

# Мультиматериальная печать по технологии селективного лазерного плавления

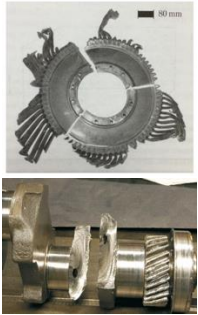


Санкт-Петербургский политехнический  
университет Петра Великого

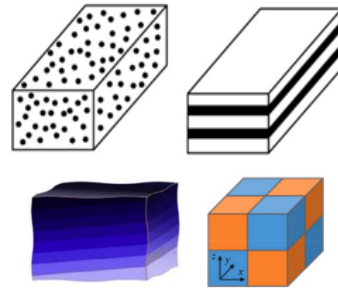
Борисов Евгений Владиславович  
к.т.н., доцент  
НОЦ «Конструкционные и  
функциональные материалы»

# Мультиматериальное аддитивное производство

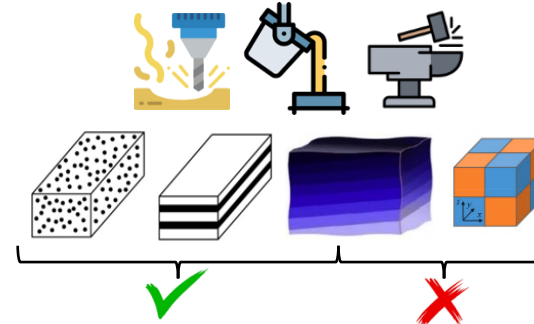
Повышение эксплуатационных требований к изделиям с однородным химическим составом.



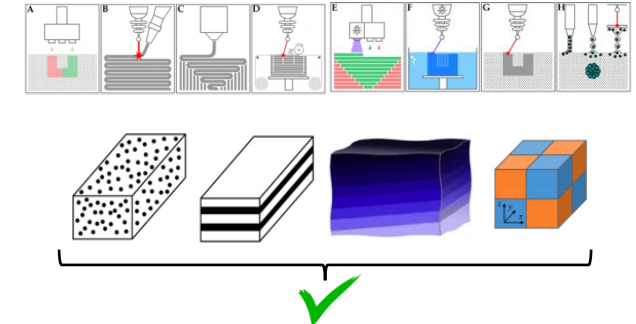
Композиты, покрытия, биметаллы, функционально-градиентные материалы, **мультиматериалы** и т. д.



Традиционные методы имеют технологические ограничения.



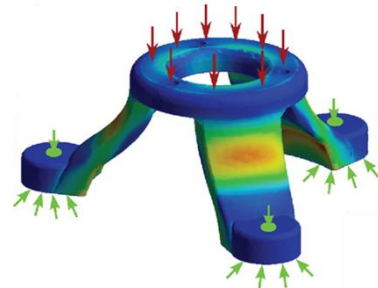
Уникальная возможность создания объемного изменения состава-структуры-свойств изделий за счет использования **аддитивного производства**



Термин мультиматериальное аддитивное производство установлен ПНСТ 666-2022 (ISO/ASTM TR 52912:2020).



3D-модель изделия



Моделирование процесса эксплуатации



Определение зон для разных материалов



Изготовление изделия с мультиматериальным строением

# Изготовление мультиматериальных изделий по технологии селективного лазерного плавления



Размер изделий	Количество одновременно используемых материалов
150x200 мм	4
Минимальный размер элемента	Возможность масштабирования технологии под большее количество материалов и размер деталей
менее 1 мм	

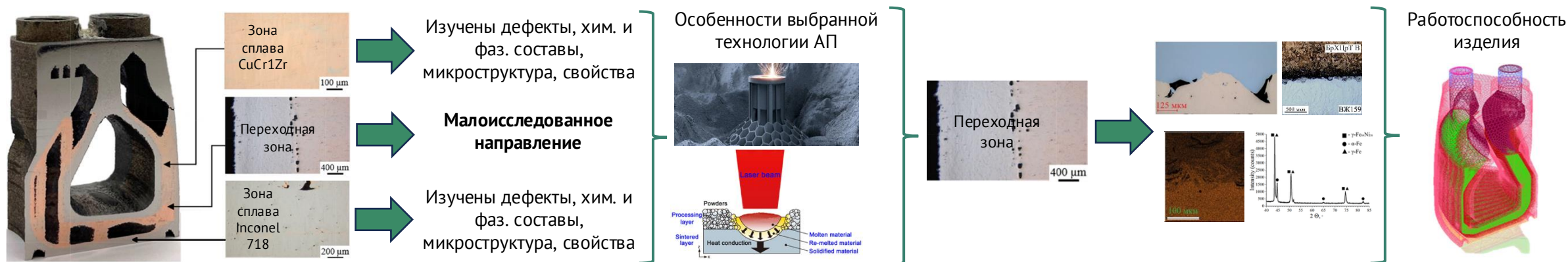
более 20 материалов и их комбинаций уже охвачено в рамках разработанной технологии



Примеры мультиматериальных изделий, полученных на установке собственной разработки



# Особенности мультиматериального селективного лазерного плавления

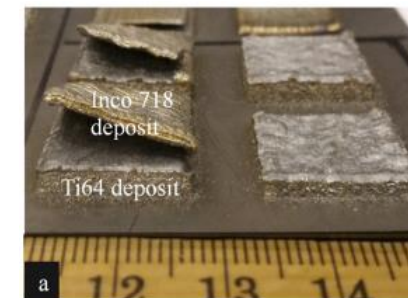
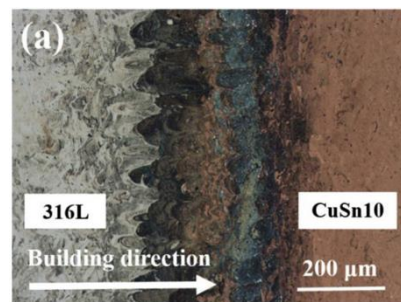
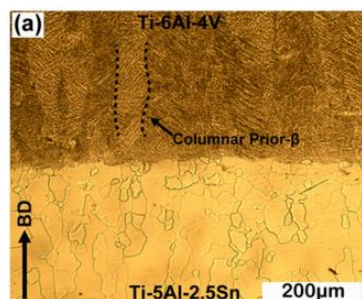


Однородные мультиматериалы Сплавы на основе одного металла	Разнородные свариваемые мультиматериалы Сплавы на основе разных металлов	Разнородные несвариваемые мультиматериалы Сплавы между которыми отсутствует свариваемость
---	---	--

- Ti5Al2,5Sn/Ti6Al4V
- CP-Ti/Ti6Al4V

- SS316L/CuSn10
- CuCr1Zr/IN718

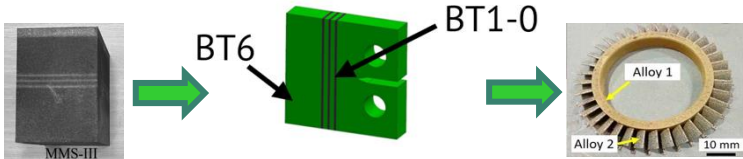
- Ti6Al4V/IN718
- SS316L/NiTi



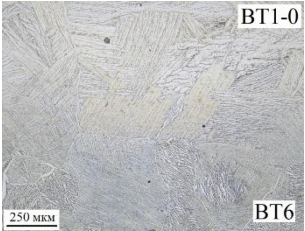
# Однородные мультиматериалы

## Мультиматериальная система BT6/BT1-0

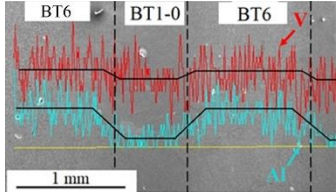
Повышение усталостных характеристик за счет снижения скорости роста трещины. Использование прослоек из более вязкого сплава BT1-0 для торможения трещины



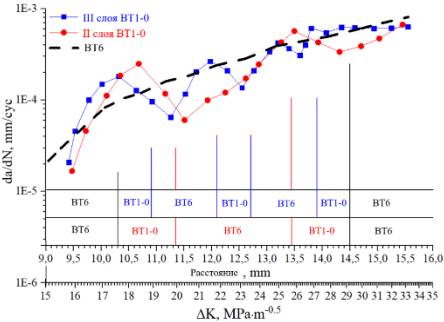
Мультиматериальные образцы для проведения испытаний на рост усталостной трещины



Исследование микроструктуры



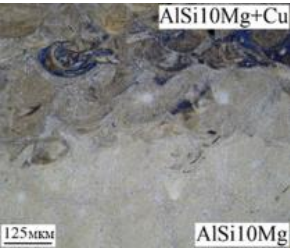
Исследование химического состава



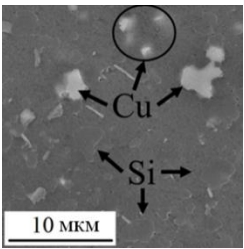
Исследование роста усталостной трещины

## Мультиматериальная система AlSi10Mg/Al-Si-Mg-Cu

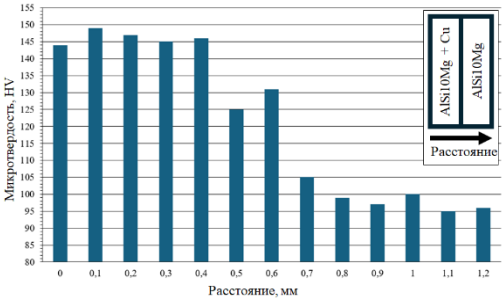
Повышение твердости и прочностных характеристик зоны Al-Si-Mg-Cu за счет добавления порошка Cu к порошку сплаву AlSi10Mg и проведения термической обработки



Исследование микроструктуры



Исследование химического состава



Исследование микротвердости

Тип образцов	$\sigma_B$ , МПа		$\sigma_{0.2}$ , МПа		$\epsilon$ , %	
	До ТО	После ТО	До ТО	После ТО	До ТО	После ТО
0 % Cu	359	323	209	185	11,8	12,98
1 % Cu	376	333	218	190	10,1	11,26
3 % Cu	378	410	220	239	9,87	8,83
5 % Cu	356	374	206	217	10,67	10,12
Мультиматериал (5 % Cu, после ТО)	325		189		11,2	

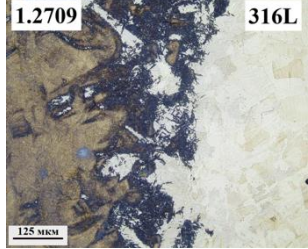
Результаты испытаний на растяжение

## Мультиматериальная система 316L/1.2709

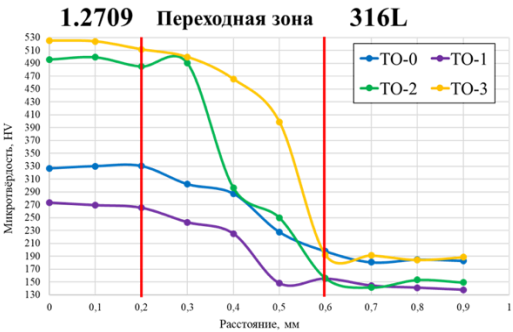
Повышение твердости и прочностных характеристик зоны стали 1.2709, а также повышение пластичности зоны стали 316L



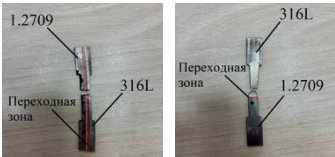
Отработка изготовления мультиматериалов



Исследование микроструктуры



Исследование микротвердости



Образцы после испытаний

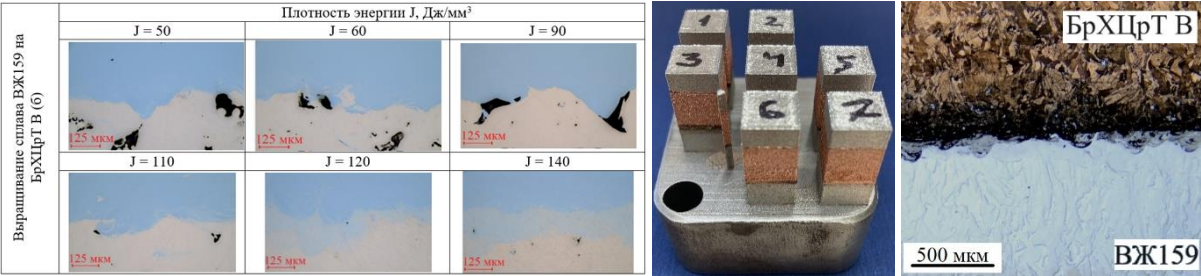




# Разнородные свариваемые мультиматериалы

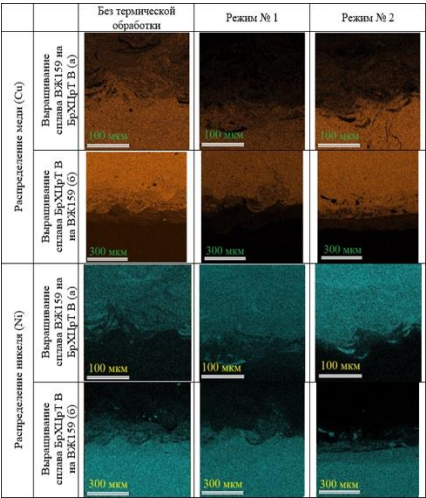
## Мультиматериальная система ВЖ159/БрХЦрТ В

Изготовление изделий из жаропрочной бронзы с упрочняющей рубашкой из жаропрочного никелевого сплав за один производственный цикл



Отработка изготовления мультиматериалов

Исследование микроструктуры



Исследование химического состава

Тип испытаний	Мультиматериальные образцы системы ВЖ159/БрХЦрТ В		Испытания БрХЦрТ В		Испытания ВЖ159	
	σв, МПа	ε, %	σв, МПа	ε, %	σв, МПа	ε, %
Растяжение	430±20	4,6	203±8	13,5	1202	26
Сжатие	822±23	42,5	—	—	—	—

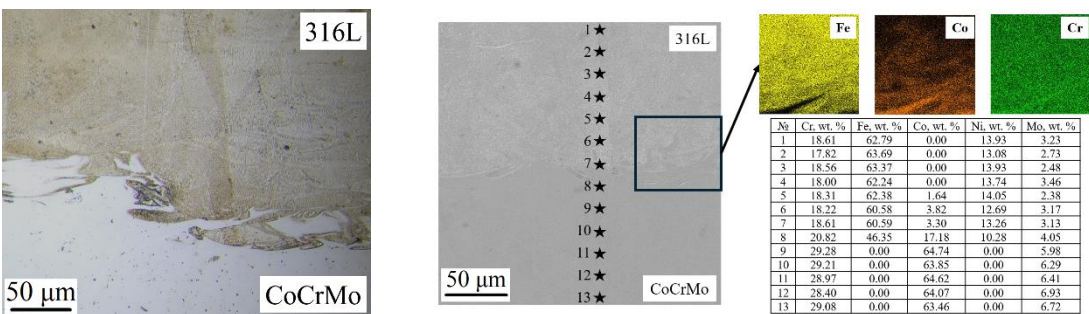
Результаты испытаний на растяжение



Мультиматериальные образцы

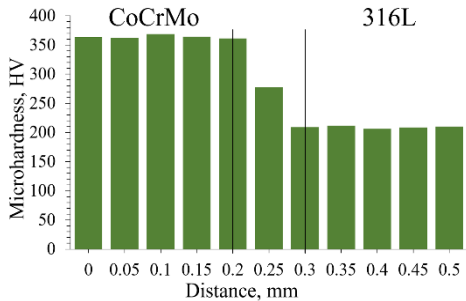
## Мультиматериальная система 316L/CoCrMo

Повышение усталостных характеристик за счет снижения скорости роста трещины. Использование прослоек из более вязкого сплава ВТ1-0 для торможения трещины

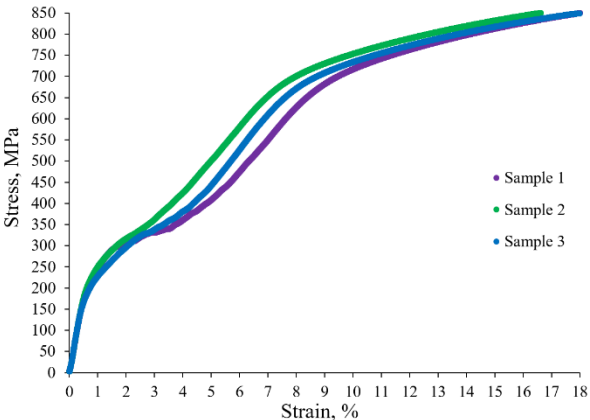


Исследование микроструктуры

Исследование химического состава



Исследование микротвердости



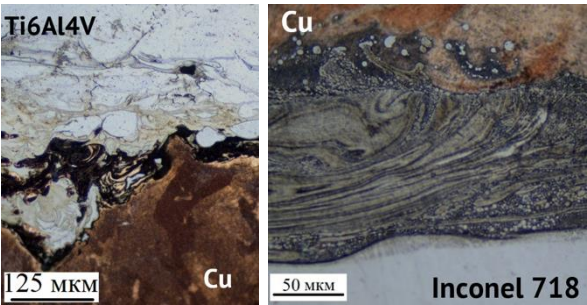
Результаты испытаний на растяжение

# Разнородные несвариваемые мультиматериалы

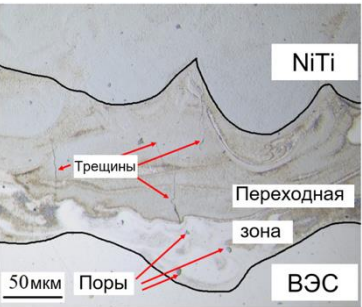
## Мультиматериальная система Ti6Al4V/Inconel 718

Изготовление мультиматериалов из несвариваемых сплавов за счет формирования переходного слоя. Изделия с подобного рода мультиматериальным строением будут иметь зону с повышенной жаропрочностью и зону со сниженной массой

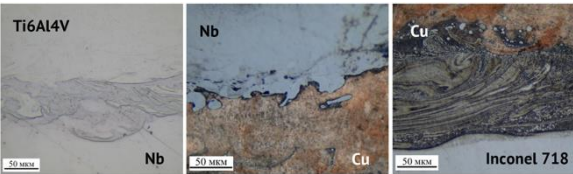
### Использование переходного слоя



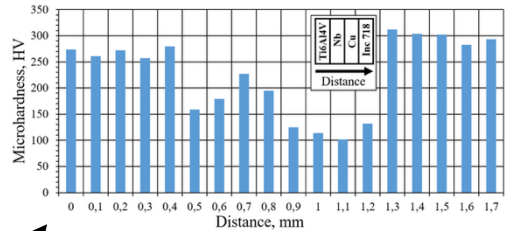
Исследование микроструктуры с переходным слоем из CuCr1Zr



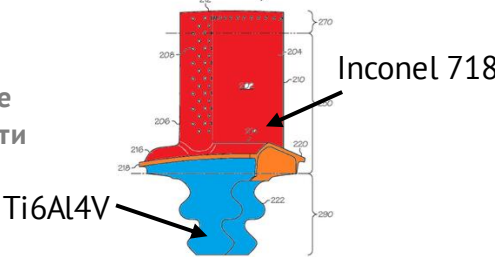
Исследование микроструктуры с переходным слоем из ВЭС



Исследование микроструктуры с переходным слоем из CuCr1Zr и Nb



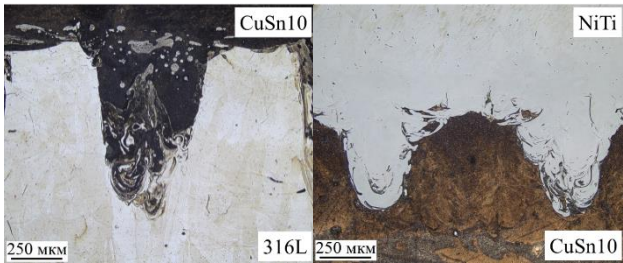
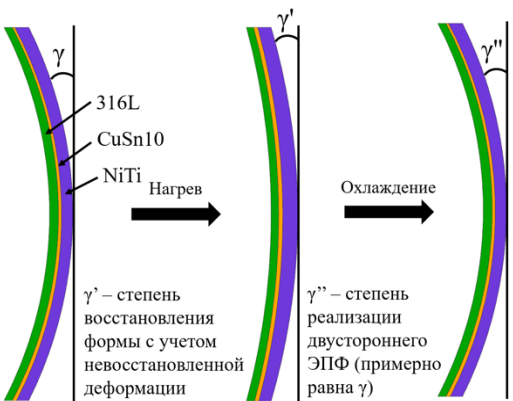
Исследование микротвердости



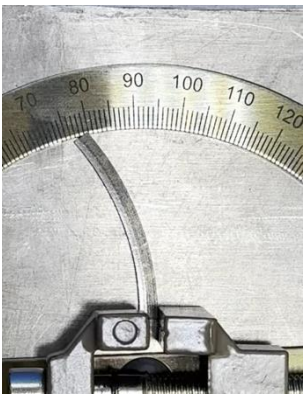
## Мультиматериальная система 316L/NiTi

Обеспечение возможности изготовления изделий из несвариваемых сплавов для создания локального эффекта памяти формы

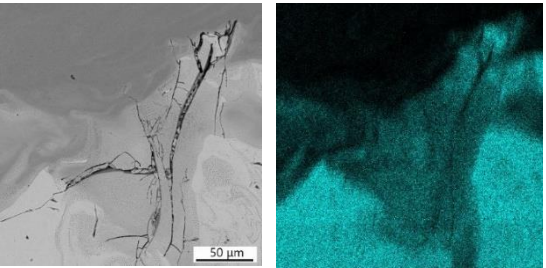
### Использование переходного слоя



Исследование микроструктуры с переходным слоем из CuSn10



Принцип реализации эффекта изменения формы



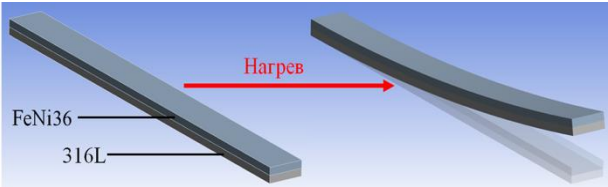
Исследование мультиматериала с переходным слоем из Nb



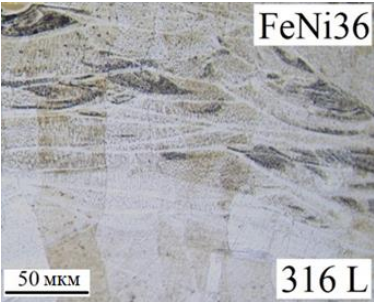
# Интеллектуальные мультиматериалы

## Мультиматериальная система 316L/FeNi36

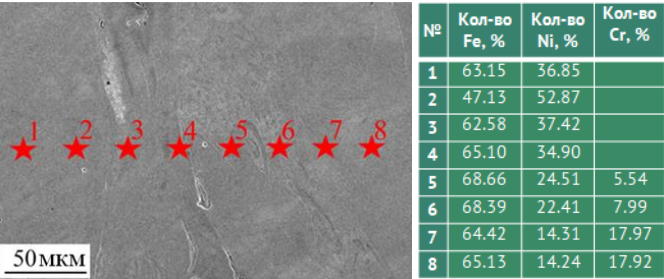
Создание эффекта изменения формы в мультиматериале, который состоит из материалов не обладающих данным эффектом.



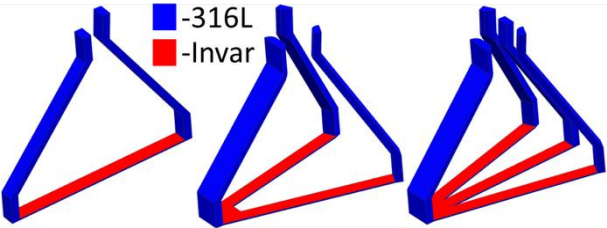
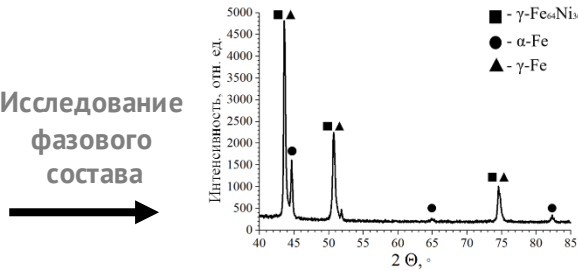
Принцип реализации эффекта изменения формы



Исследование  
микроструктуры

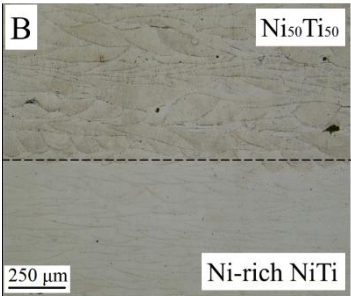


Исследование химического состава

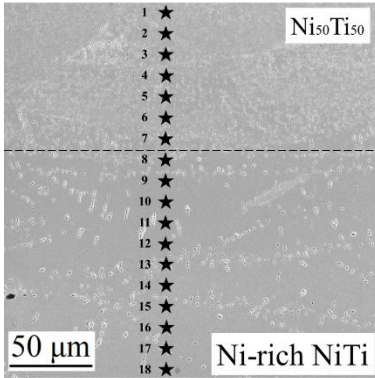


## Мультиматериальная система NiTi/NiTi

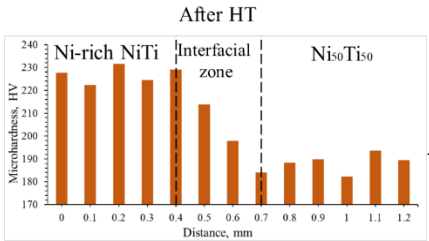
Создание локального эффекта памяти формы, а также возможность создания двунаправленного эффекта памяти формы.



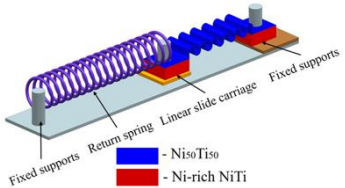
Исследование  
микроструктуры



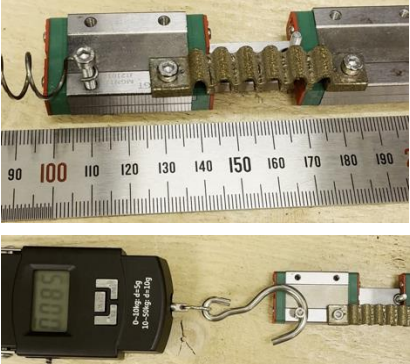
Исследование химического состава



Исследование  
микротвердости

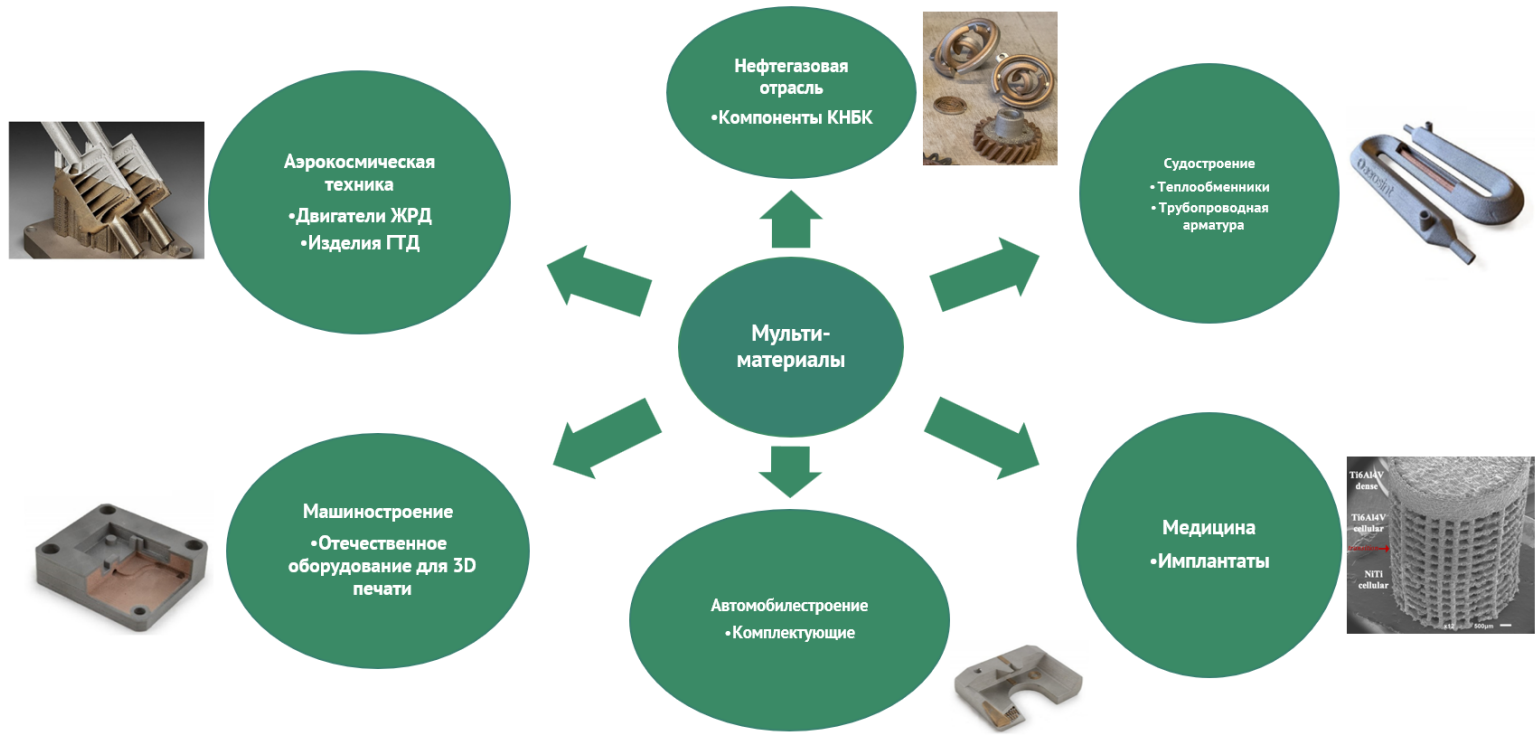


Принцип реализации эффекта изменения формы





## Перспективы внедрения



## Дальнейшие направления и вызовы

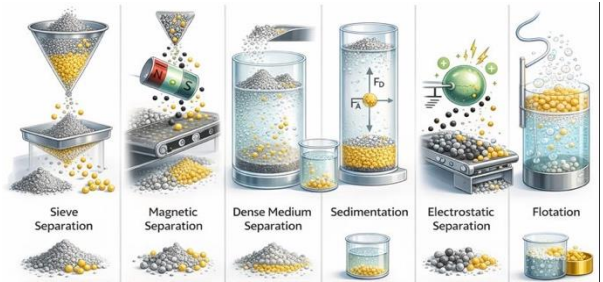
Исследования прототипов изделий



Изготовление сложных геометрий



Совершенствование методов разделения порошков





# БЛАГОДАРЮ ЗА ВНИМАНИЕ!

Борисов  
Евгений Владиславович

К.Т.Н., доцент  
НОЦ «Конструкционные и  
функциональные материалы»

✉ [evgenii.v.borisov@gmail.com](mailto:evgenii.v.borisov@gmail.com)