



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов  
«Прометей» имени И.В. Горынина

Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»



## Структурные исследования аддитивного магнитотвердого сплава ЮНДК



*Докладчик: Жуков Антон Сергеевич*

*SAMSTech-2020*

*Красноярск, 30-31 июля 2020 г.*

# Что такое Аддитивные технологии?

**Аддитивные технологии** – экологически чистые технологии, позволяющие экономить время и ресурсы (от идеи до получения готового изделия)

## Классические технологии



## Аддитивные технологии



# Аддитивные технологии для производства магнитных материалов

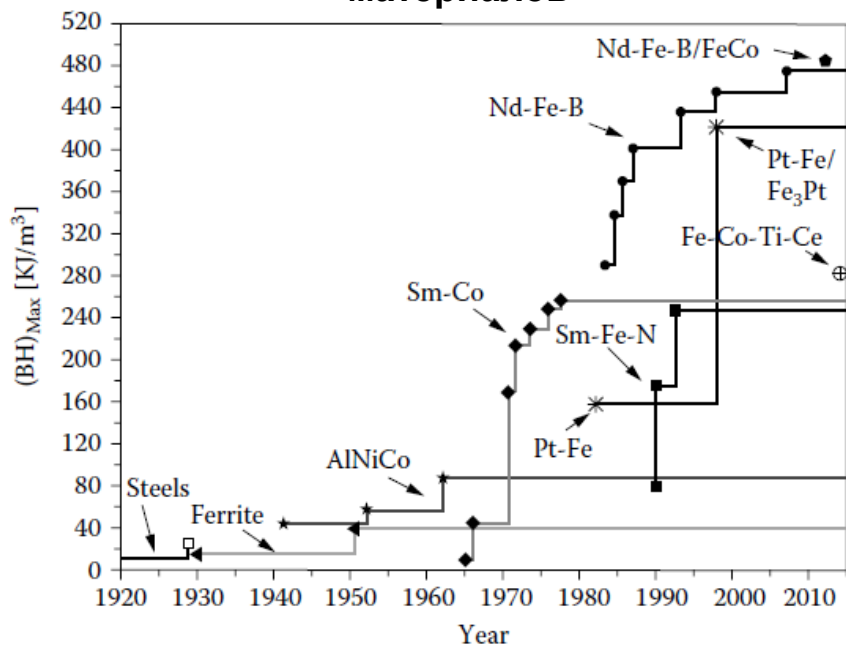
Цели работы:

качественное рассмотрение процесса СЛС порошкового материала, послойно вводимого в зону расплавления лазером для получения магнитотвердого материала типа ЮНДК



# Актуальность исследования сплава ЮндК

## Этапы развития эффективности магнитотвердых материалов \*



**$(BH)_{max}$**  — максимальное энергетическое произведение — основная характеристика МТМ

### Основные пути повышения $(BH)_{max}$ :

- Повышение  $B_r$  (состав, ТМО)
- Повышение  $H_c$  (технология → структура)

### Недостатки магнитов на основе Nd-Fe-B :

- Дороговизна исходного сырья
- Неэффективность использования в системах с малыми требованиями по  $(BH)_{max}$
- Низкая температурная стабильность

### Достоинства магнитов на основе ЮндК :

- Доступность исходного сырья
- Технологичность
- Высокая температурная стабильность

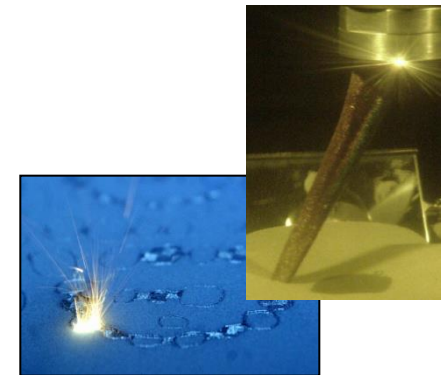
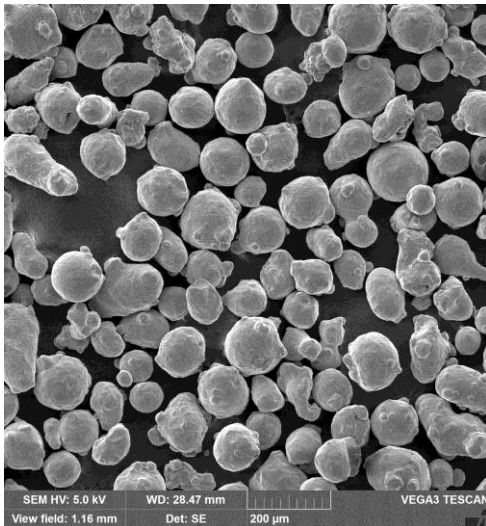
\* Vemuru V. Krishnamurthy Additive Manufacturing of Rare Earth Permanent Magnets In book: Additive Manufacturing: Innovations, Advances and Applications, Edition: 1st, Chapter: 17, Publisher: CRC Press (Taylor and Fransis Group), Editors: T. S. Srivatsan and T. S. Sudarshan, pp.413-429

# Производство исходного порошка

Дисперсные материалы:  
металлические  
порошки  
сферической  
формы,  
фракцией  
менее 80 мкм

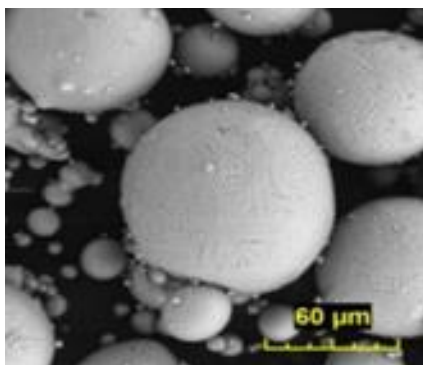
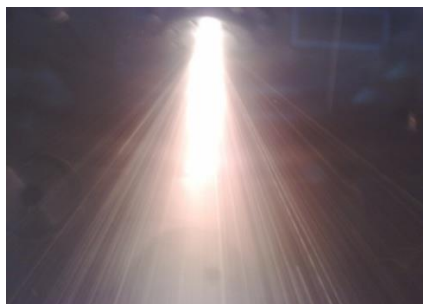
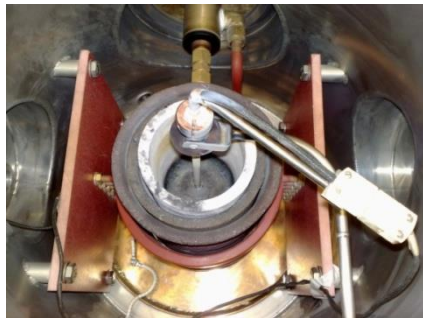
Технологии  
лазерного  
синтеза:  
•технология SLM  
(Selective Laser Melting)

Создание  
изделий различной  
геометрии и  
высоким  
комплексом  
свойств



# Производство исходного порошка

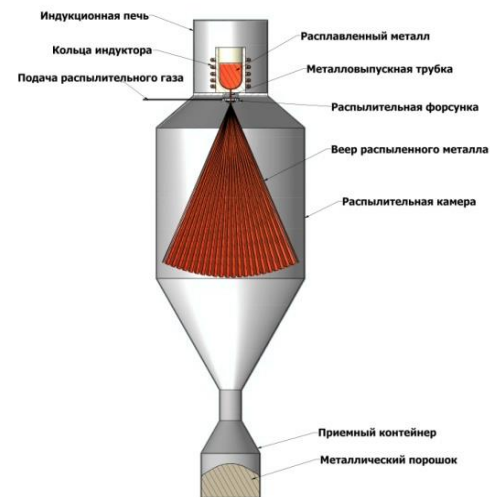
## Плавление исходного материала



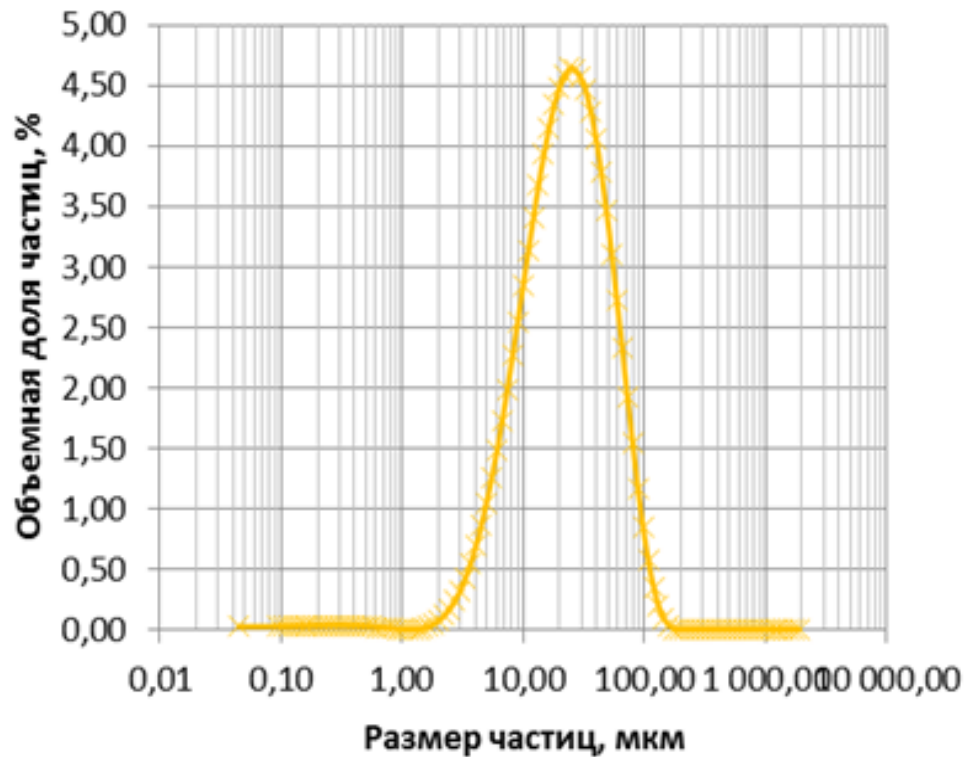
## Атомизатор HERMIGA 75/IV



## Принципиальная схема атомизатора

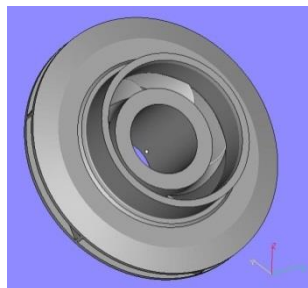


# Морфология частиц порошка

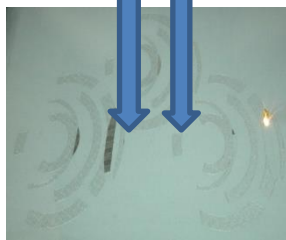


Анализатор частиц Malvern Mastersizer 2000

# Установка RussianSLM FACTORY

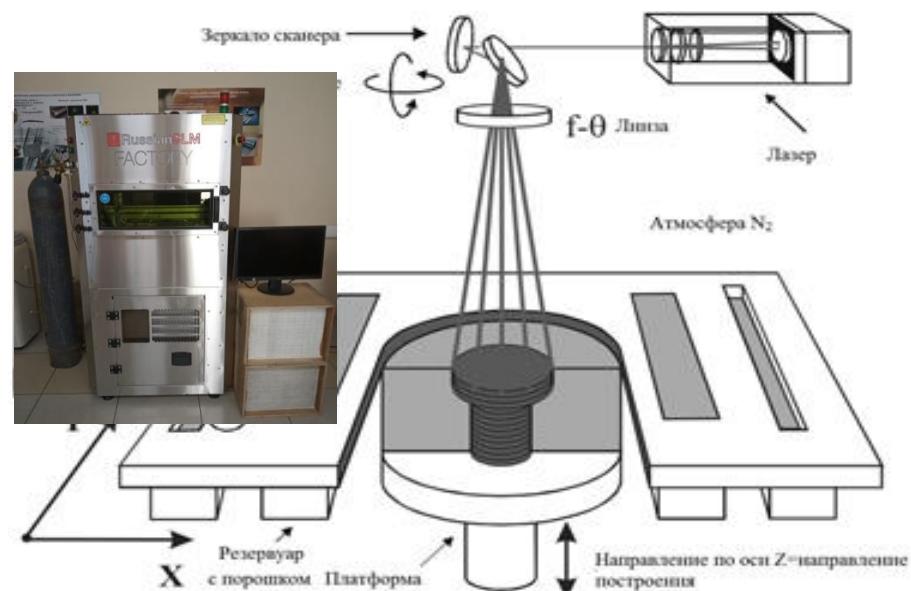


3D модель → Готовое изделие



## Лазерное сплавление слоя материала

Основные факторы,  
влияющие на результат:

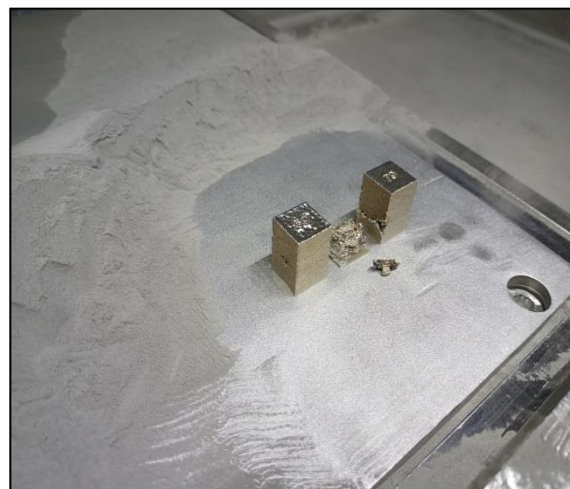
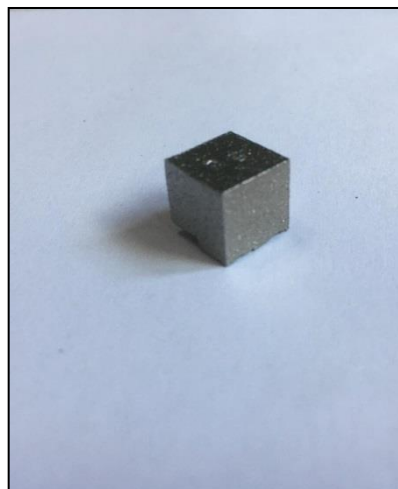
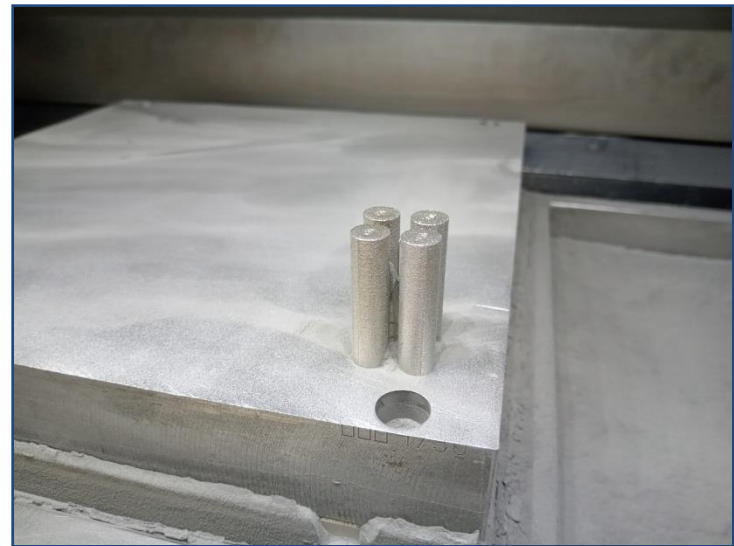


Принципиальная схема реализации селективного сплавления и внешний вид установки RussianSLM FACTORY

Технологические	Металлургические
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Мощность лазера</li> <li>• Скорость сканирования</li> <li>• Ориентация образца на платформе</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Химический состав порошка</li> <li>• Гранулометрия</li> <li>• Рабочая среда</li> </ul>



# Изделия, полученные по технологии SLM



# Химический состав материалов

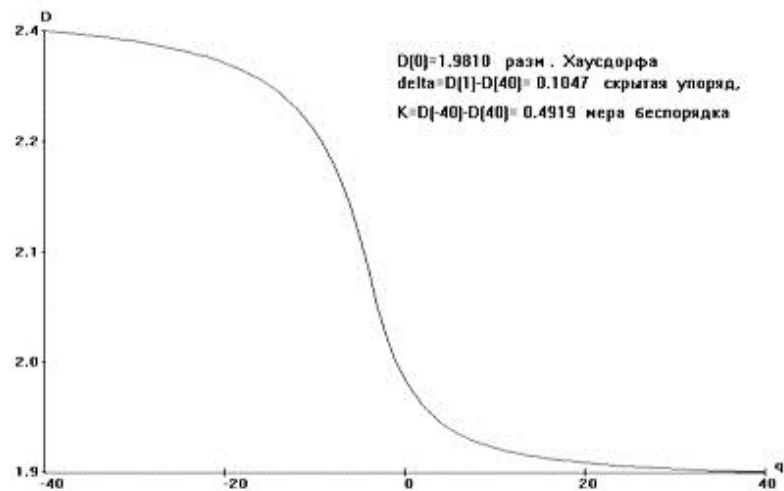
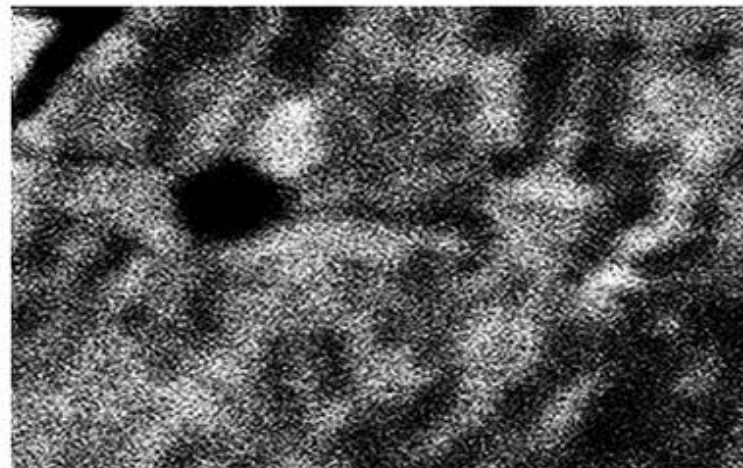
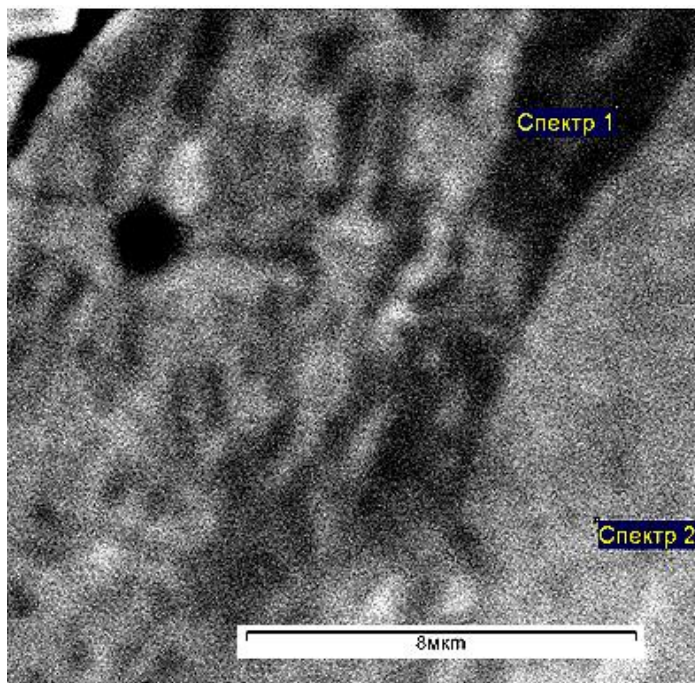
Вид образца	Fe	Ni	Co	Al	Cu
Исходный слиток	53.1	12.7	22.8	7.6	2.7
Порошок	50.9	14.2	23.3	7.3	3.6
Аддитивный образец	51.9	14.4	23.6	7.1	3.2

## Структурные исследования



Сканирующий  
двухлучевой электронно-  
ионный микроскоп  
**TESCAN LYRA3**

# Мультифрактальная параметризация



# Структурная неоднородность

$$dM/dt = \gamma M \cdot H$$

где  $M$  – вектор магнитного момента единицы объема,  $H$  – вектор статического магнитного поля,  $\gamma$  – отношение магнитного момента к моменту количества движения

$$dX/dt = X - X^2 - kY$$

где  $X$  – намагниченность, обусловленная распределением спинов,  $Y$  – размер однодоменных частиц,  $k < 1$

$$\beta(c) \cdot \left( d^2c/dx^2 \right) = d[f(c)]/dc - \mu$$

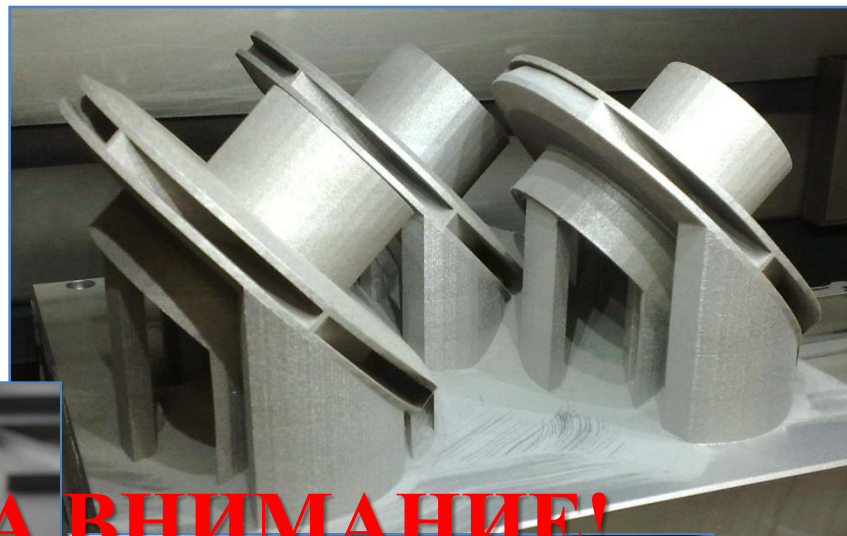
где  $\beta(c)$  – положительная в устойчивом состоянии функция состава,  $\mu$  – безразмерный положительный коэффициент формы реакционного объема

Химический состав в точках снятия спектрограмм.

	Fe	Ni	Co	Al	Cu	Ti	Nb	Mo	Si
спектр 1	49.93	14.13	23.53	7.34	3.52	0.43	0.52	0.27	0.34
спектр 2	50.25	13.85	23.82	7.44	2.99	0.45	0.56	0.27	0.38

# Выводы

- Распылением расплава возможно изготовить порошок магнитотвердого сплава ЮНДК, пригодный для применения в технологии СЛС
- Технология СЛС позволяет из данного порошка изготавливать аддитивные магниты
- Магнитные свойства материалов, полученных СЛС, определяются спиновым электронным взаимодействием атомов на начальных этапах кристаллизации монолитного материала
- В зависимости от скорости охлаждения зоны проплавления порошка, возможны эффекты формирования локальных структур с признаками мультифрактальности



**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!**



Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации  
(уникальный идентификатор субсидии - RFMEFI62519X0046)