

Третий 3D- принтер изготовлен в рамках соглашения с Министерством образования и науки РФ, совместно с НПО «ЦЕНТРОТЕХ» и передана в эксплуатацию в 2018 году.

# 3D- принтер для изделий медицинского назначения



ЦНИИТМАШ  
РОСАТОМ



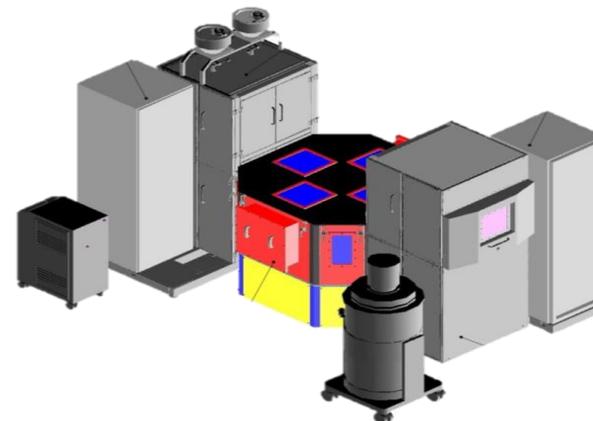
Четвертый 3D- принтер серии MeltMaster3D- 250M разработан в 2018 году. Собрано и изготовлено две единицы оборудования в 2020 году.

Разработан и изготовлен по заказу АО «Наука и инновации»

## Основные Технические Характеристики

Зона построения, мм	260×260×260
Точность построения при макс. Габарите	10 квалитет / 185 мкм
Используемые материалы	МПК титановых сплавов
Количество Лазерно-оптических систем	2
Температура подогрева платформы, С°	200
Требование к материалу фракция\сферичность	МПК сферический до 100мкм

Реализована концепция непрерывной печати



# Первый высокотемпературный исследовательский 3D-принтер



ЦНИИТМАШ  
РОСАТОМ



Пятый 3D-принтер серии MeltMaster3D-250HT разработан в 2019 году.  
Поставлен во ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» в 2020 году.

## Основные Технические Характеристики

Зона построения, мм	250×250×250
Точность построения при макс. Габарите	10 квалитет / 185 мкм
Используемые материалы	МПК из стали, алюминиевых, титановых и никелевых сплавов
Количество Лазерно-оптических систем	2
Температура подогрева платформы, С°	500
Системы контроля печати	Оснащен системами контроля
Габариты установки без упаковки, мм	2740 × 1215 × 2280
Вес установки без упаковки, кг	3073
Требование к материалу фракция\сферичность	МПК сферический до 100мкм

## Основные особенности MeltMaster3D-250HT

- наличие подогрева камеры построения до высоких температур (500 °С);
- наличие системы контроля качества нанесения порошкового слоя с разрешающей способностью 5 мкм;
- наличие системы контроля температурных полей и аналитическое программное обеспечение;
- наличие системы контроля мощности лазерного излучения, установленный на выходе лазерно-оптической системы;

# Пример комплектации оборудования серии MeltMaster3D

В зависимости от целей, оборудование серии MeltMaster3D может комплектоваться различными системами контроля технологического процесса сплавления.

Мониторинг температурных полей



MeltMaster3D-250HT



Мониторинг качества укладки порошка



Мониторинг мощности лазерного излучения



Мониторинг температуры ванны расплава



# Создание и совершенствование головных образцов аддитивного оборудования



ЦНИИТМАШ  
РОСАТОМ

Команда  
АО «НПО «ЦНИИТМАШ» лауреаты премии  
«ЧЕЛОВЕК ГОДА» 2016  
(номинация НА ШАГ ВПЕРЕДИ)  
За создание первого 3D- принтера



MeltMaster3D-250HT



Команда АО «НПО «ЦНИИТМАШ» вышла в финал премии «ЧЕЛОВЕК ГОДА»  
2020  
(номинация НА ШАГ ВПЕРЕДИ)

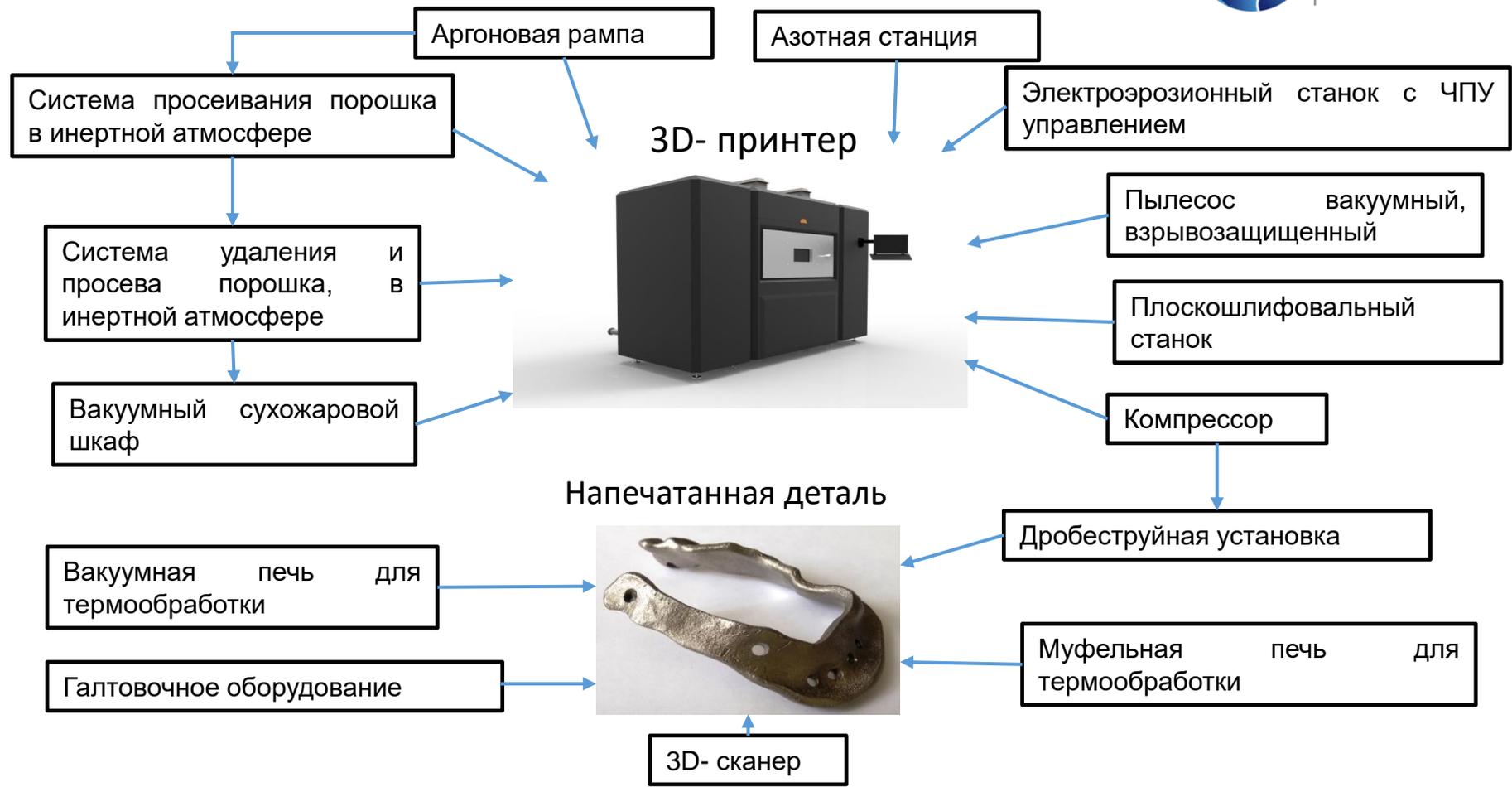


Разработан, изготовлен и в 2020 году введен в эксплуатацию первый высокотемпературный научно-исследовательский 3D-принтер MeltMaster3D-250HT для производства металлических, сложнопрофильных изделий методом селективного лазерного сплавления (СЛС/SLM)

# Пример комплектации Участка на базе 3D-принтера



ЦНИИТМАШ  
РОСАТОМ





ЦНИИТМАШ  
РОСАТОМ

# Спасибо за внимание

**Орлов Виктор Викторович**  
Генеральный директор

Тел.: +7 (495) 675-89-90

E-mail: [cniitmash@cniitmash.com](mailto:cniitmash@cniitmash.com)  
[www.cniitmash.com](http://www.cniitmash.com)

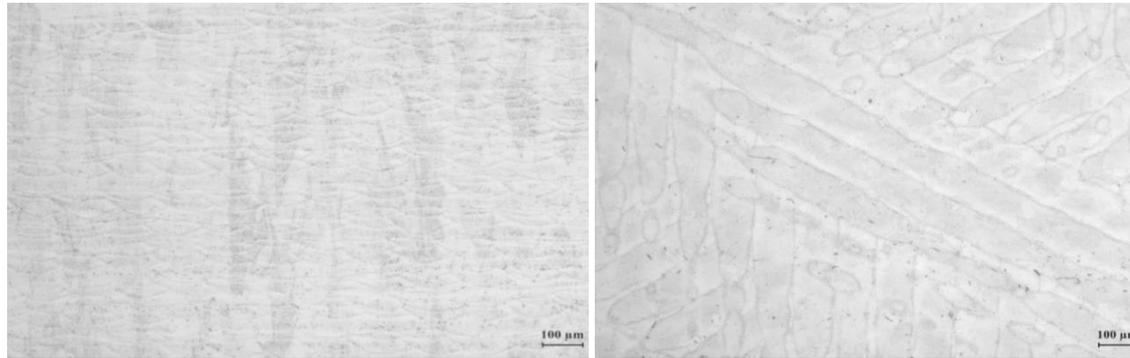
# Свойства материалов, полученных по технологии СЛП



ЦНИИТМАШ  
РОСАТОМ

Результаты исследований микроструктуры на пористость никелевого сплава ВЖ-159

Среднее значение остаточной пористости материала равно 0,03%



Т, °С	$\sigma_B$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\sigma_{0,2}$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\delta_5$ , %	$\psi$ , %
20	1020	757	32	30
850	390	350	17	40

# Свойства материалов, полученных по технологии СЛП



ЦНИИТМАШ  
РОСАТОМ

## Результаты исследований никелевого сплава растяжение

T, °C	$\sigma_B$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\sigma_{0,2}$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\delta_5$ , %	$\psi$ , %
Вертикальное направление				
20	942,5	687,5	31,75	29,6
Горизонтальное направление				
20	1045	777,5	30,75	32,5
Угловое направление				
20	1073,33	806,67	32	28,33
Анизотропия*	1,14	1,17	1,01	0,96

T, °C	$\sigma_B$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\sigma_{0,2}$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\delta_5$ , %	$\psi$ , %
Вертикальное направление				
850	381,7±10,3	347,5±17,0	22,9±2,9	72,8±1
Горизонтальное направление				
850	379,0±7,4	338,75±7,50	18,5±1,5	21,6±1,4
Угловое направление				
850	400,8±13,6	369,2±12,0	9,35±1,95	22,83±4,45
Среднее	387±12	352±16	16,9±6,9	39,1±29,2

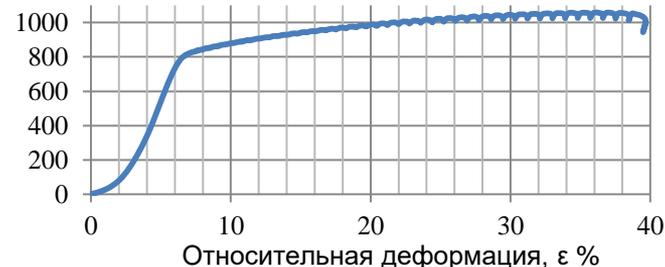
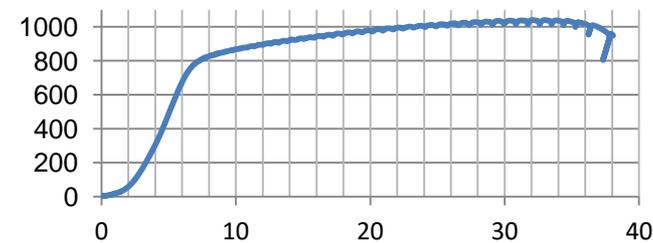
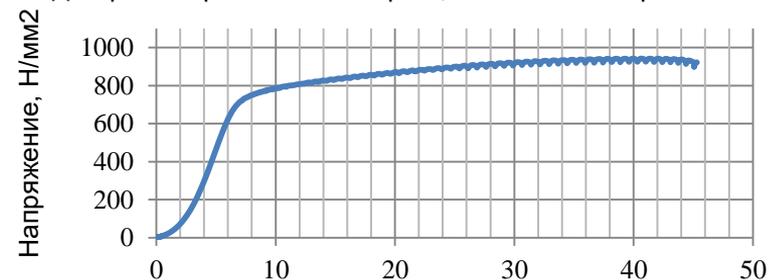
Образцы после СЛП безТО.

При 20°C  $\sigma_B \geq 960$  Н/мм<sup>2</sup> ;  $\sigma_{0,2} \geq 590$  Н/мм<sup>2</sup> ;  $\delta_5 \geq 19\%$  ;  $\psi \geq 30\%$ ,

при 850°C  $\sigma_B \geq 290$  Н/мм<sup>2</sup> ;  $\sigma_{0,2} \geq 265$  Н/мм<sup>2</sup> ;  $\delta_5 \geq 17\%$  ;  $\psi \geq 35\%$ , из таблицы видно, что сплав удовлетворяет ТУ 14-131-1042-2008

Анизотропия механических характеристик монолитных образцов при деформации растяжением, величина которой для предела текучести достигает 1,2.

Диаграммы растяжения образцов после СЛП при 20°C



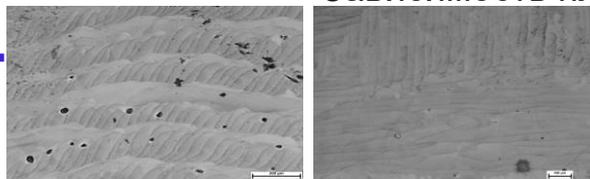
# Свойства материалов, полученных по технологии СЛП (Сталь 316L)



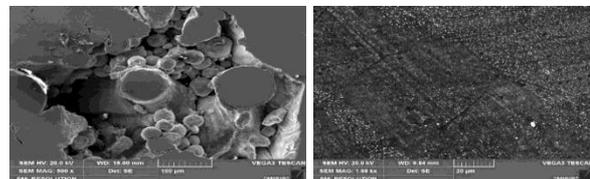
ЦНИИТМАШ  
РОСАТОМ

## Зависимость плотности образцов от технологических параметров

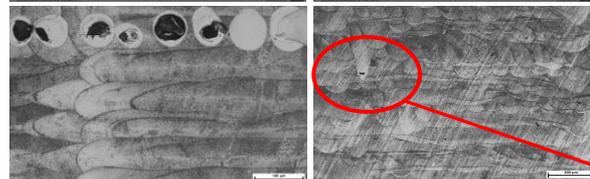
1



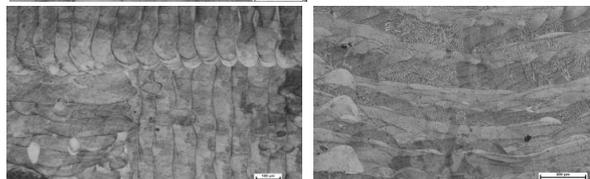
2



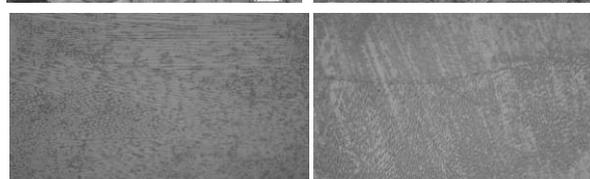
3



4

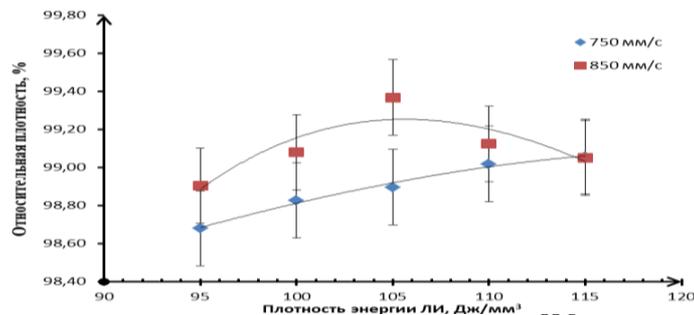


5



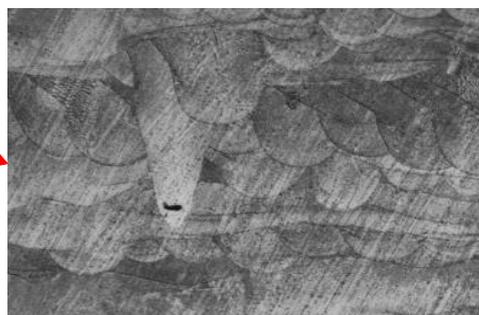
II

### Зависимость от плотности энергии ЛИ

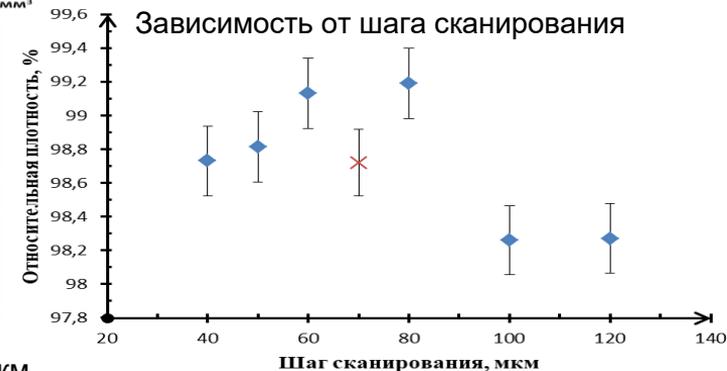


Материал сталь 316L

$$q_w = \frac{W}{v \cdot s \cdot h}$$



### Зависимость от шага сканирования



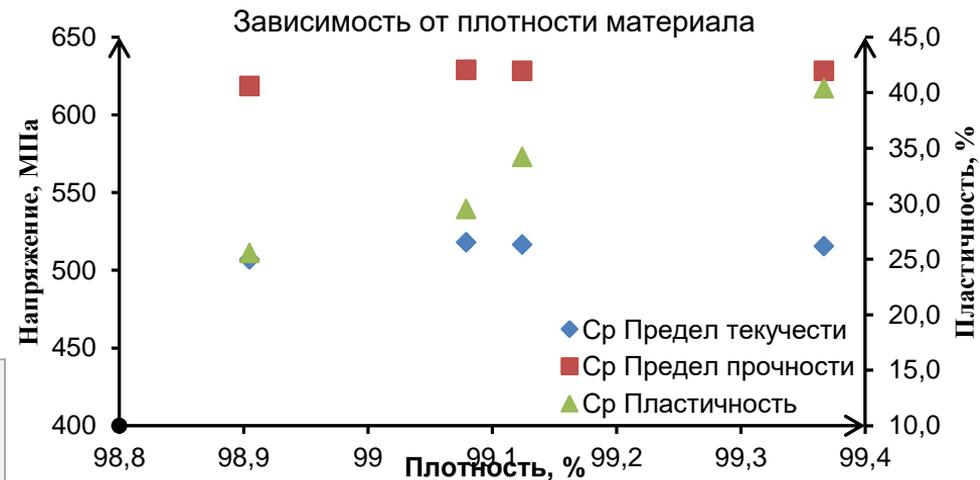
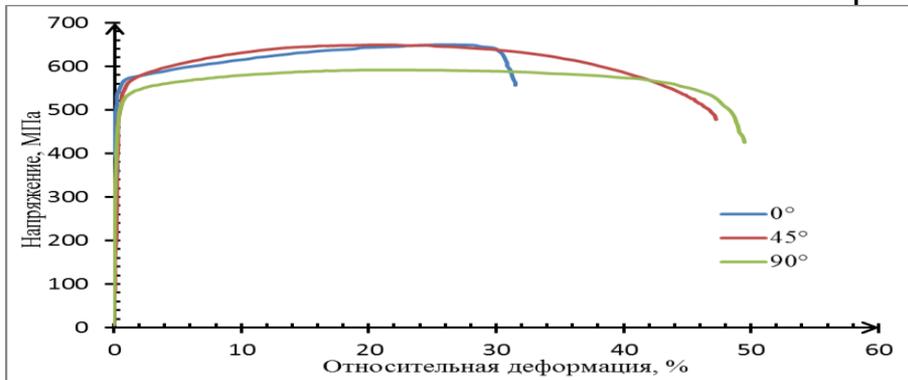
1. Структура: шаг сканирования 40 мкм.
2. Структура: шаг сканирования 120 мкм
3. Структура: шаг сканирования 80 мкм, плотность энергии 115 Дж/мм³
4. Структура: шаг сканирования 80 мкм, плотность энергии 105 Дж/мм³
5. Микроструктура: шаг сканирования 80 мкм, плотность энергии 105 Дж/мм³

# Свойства материалов, полученных по технологии СЛП



ЦНИИТМАШ  
РОСАТОМ

## Механические характеристики стали 316L



316L	Предел прочности, $\sigma_B$ МПа	Удлинение, $\varepsilon$ %	Модуль упругости (Юнга), Е МПа	Предел упругости (текучести), $\sigma_{0,2}$ МПа
Тип	>520	>40	200	>220
Мин	485	40	-	170
Экспериментальные данные				
Ср	628	40,4	213	515
Мин	591	30	-	478

Данные по твёрдости примерно идентичны  
Показатель анизотропии лежит в диапазоне 1,1-1,3, со средним значением ~1,2, кроме относительного удлинения ~1,8



# Свойства материалов, полученных по технологии СЛП



ЦНИИТМАШ  
РОСАТОМ

## Результаты исследований механических свойств сплава ВТ1-00

Сплошные образцы из титанового сплава марки ВТ1-00 выращивались в атмосфере аргона с остаточным содержанием кислорода менее 800 ppm.



В исходном материале не возможно идентифицировать зерна и их размер, но:

- после ТО (700 °С, 2 часа) наблюдаются зерна со средним размером 32 мкм
- после ТО (850 °С, 6 часов) наблюдаются зерна со средним размером 44 мкм

Требования к материалу ВТ1-00 по ГОСТ Р ИСО 5832-2 средний размер зерен не должен превышать №5 по ASTM E 112, что соответствует размеру 63,5 мкм.

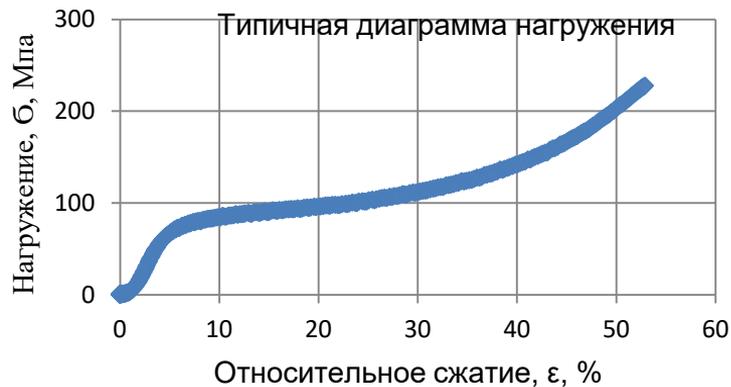
Материал	Предел прочности, МПа	Предел Текучести, МПа	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %
СЛП	638	553,5	12	17,5
700°С, 2 часа, охлаждение на воздухе				
СЛП +ТО	513	436	16,0	23,9
850°С, 6 часов, охлаждение на воздухе				
СЛП +ТО	522	423	19,1	29,2
ГОСТ 23755-79 (Плиты)	295-490	-	14	28
Информация по мех. свойствам ГОСТ Р ИСО 5832-2 (Grade)				
1 ELI (отожженный)	200	140	30	-
1 (отожженный)	240	170	24	-
2 (отожженный)	345	275	20	-
3 (отожженный)	450	380	18	-
4А (отожженный)	550	483	15	-
4В (Х/Д)	680	520	10	-

# Свойства материалов, полученных по технологии СЛП

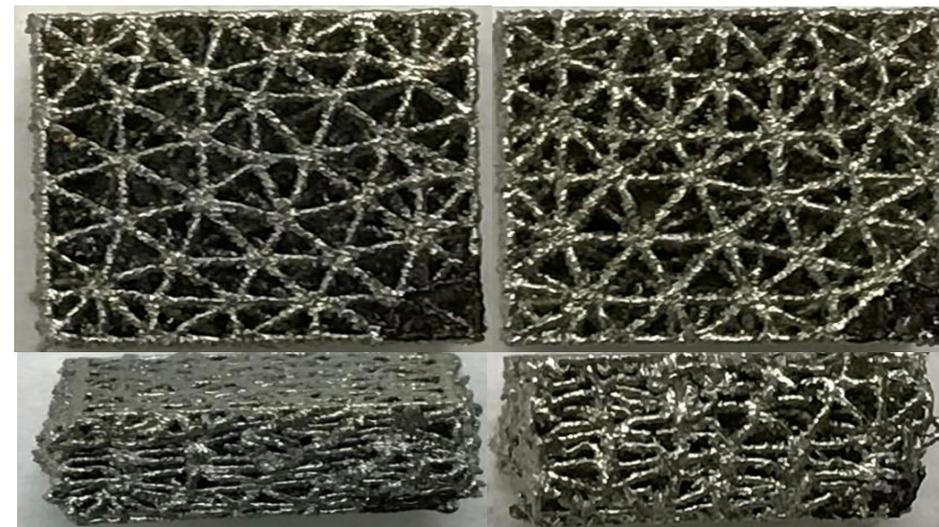
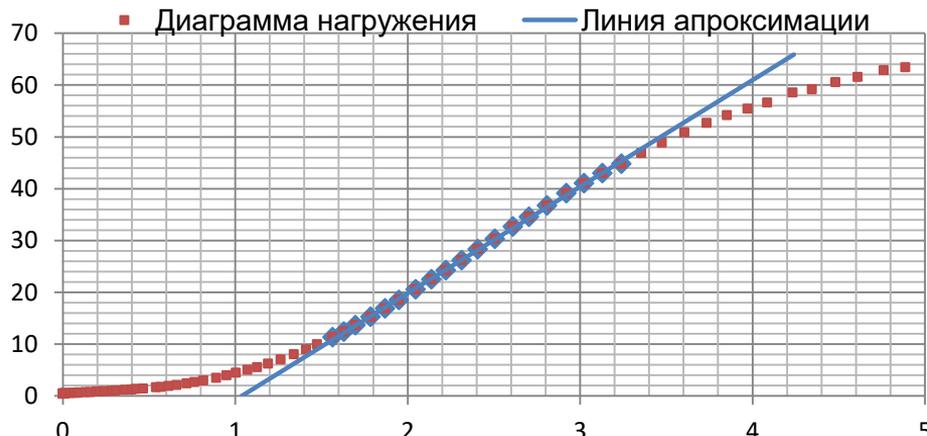


ЦНИИТМАШ  
РОСАТОМ

Результаты исследований ячеистых структур на сжатие (ВТ1-00)



Экспериментальный результат			
E, ГПа	$\sigma_y$ , МПа	$\Delta L(P=50H)$ , мм	$\epsilon(P=50H)$ , %
1,68	47,4	0,0027	0,026
Расчетные значения			
1-2	50	~0	~0

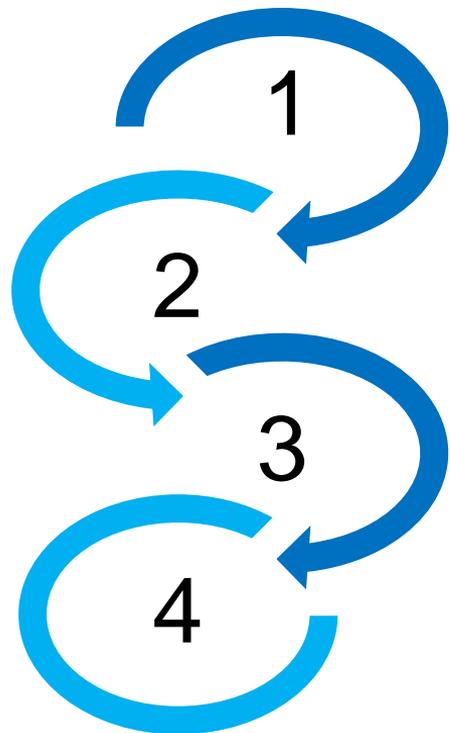


Работы выполнены по заказу предприятий АО «Наука и инновации» и НИТУ «МИСиС»

# Барьеры для внедрения АТ



ЦНИИТМАШ  
РОСАТОМ



Использование традиционных подходов  
Все конструкции разработаны под использование традиционных технологий, для которых уже есть вся необходимая НТД и десятилетиями накопленный опыт

Отсутствие компетенций и несовершенство технологии  
Отсутствие научных школ и компетенций в области АТ

Отсутствие кадров  
Отсутствие квалифицированных специалистов, способных обучать новые кадры конструированию и использованию АТ

Отсутствие нормативной и технической документации  
Отсутствие технического регулирования и НТД, относящейся к АТ (материалы, технология, оборудование)

1. Полностью отсутствует рынок АТ

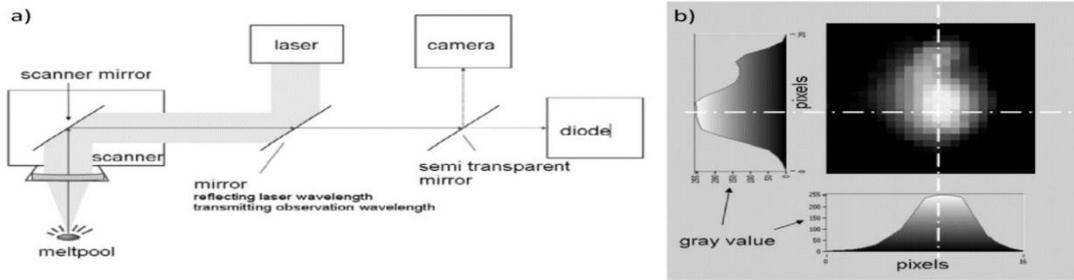
2. АТ – это часть цифровых решений для реального производства

# Назначение и типы систем контроля технологических процессов

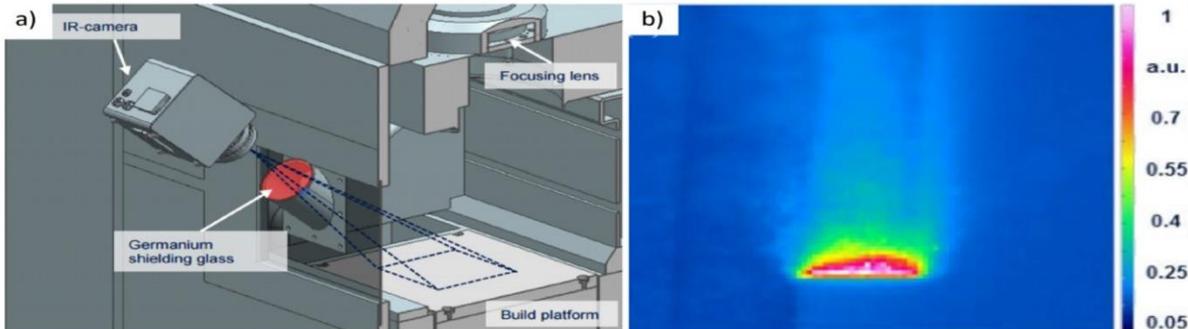


ЦНИИТМАШ  
РОСАТОМ

Система контроля температуры ванны расплава на основе пирометра



Система контроля температурных полей на основе тепловизора или камеры с кмпм матрицей



Контроль образования дефектов:

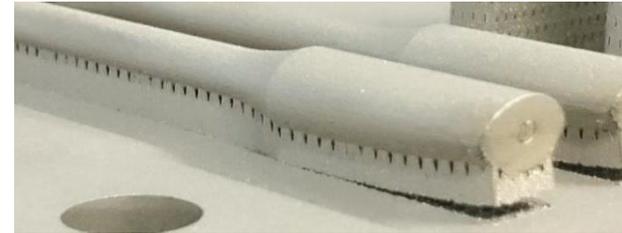
- Трещины
- Поры
- Пустоты

# Назначение и типы систем контроля технологических процессов



ЦНИИТМАШ  
РОСАТОМ

Система контроля качества формирования порошкового слоя и анализа точности построения деталей в процессе печати построена на базе камер видимого спектра высокого разрешения.



Дефект порошкового слоя

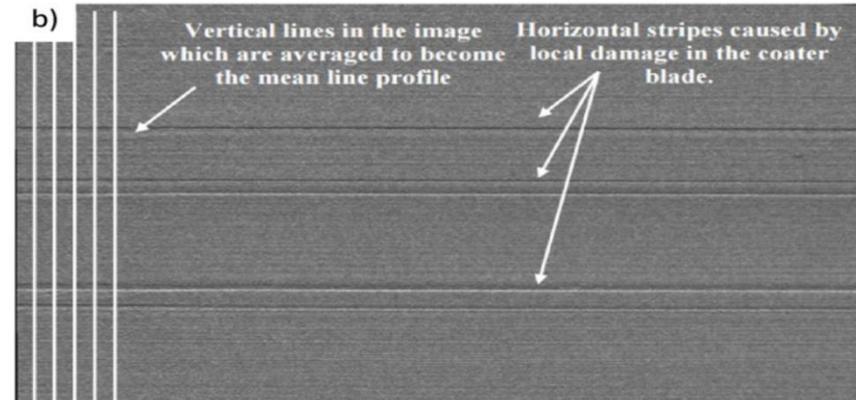
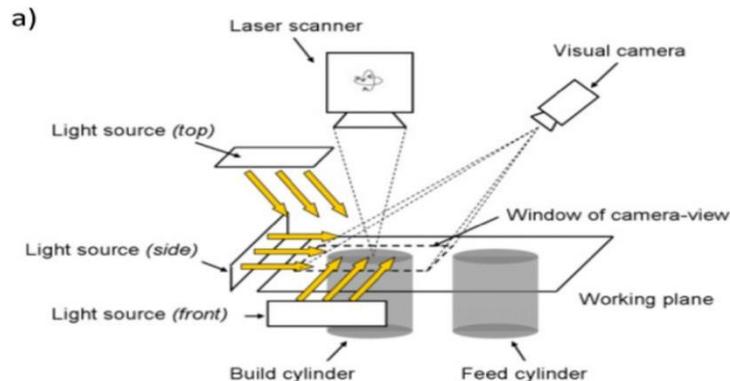


Дефект в материале изделия

Изменение формы детали/  
Коробление



Дефект в материале изделия и дефект формы изделия





Активность	Статус	Срок
1. Создание с вузами (МИФИ, МИСиС, УдГУ, УРФУ, МГТУ им. Баумана и пр.) образовательных программ, адаптированных к внедрению цифровых решений, в том числе применительно к АТ.	Стадия переговоров с вузами	2021
2. Разработка учебных программ для повышения квалификации специалистов предприятий атомных и других отраслей машиностроения.	Заявки на обучение сотрудников центров АТ в АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»	2021
3. Проведение на регулярной основе международной конференции на базе ЦНИИТМАШ по АТ.	В 2019 и 2020 проведены международные конференции по АТ	ежегодно
4. Раздел в журнале «Тяжелое машиностроение», посвященной теории и практике АТ в атомном, энергетическом машиностроении и других ответственных отраслях.	Запланированы первые публикации в 2 кв. 2021 года	регулярно
5. Публикационная активность	Идет систематическая публикационная работа	регулярно
6. Подготовка кадров собственными силами (привлечение студентов, аспирантов)	Идет постоянная и систематическая работа по вовлечению студентов и привлечению аспирантов в работы по АТ.	регулярно