



ЦНИИТМАШ  
РОСАТОМ

# Системы непосредственного контроля - основа аттестации и оценки соответствия в аддитивном производстве

**Иванов Иван Алексеевич**

Заместитель генерального директора – директор ИМиМ

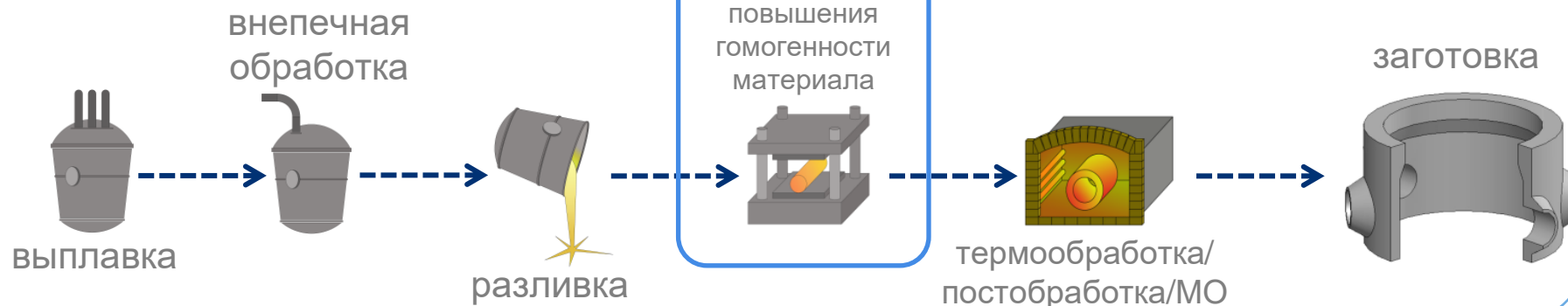
# 3D-печать – сложный микрометаллургический процесс



ЦНИИТМАШ  
РОСАТОМ

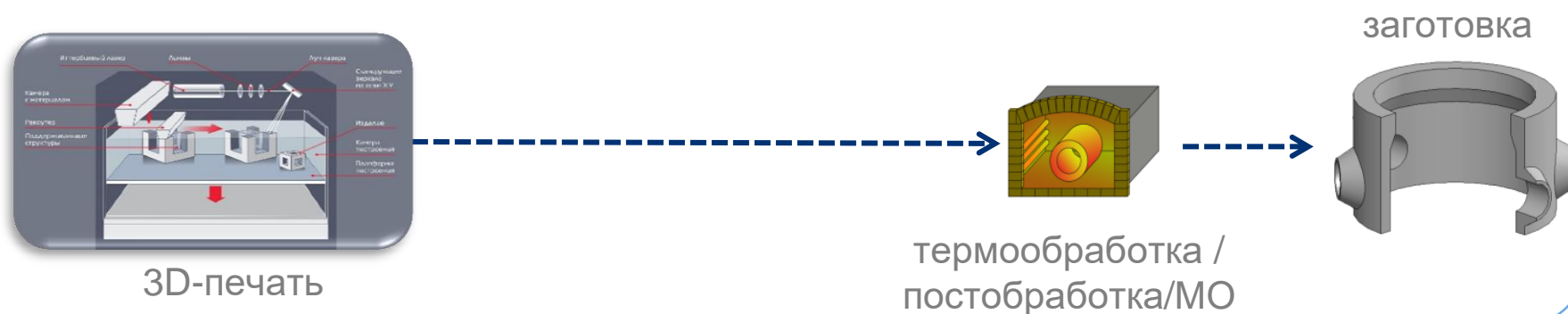
## Традиционный металлургический передел

Исходное сырьё:  
шихтовые материалы  
Количество жидких ванн:  
 $n = 1$   
Характерный размер:  
 $l = 0,1 \text{ м} - 1 \text{ м}$



## Аддитивное производство (СЛП, ПЛВ и родственные)

Исходное сырьё:  
МПК, проволочные материалы  
Количество жидких ванн:  
 $n = \infty$   
Характерный размер:  
 $l = 0,0001 \text{ м} - 0,001 \text{ м}$



### Задачи:

- 1) Поиск эффективных способов неразрушающего контроля аддитивной продукции.
- 2) Разработка подходов для обеспечения соответствия требованиям аддитивного материала, в том числе внутри изделий сложной геометрии.
- 3) Поиск методов контроля геометрии скрытых элементов изделий.

# Интеллектуальное управление аддитивным процессом – основа управления ТП аддитивного оборудования нового поколения



ЦНИИТМАШ  
РОСАТОМ



# Применение ПАП на отраслевом аддитивном оборудовании, созданном в рамках ФП-4 КП РТТН



ЦНИИТМАШ  
РОСАТОМ

Системы контроля – основа обеспечения качества аддитивного производства

Элемент ПАП*	SLM	EBM	FDM	SLA	LDM
МУРИ (XY2-100)	+	-	-	+	-
МУРИ (EBM)	-	+	-	-	-
ГУ ПАП	+	+	+	+	+
СКПС	+	+	-	+	-
СМГИ	+	+	+	-	+
СКТОС	+	-	-	-	-
СМРОК	+	+	-	-	-
СОМОС	+	-	-	-	-

В настоящий момент поддерживаются технологии SLM, EBM, FDM, SLA, LDM

**\* Сокращения**

ГУ ПАП - Головное устройство, включая цифровые и аналоговые входы/выходы

СК – система контроля

СКПС – система контроля нанесения слоя

СМГИ – система мониторинга геометрии изделия

СКТОС – система контроля температуры, встроенная в оптическую ось

СМРОК – система контроля температуры всей области сплавления (оптическая томография)

СОМОС - система контроля, встроенная в оптическую ось на базе высокоскоростной камеры

МУРИ – модуль управления инструментом



ЦНИИТМАШ  
РОСАТОМ

Установка  
ВТСЛП



Установка  
ВТСЭЛП



ЛУЧ  
РОСАТОМ

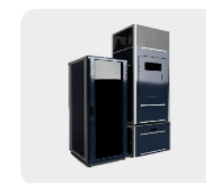


НИИГРАФИТ  
РОСАТОМ

Установка  
LDM/SLA



Установка FDM

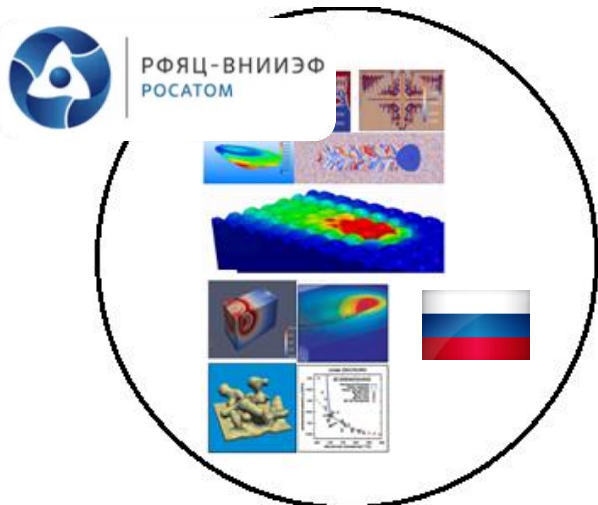


# Кооперация и импортозамещение в аддитивном оборудовании, созданном в рамках ФП-4 КП РТТН



АСУ ТП на основе отечественной ПАП (ООО «Эмзиор»/ООО «Райтек»)

Обеспечена совместимость с источниками лазерного излучения разной мощности разработки РФЯЦ-ВНИИТФ



Основной приоритет при разработке новых единиц оборудования АТ - максимальное использование узлов, комплектующих и ПО разработки Российской Федерации



ПО «Виртуальный принтер» для моделирования АТ процесса, генерации ячеистых структур и топологической оптимизации разработки РФЯЦ ВНИИЭФ

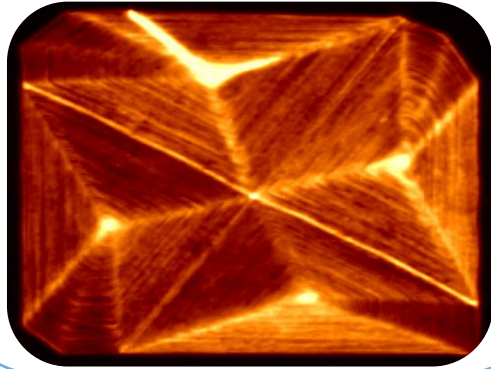
Сканирующие системы лазерного луча разработки АО «НИИ НПО «ЛУЧ»

# In-situ системы контроля за процессом 3D-печати – основа обеспечения качества аддитивной продукции (материалов и изделий)

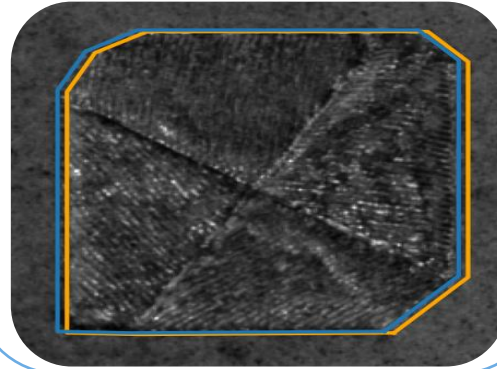


ЦНИИТМАШ  
РОСАТОМ

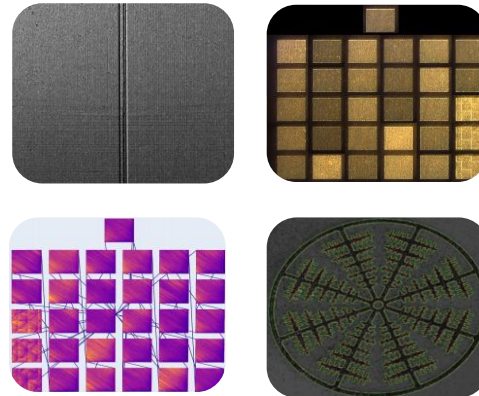
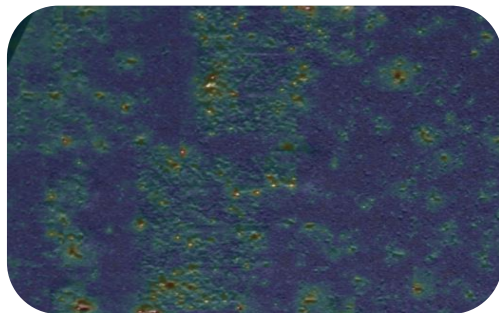
Система контроля температуры жидкой ванны



Система контроля температуры всей области сплавления



Система контроля качества нанесения порошкового слоя



Все новые единицы аддитивного оборудования оснащаются системами непосредственного контроля за процессом СЛП:

- 1) Система контроля температуры жидкой ванны.
- 2) Система контроля всей области сплавления (на основе тепловизионной камеры и КМОП матрицы).
- 3) Система контроля качества порошкового слоя.
- 4) Система контроля геометрии синтезируемого изделия.
- 5) Система контроля качества синтезируемого материала на основе УЗ.
- 6) Система контроля мощности лазерного излучения.

В АСУ заложен инструмент на основе скриптового языка, позволяющий взаимодействовать с системами контроля, создавать и использовать модели (на основе МО и ИИ) для формирования прогноза качества материала и изделия.

Наличие обратной связи позволит автоматизировать процесс идентификации и залечивания дефектов в автоматическом режиме и реализовать подход “печать с первого раза”.

Обеспечение качества серийной аддитивной продукции ответственного машиностроения

# In-situ системы контроля за процессом 3D-печати – основа обеспечения качества аддитивной продукции (материалов и изделий)

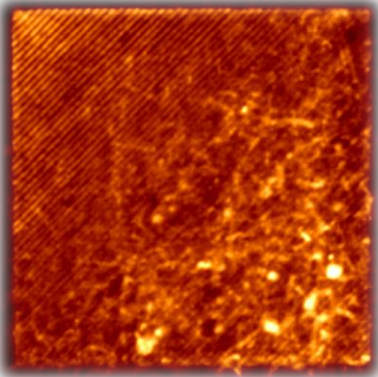


ЦНИИТМАШ  
РОСАТОМ

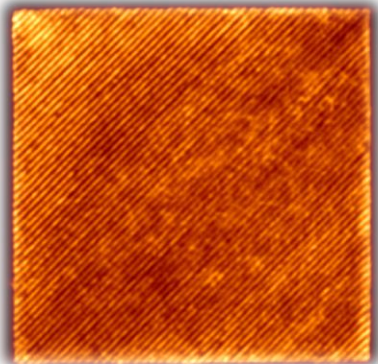
Показания систем контроля

Металлография

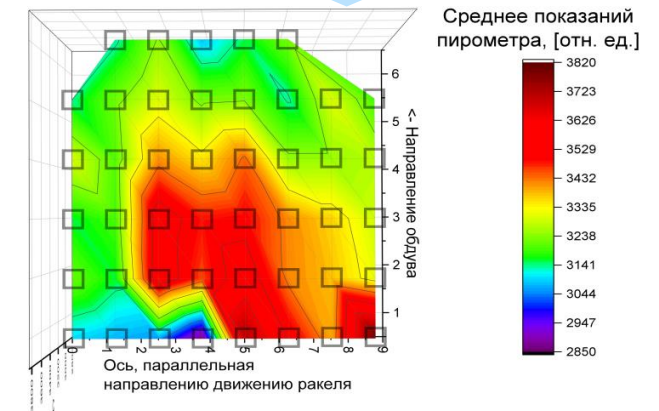
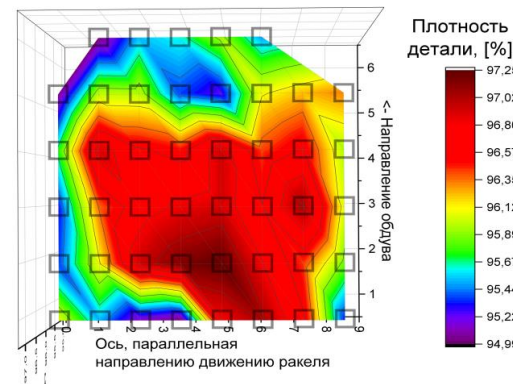
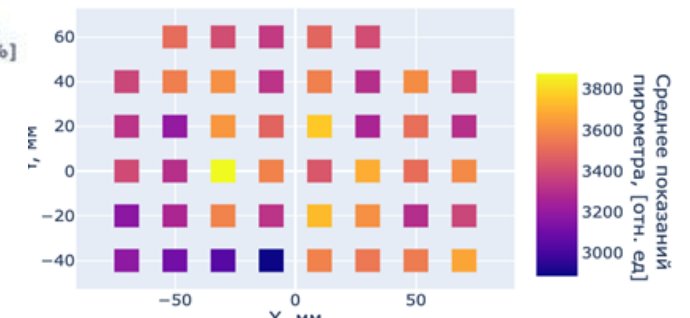
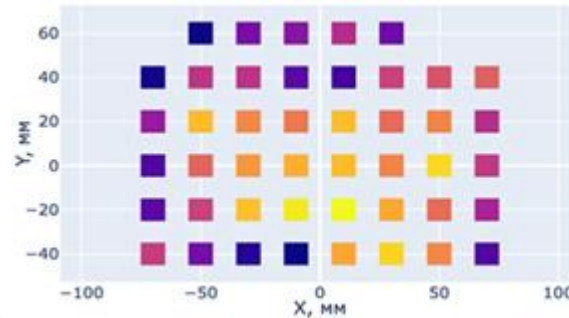
До оптимизации  
процесса печати



После оптимизации  
процесса печати



Данные систем контроля позволяют сделать выводы об теплофизических условиях формирования материала, его структуре и комплексе свойств



Системы непосредственного контроля за аддитивным процессом – инструмент обеспечения качества серийной аддитивной продукции ответственного машиностроения

# In-situ системы контроля за процессом 3D-печати – основа обеспечения качества аддитивной продукции (материалов и изделий)

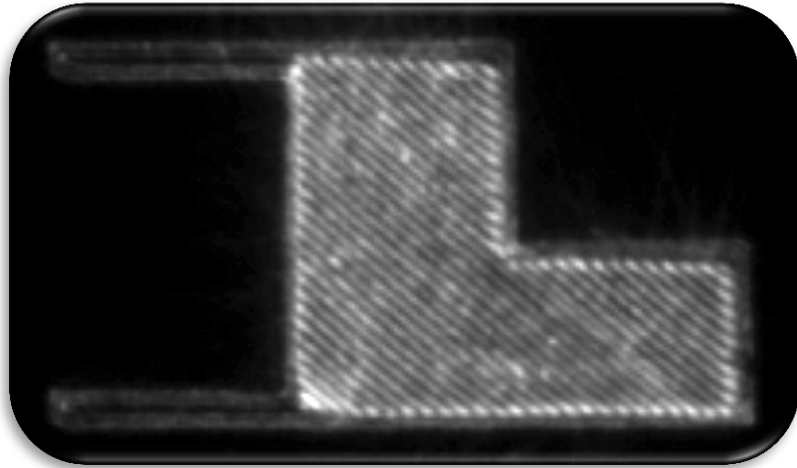


ЦНИИТМАШ  
РОСАТОМ

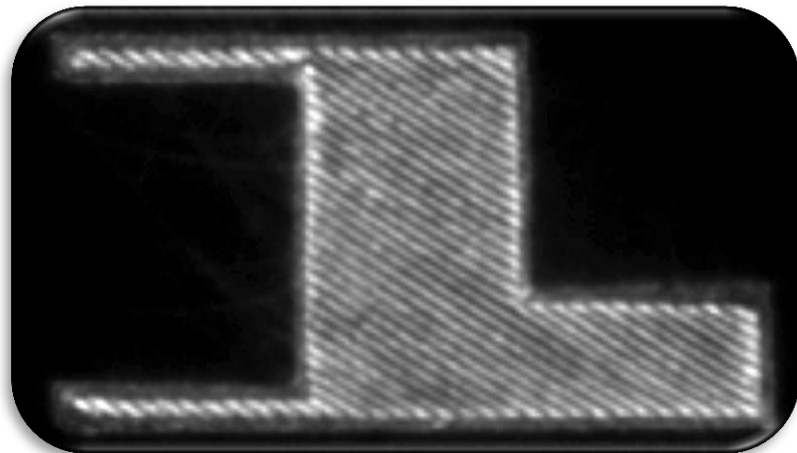
Показания систем  
контроля

КТ

До оптимизации  
процесса печати



После оптимизации  
процесса печати



Дефект. Выраженная пористость (несплавление), характерный размер ~100 мкм  
Причина. Ошибка на этапе подготовки 3D-модели к печати.  
Действие. После идентификации дефекта повторно нанести слой и изменить стратегию печати на правильную. Если подготовка 3D-модели не динамическая, то останов печати.  
Важно. Система контроля температуры всей области сплавления однозначно идентифицировала дефект, который был подтвержден КТ распечатанного изделия.



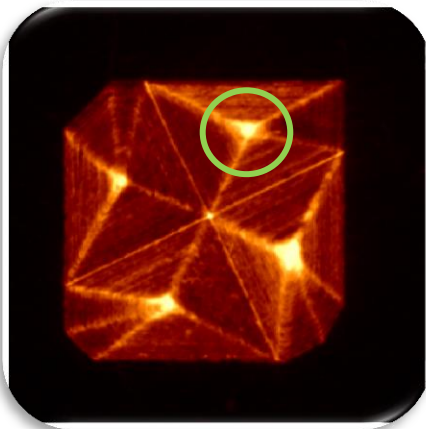
# In-situ системы контроля за процессом 3D-печати – основа обеспечения качества аддитивной продукции (материалов и изделий)



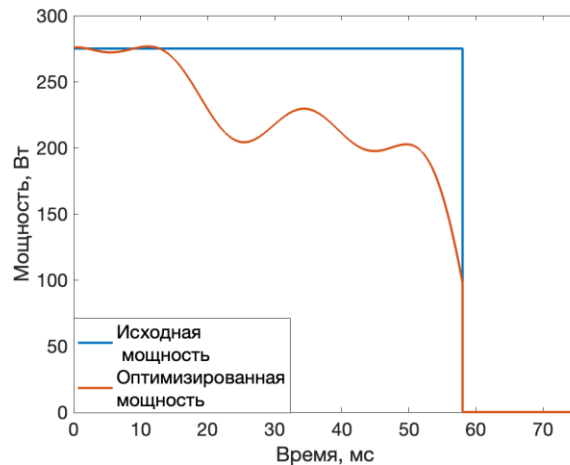
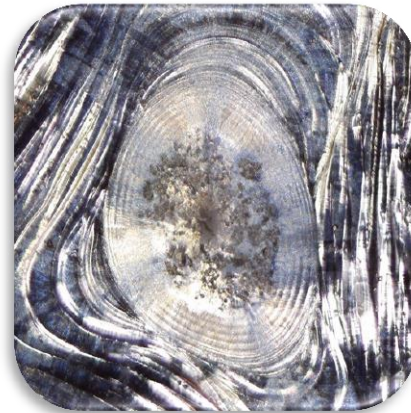
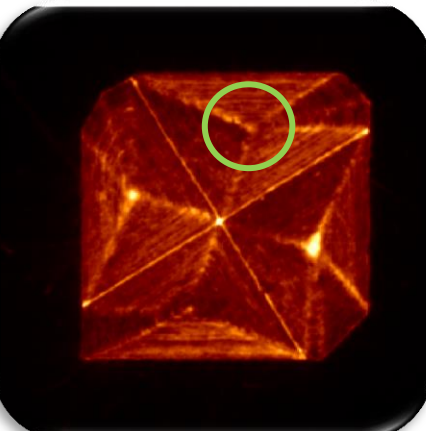
ЦНИИТМАШ  
РОСАТОМ

Показания систем контроля

До оптимизации  
процесса печати



После оптимизации  
процесса печати



**Дефект.** Дефект слоя сплавления с образованием раковины, что приведет при дальнейшей печати к “непроплаву”.

**Причина.** Избыточное тепловложение в вершине спирали, связанное с “негибкостью” стационарной подготовки 3D-модели к печати.

**Действие.** На базе информации от системы контроля, накопленной тепловой истории и связи ее с наличием дефектов (на базе МО разработан цифровой двойник процесса) предсказание образования дефекта и в режиме реального времени снижение мощности ЛИ.

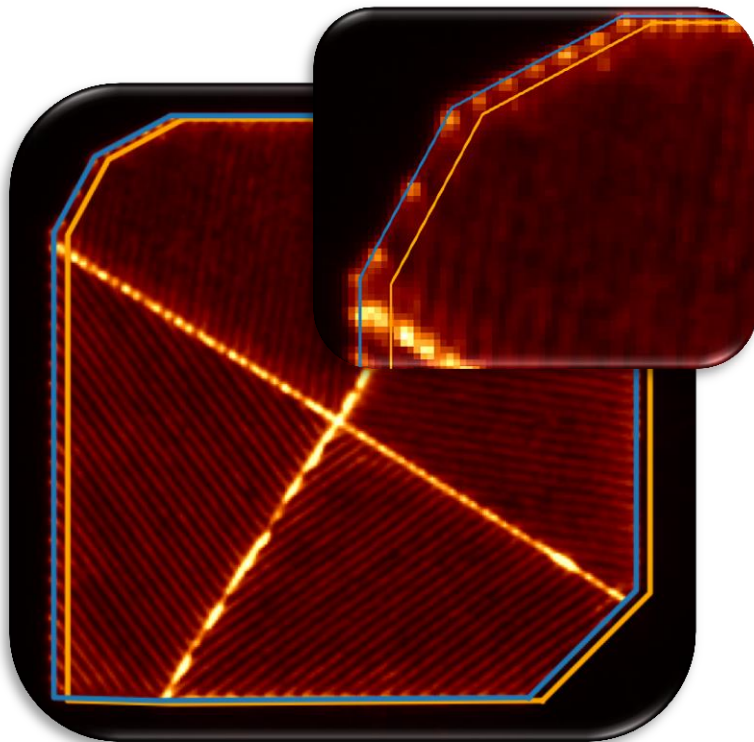
**Важно.** Цифровой двойник процесса сплавления, интегрированный в ПАП, и система контроля температуры могут предсказать влияние текущего состояния и тепловой истории на образование дефектов, что является основой интеллектуальной обратной связи управления процессом АТ.

# In-situ системы контроля за процессом 3D-печати – основа обеспечения качества аддитивной продукции (материалов и изделий)



ЦНИИТМАШ  
РОСАТОМ

Контроль положения детали на области построения



Контроль формы внутренних полостей



Фактическое положение контура

Положение контура по CAD модели

Дефект (на левом рисунке). Отклонение от исходной геометрии на величину более 50 мкм.

Причина. Смещение контура изделия по оси X вызвано температурной деформацией зеркала сканатора.

Действие. Введение поправочных смещений при текущей печати. Ремонт сканатора после завершения печати изделия.

Важно. Система контроля геометрии однозначно с точностью не хуже 50 мкм идентифицирует отклонение геометрии изделия от заданной в CAD-модели, это позволяет с соответствующей точностью “видеть” искажение геометрии внутренних частей изделия, что недоступно (или ограничено) после завершения 3D-печати.

# Система воздействия на структуру и свойства при 3D-печати – шаг к применению АТ для ответственного машиностроения



ЦНИИТМАШ  
РОСАТОМ

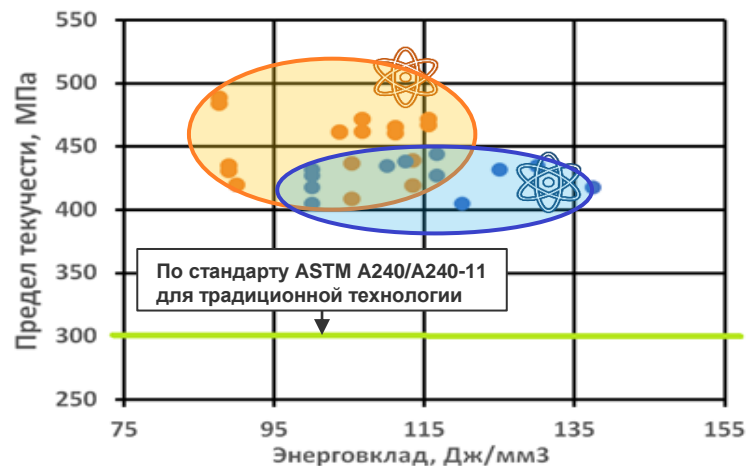
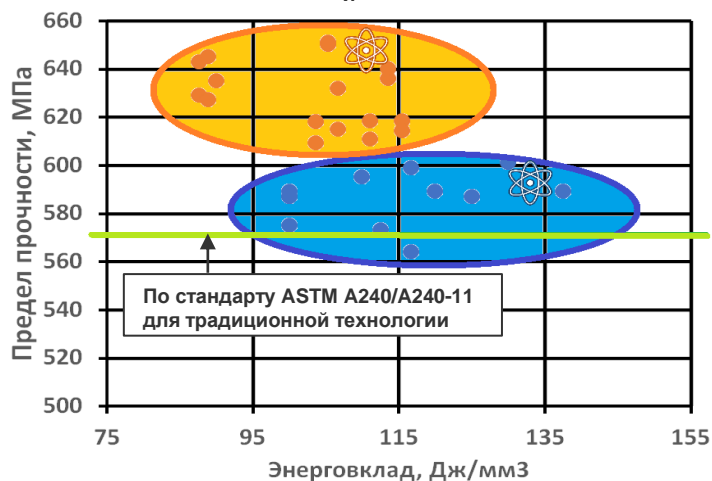
## Сталь 316L



Без  
воздействия



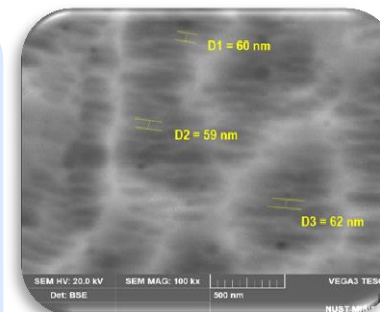
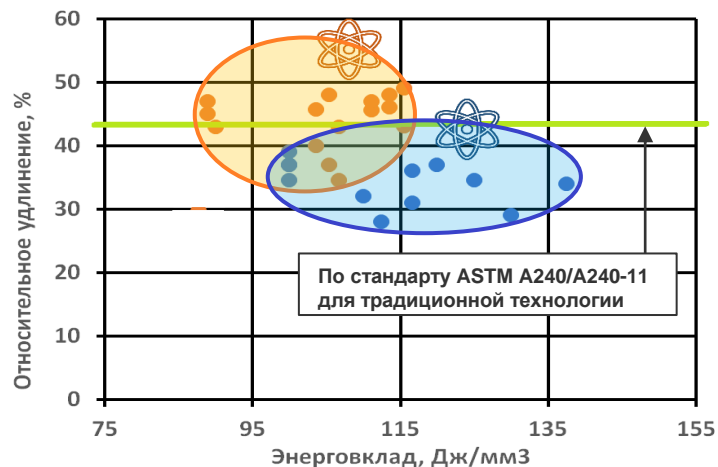
Импульсное  
воздействие



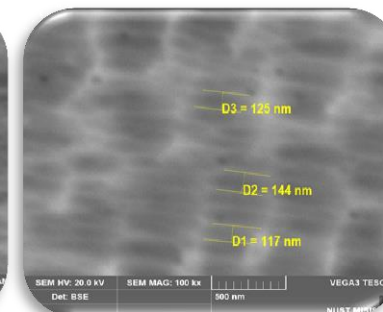
Внешнее воздействие приводит к эффективному увеличению скорости охлаждения в **10...30 раз** и, как следствие, к измельчению структуры в **1,5...3 раза**

В ходе проведения исследования было выявлено повышение характеристики образцов, изготовленных с применением импульсного воздействия:

- ✓ Предел прочности – на **20%** выше образцов СЛП без воздействия
- ✓ Предел текучести – на **15%** выше образцов без воздействия
- ✓ Удлинение – на **5%** выше образцов без воздействия



Без воздействия  
(316L)

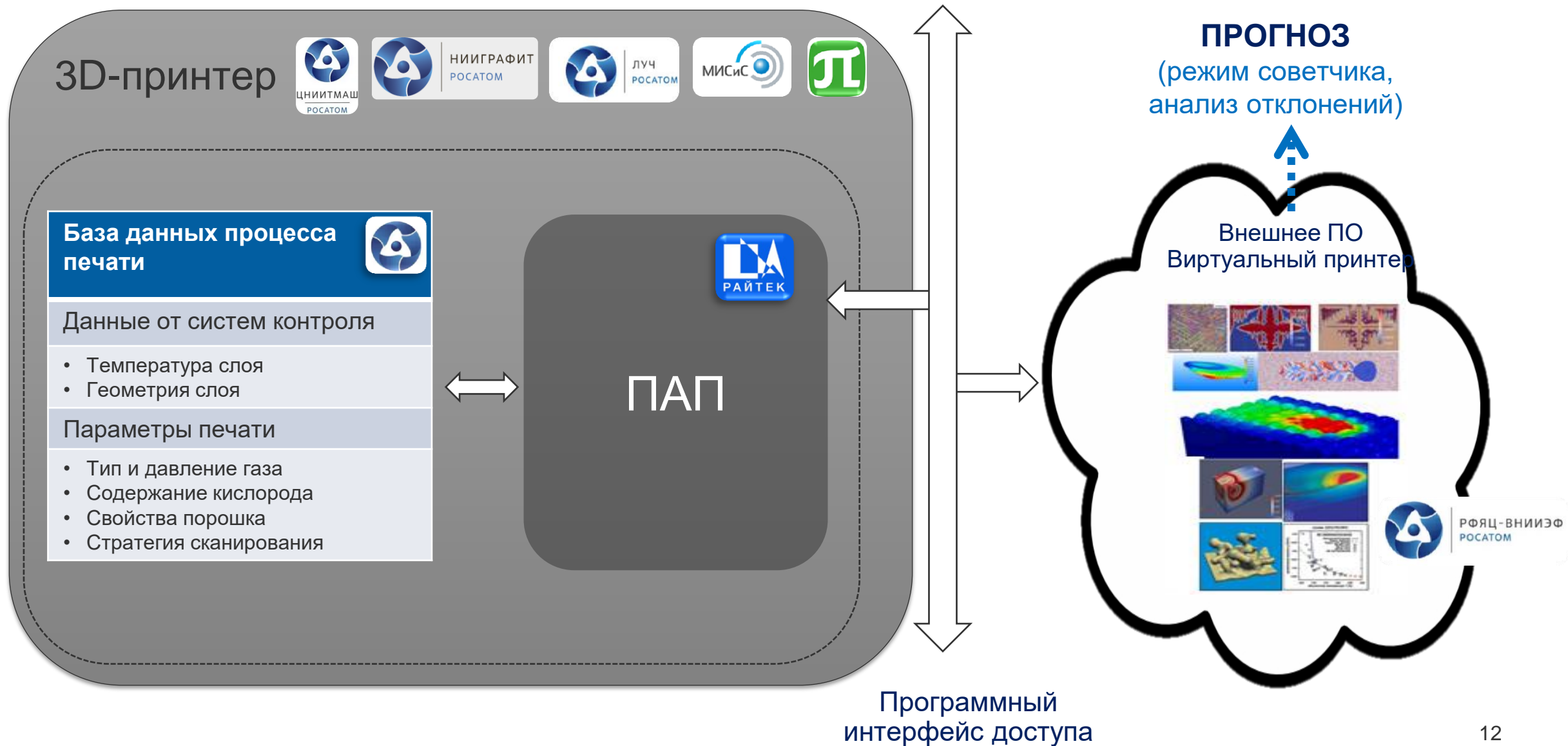


С воздействием  
(316L)

Воздействие приводит к повышению энергии в ПС, которая при затвердевании реализуется в первую очередь в виде микроструктуры (площадь поверхности зерен); оставшаяся избыточная энергия реализуется в виде субзерен. Энергия образования микроструктуры существенно больше энергии образования субструктуры, это приводит к тому, что мы имеем большее количество зерен, имеющих более совершенную субструктуру, следствием является снижение числа дойников.

**Повышение сопротивления аддитивного материала к хрупкому разрушению**

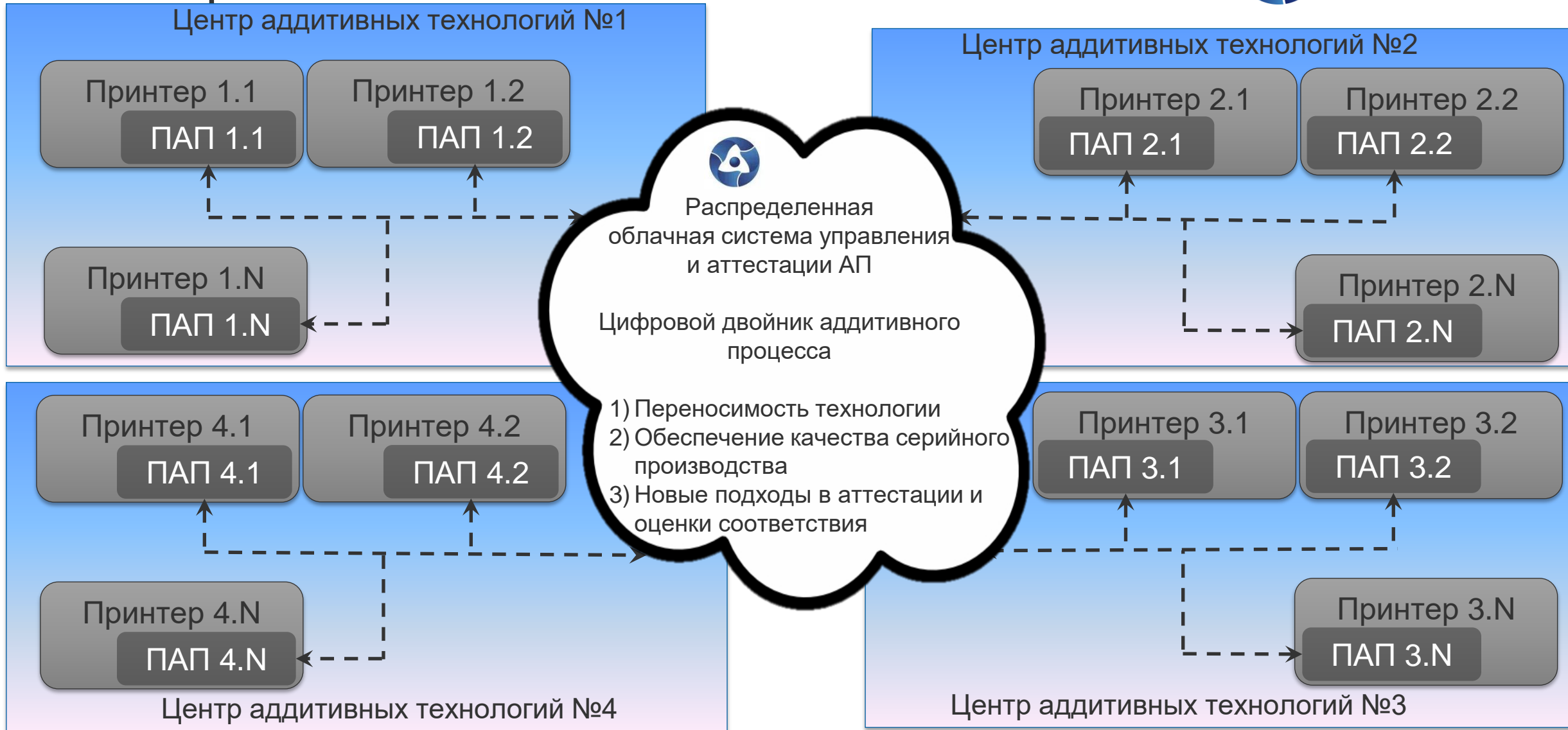
# Программный интерфейс взаимодействия с цифровым двойником



# Распределенная облачная система обеспечения качества при серийном производстве изделий ответственного (атомного) машиностроения



ЦНИИТМАШ  
РОСАТОМ



# Спасибо за внимание

Иванов Иван Алексеевич

АО «НПО «ЦНИИТМАШ»

