

Материаловедение - основа технологического развития

III Международная конференция «Материалы и технологии для Арктики»

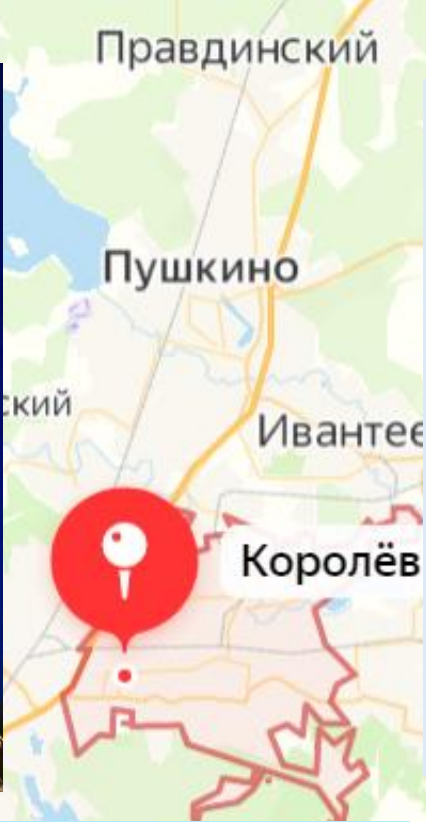
Логачёва А.И., д-р. техн. наук, начальник отделения ММиМТ АО «Композит»

Тимофеев А.Н., д-р. техн. наук, заместитель генерального директора по научной работе АО «Композит»

Туричин Г.А., д-р. техн. наук, ректор СПбГМТУ

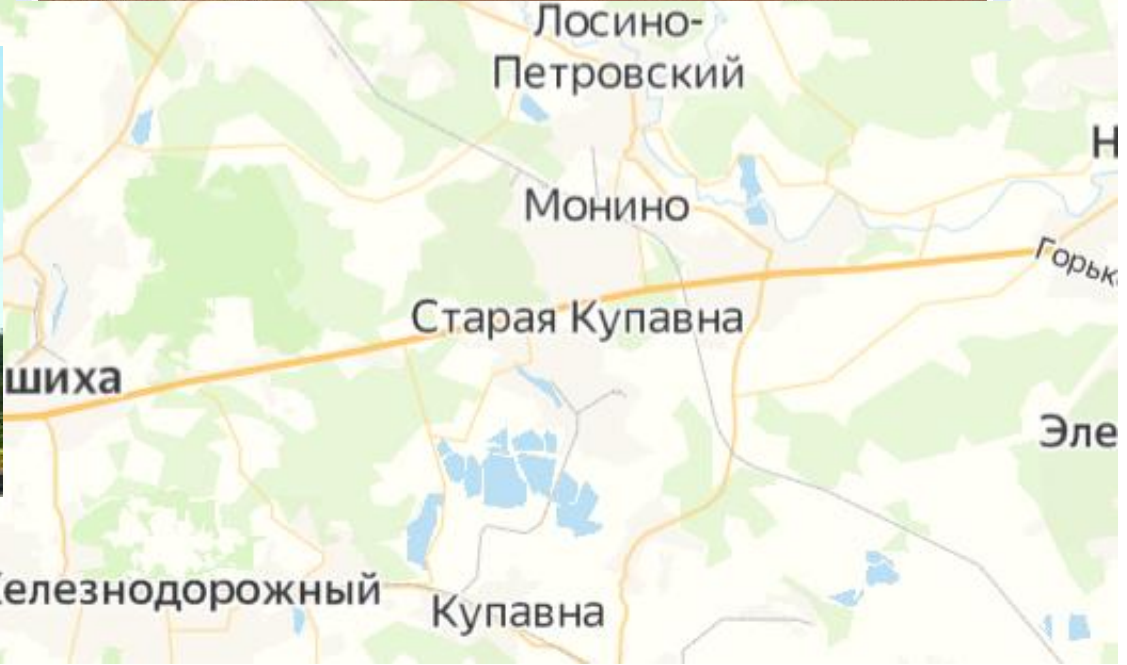
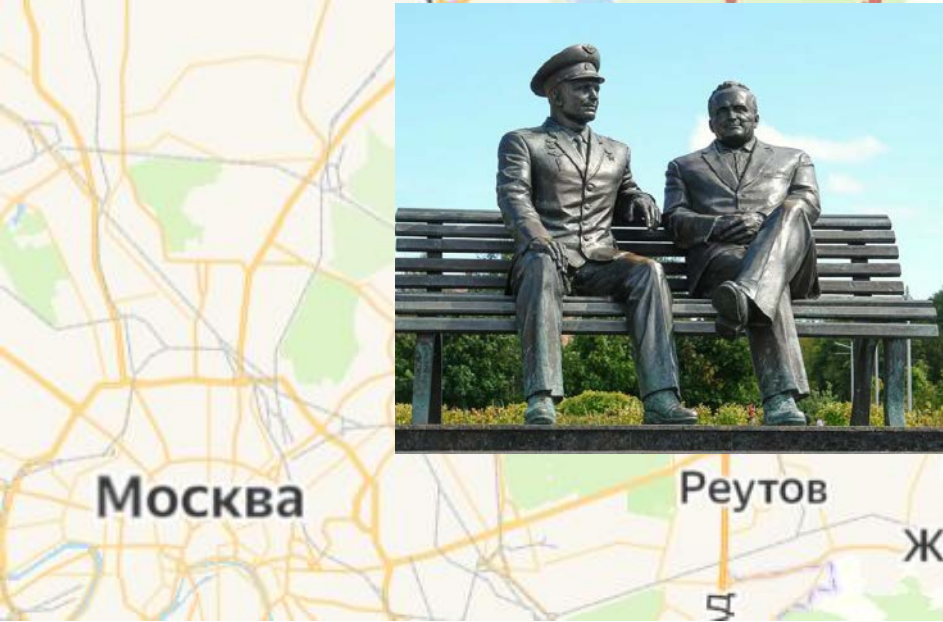
План презентации

- **АО «Композит» - головная организации
Госкорпорации «Роскосмос» в области материаловедения**
- **Два мировых тренда развития материаловедения**
 - **Аддитивные технологии**
 - **Композиционные материалы**



 **Акционерное общество «Композит»** 

Российская Федерация, 141070, Московская область, город Королёв, улица Пионерская, 4



АО «КОМПОЗИТ»



**ГОЛОВНАЯ
НАУЧНО-
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ
ОРГАНИЗАЦИЯ
ГК «РОСКОСМОС»
в области
МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ**

**ЦНИИ материаловедения
основан
28 января 1975 года**



НАПРАВЛЕНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

ДОПУСК
материалов
к применению
в РКТ

СОЗДАНИЕ
новых материалов
и
технологий
их производства

ПРОИЗВОДСТВО
материалов, заготовок, ДСЕ и сборка
конструкций из них
Восстановление и организация
производств дефицитных
и импортозамещающих материалов,
малотоннажной химии

ПРИОРИТЕТЫ

МЕТАЛЛУРГИЯ ГРАНУЛ АТ
МЕТАЛЛОКОМПОЗИТЫ
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ СПЛАВЫ
ТЕХНОЛОГИИ ГАЗОСТАТИРОВАНИЯ



**Ракеты-носители
Двигательные установки**

КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ
(полимерные, углеродные,
керамические, гибридные)
ТЕПЛОЗАЩИТНЫЕ ПОКРЫТИЯ



**Ракеты-носители
Двигательные установки
Космические аппараты
Высокоскоростные и
многофазовые летательные
аппараты**

Терморегулирующие ЭМАЛИ
КЛЕИ, ГЕРМЕТИКИ, КОМПАУНДЫ



Космические аппараты

БЕРИЛЛИЙ



**Крупногабаритные космические
платформы и зеркала**

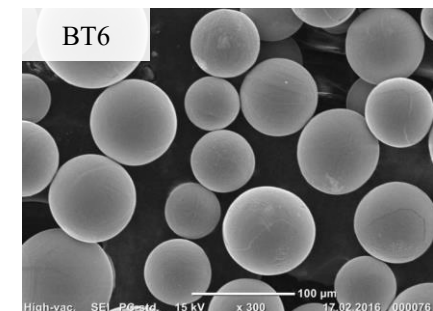
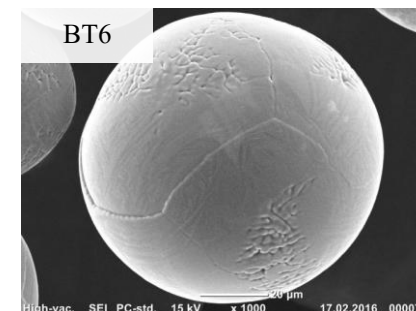
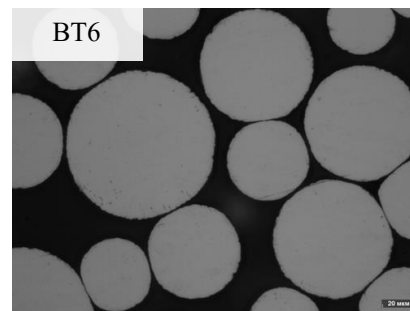
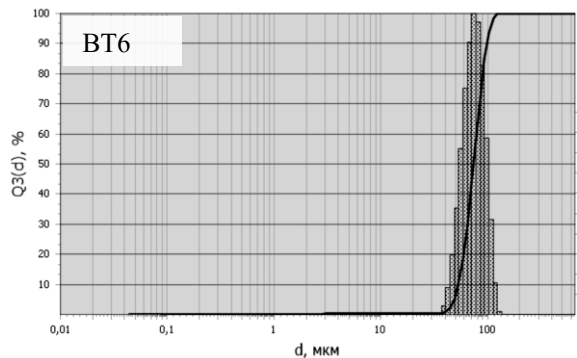
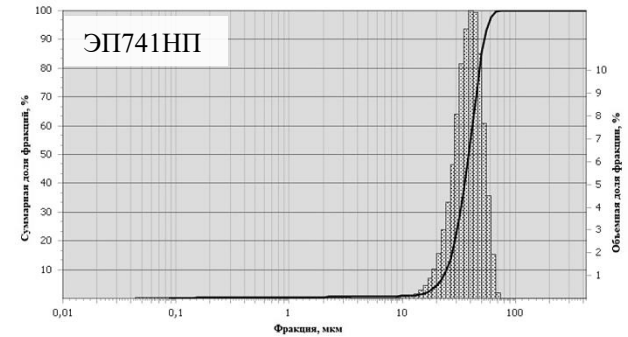
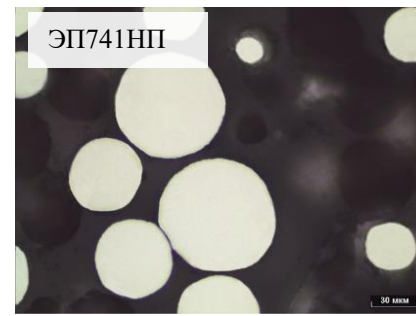
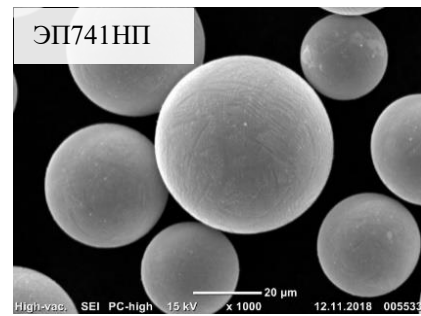
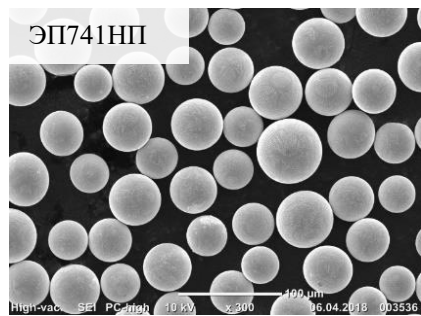


СОЗДАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЛИНИИ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА



ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛУЧАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ

Состав	Никелевые сплавы	Титановые сплавы	Интерметаллиды
Форма частиц	Сферичная	Сферичная	Сферичная
Основные рабочие фракции, мкм	20-63 40-100 40-150	40-100 40-150	40-150 40-250
Содержание O_2 , % _{мас.}	не более 0,007	не более 0,16	0,07-0,2
Текучность, сек.	12-16*	25-30*	14-30**
<i>* в зависимости от фракции ** в зависимости от состава и фракции</i>			



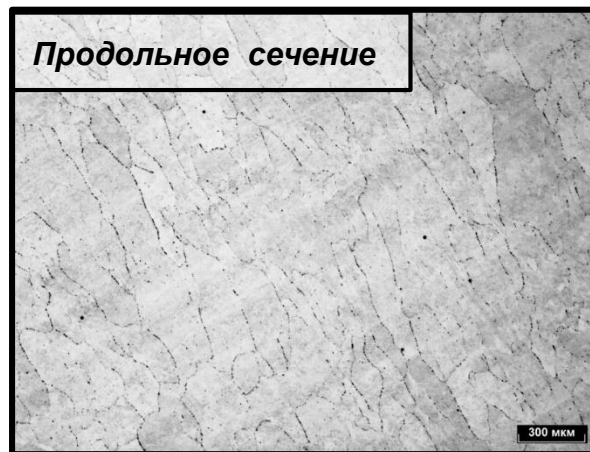
АТТЕСТАЦИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДАМИ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА*

** На примере титанового сплава ВТ6, полученного методом СЭЛС*

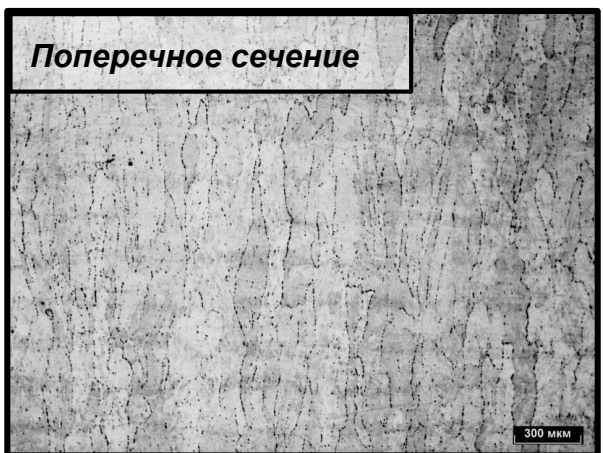
❖ *Горизонтальные образцы ($\alpha^{**} = 0^\circ$)*



❖ *Диагональные образцы ($\alpha^{**} = 45^\circ$)*



❖ *Вертикальные образцы ($\alpha^{**} = 90^\circ$)*



*** Ориентация образца по отношению к платформе построения*

АТТЕСТАЦИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДАМИ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА*

* На примере титанового сплава ВТ6, полученного методом СЭЛС

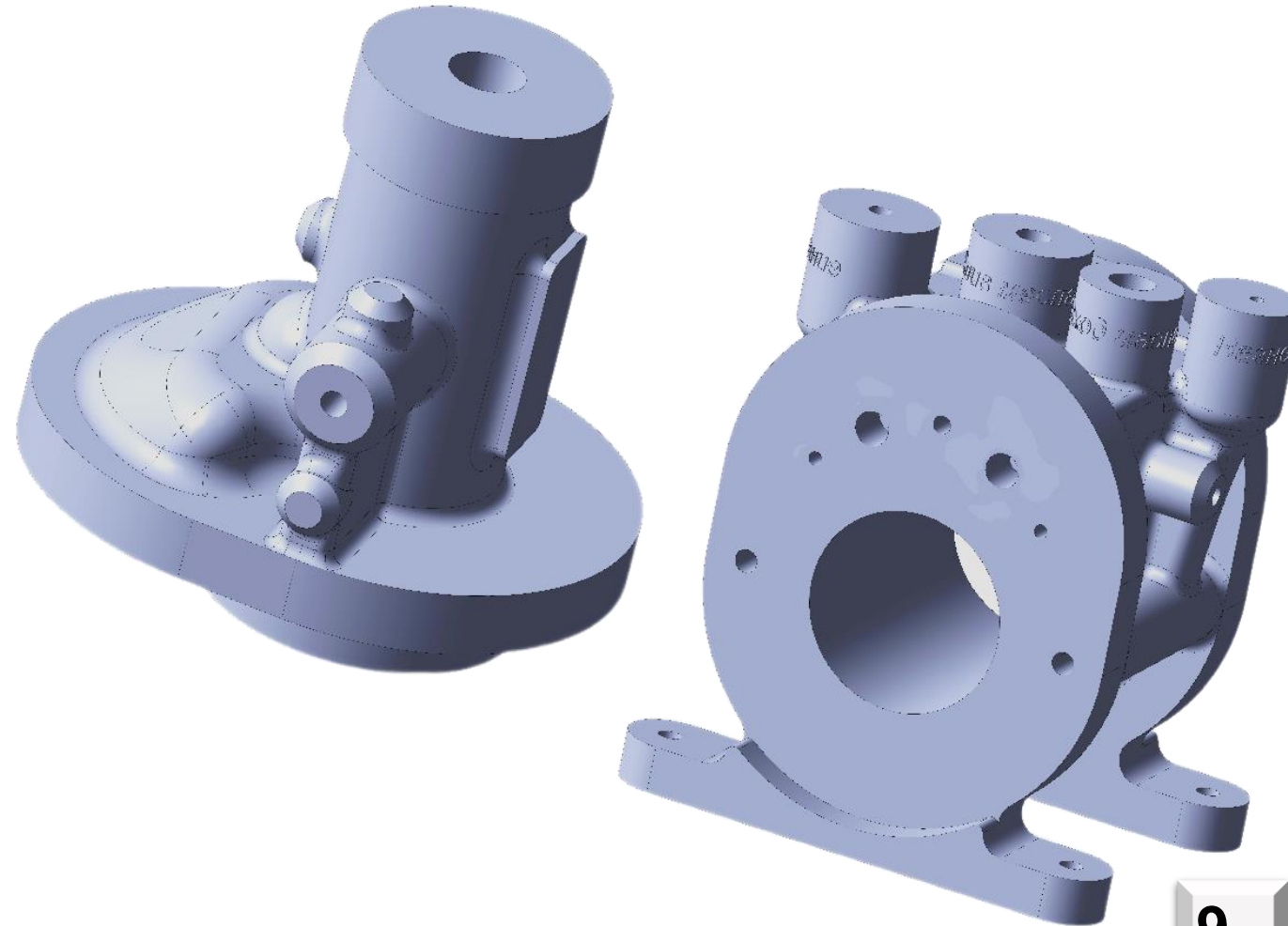
Результаты низкотемпературных испытаний по ГОСТ 1497-84 (T = 20 °C)				Свойства сплава ВТ6, регламентированные ГОСТ 26492-85		
Ориентация образца**, °	Предел прочности σ_B , МПа	Относительное удлинение δ , %	Относительное сужение φ , %	σ_B , МПа	δ , %	φ , %
0	1021 ± 14	12,4 ± 1,4	36,8 ± 3,8	835-885	6-8	15-20
45	988 ± 14	12,8 ± 1,1	46,9 ± 4,5			
90	1024 ± 10	15,9 ± 0,9	44,1 ± 3,4			

Результаты высокотемпературных испытаний по ГОСТ 9651-84 (T = 350 °C)				Свойства сплава ВТ6 (справочные данные)		
Ориентация образца**, °	Предел прочности σ_B , МПа	Относительное удлинение δ , %	Относительное сужение φ , %	σ_B , МПа	δ , %	φ , %
0	710 ± 10	15,2 ± 1,7	66,3 ± 0,2	670	12	60
45	684 ± 25	15,5 ± 1,0	70,2 ± 3,5			
90	743 ± 17	16,0 ± 0,1	69,6 ± 1,6			

** Ориентация образца по отношению к платформе построения

РАЗРАБОТАНА ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗАГОТОВОК КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ ВЫСОКОНАПОРНОГО НАСОСНОГО АГРЕГАТА МЕТОДОМ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ИЗ СПЛАВА ВТ6

Требования	Техническое задание	Полученные значения, среднее ± ДИ
Предел прочности σ_B , МПа	не менее 1000	1102±45
Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	не менее 950	1050±46
Относительное удлинение δ , %	не менее 10	14±1
Относительное сужение ψ , %	не менее 20	28±7
Ударная вязкость КСУ, Дж/см ²	не менее 50	52±5



ПОСТ-ОБРАБОТКА ИЗДЕЛИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДАМИ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА

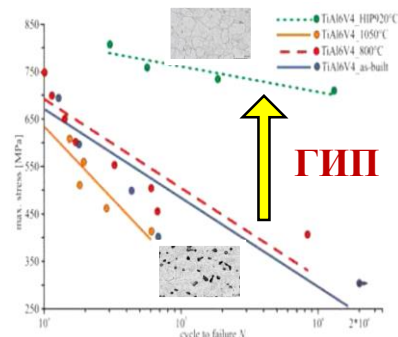
Комплекс ГИП



Газостат
Т до 1500 °С



Газостат
Т до 2000 °С



Повышение усталостной прочности
АТ-образцов из титанового сплава
Ti-6Al-4V*

Технические характеристики установок ГИП

Тип установки:	Промышленный газостат (тип 1)	Промышленный газостат (тип 2)
Рабочая камера:	d = 700 мм; h = 1500 мм	d = 800 мм; h = 1500 мм
Максимальная температура:	1500 °С	2000 °С
Максимальное давление:	200 МПа	207 МПа

Участок механической обработки

Удаление деталей с плиты построения, обработка плит



Ленточнопильный блок



Плоскошлифовальный блок

Удаление поддерживающих структур, промежуточная обработка

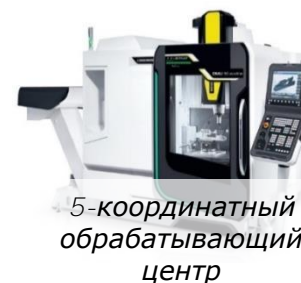


Эрозионный модуль-1



Эрозионный модуль-2

Финальная механическая обработка



5-координатный обрабатывающий центр

Улучшения состояния внутренних и внешних поверхностей АТ-изделий:

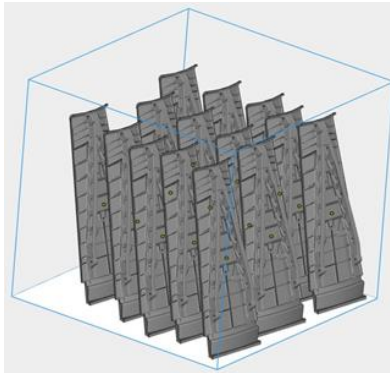
- ❖ Гидроабразивная прокатка;
- ❖ Химическое фрезерования;
- ❖ Ультразвуковая обработка;
- ❖ Лазерная полировка.

Развитие аддитивных технологий высокотемпературных металлических материалов



ДСЕ в текущих проектах

Никелевые сплавы Инконель-718, ЭП741НП, ВЖЛ12У



до 15 шт. за цикл (72 ч.)

Створки сопла



Деталь типа «Балка»
оптимизированной конструкции

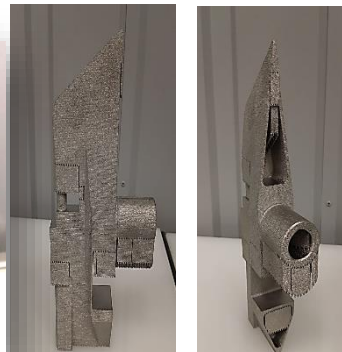
Титановый сплав ВТ6С



Деталь типа
«Кронштейн»



Деталь типа
«Штуцер»



Детали типа
«Пилон»

Эффективность освоения АТ

- ✓ Сохраняемость свойств на уровне традиционных материалов:

Результаты испытаний ЭП741НП (Т = 20 °С)

Состояние образца	Предел прочности σ_B , МПа	Относительное удлинение δ , %
СЛС	1083 ± 27	10,5 ± 4,3
СЛС + ГИП	1292 ± 25	24,9 ± 1,3
СЛС + ГИП +ТО	1455 ± 52	21,4 ± 6,7
По паспорту**	1275	13

- ✓ Снижение трудоемкости, финансовых и временных затрат на изготовление изделий сложной геометрии при серийном выпуске;
- ✓ Эффективный способ получить сложную форму из труднообрабатываемых материалов;
- ✓ Получение оптимизированной конструкции изделий в т.ч. из разнородных материалов.

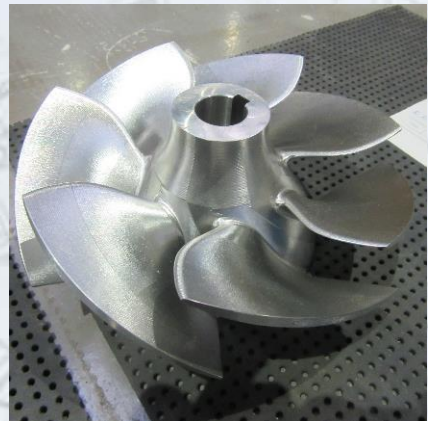
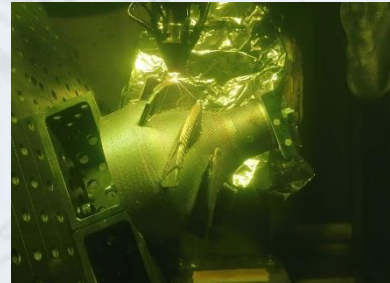
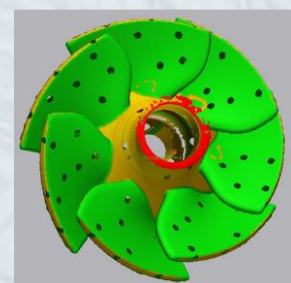
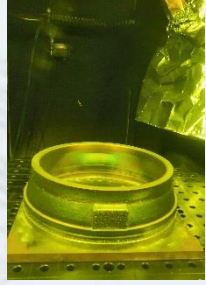
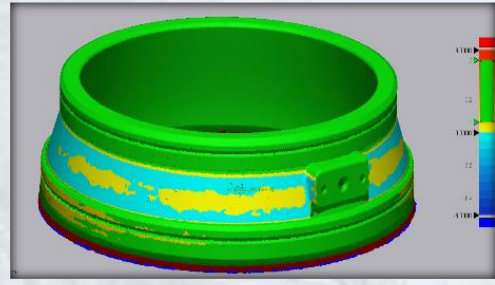
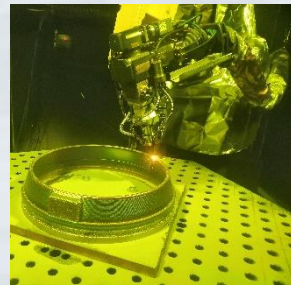
Позволяет рассматривать АТ, как наиболее перспективный метод при освоении новых высокотемпературных металлических материалов



ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЗАГОТОВОК ДЕТАЛЕЙ ВОДОМЕТНЫХ ДВИЖИТЕЛЕЙ



Лаборатория лазерных и аддитивных технологий СПбГМТУ





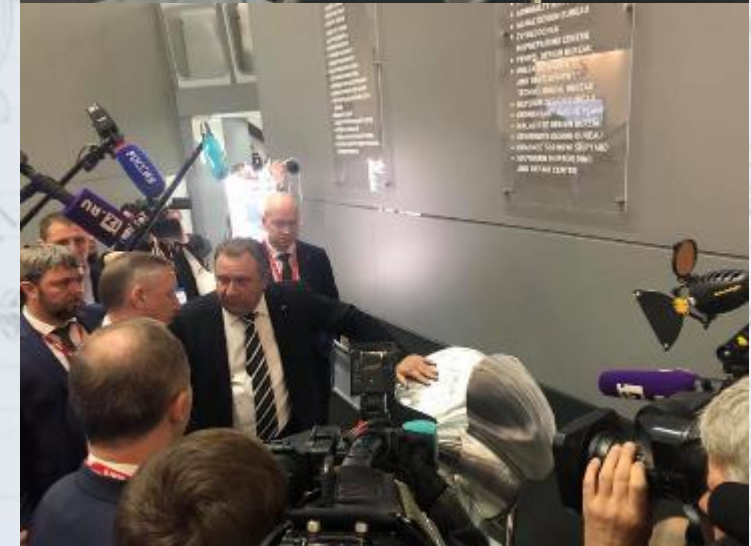
Механические свойства

Материал	Предел текучести, (МПа)	Предел прочности, (МПа)	Отн. удлинение, (%)	Работа удара, KV ⁻¹⁰ , (J)
Стандарт ТУ	≥620	≥790	≥19	≥40
ПЛВ	794,7	1088,8	7,3	16,2
ПЛВ+ТО (T=620С, t=5ч)	743,2	837,2	12,9	41,8
ПЛВ+ТО (T=620С, t=5ч) двойной отпуск	777,4	837,8	14,4	34,1
ПЛВ+ТО (T=620С, t=5ч) тройной отпуск	532	784,2	19,2	50,5

Технология ПЛВ и термическая обработка стали 06X15H4ДМ и 08ГДНФ аттестована в РМРС Классификации и постройки морских судов. Часть XIII материалы.

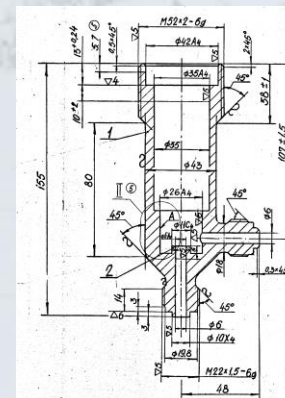
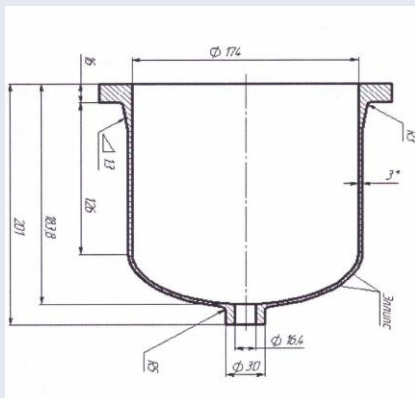
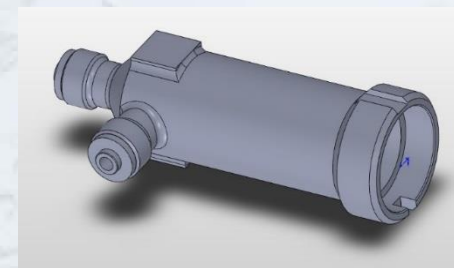
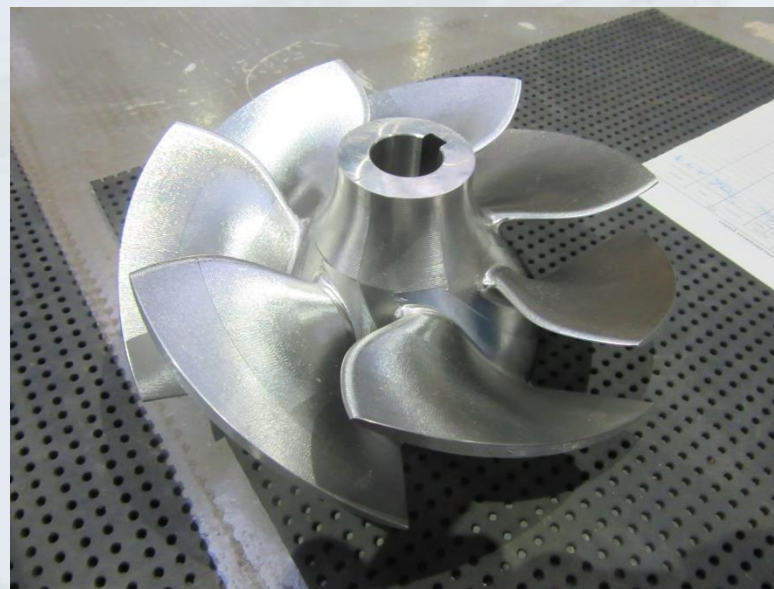
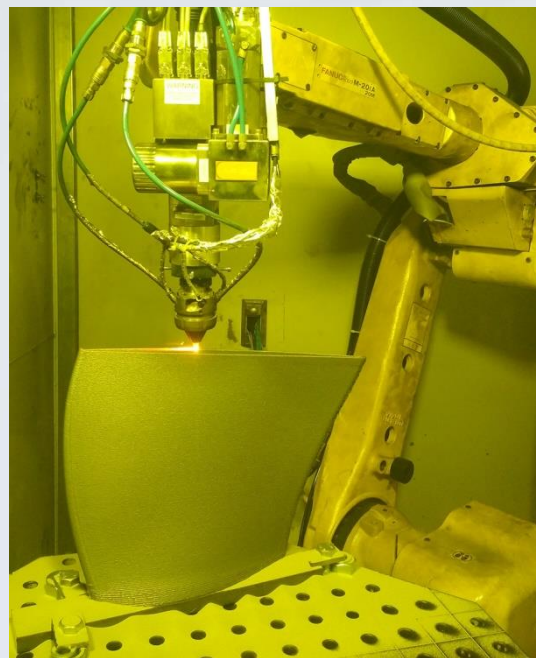
Публикация:

R. Mendagaliev, O. Klimova-Korsmik, V. Promakhov, N. Schulz, A. Zhukov, V.Klimenko, A. Olisov. Heat Treatment of Corrosion Resistant Steel for Water Propellers Fabricated by Direct Laser Deposition. Materials, Vol. 13(12), 2020, 2738.





ОТРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ СУДОВЫХ ДВИЖИТЕЛЕЙ И СУДОВОЙ АРМАТУРЫ





Изготовление сепарационного элемента для атомных ледоколов

Общая информация:

- Работы выполнены совместно с ГНЦ РФ АО «НПО «ЦНИИТМАШ»
- Сфера применения изделия : сепарационный элемент для энергетических установок серийных атомных ледоколов
- Материал : 08X18H10T
- Габариты: $D = 156 \text{ мм}$, $H = 800 \text{ мм}$
- Средняя толщина стенок: 3 – 5 мм
- Масса: 18 кг

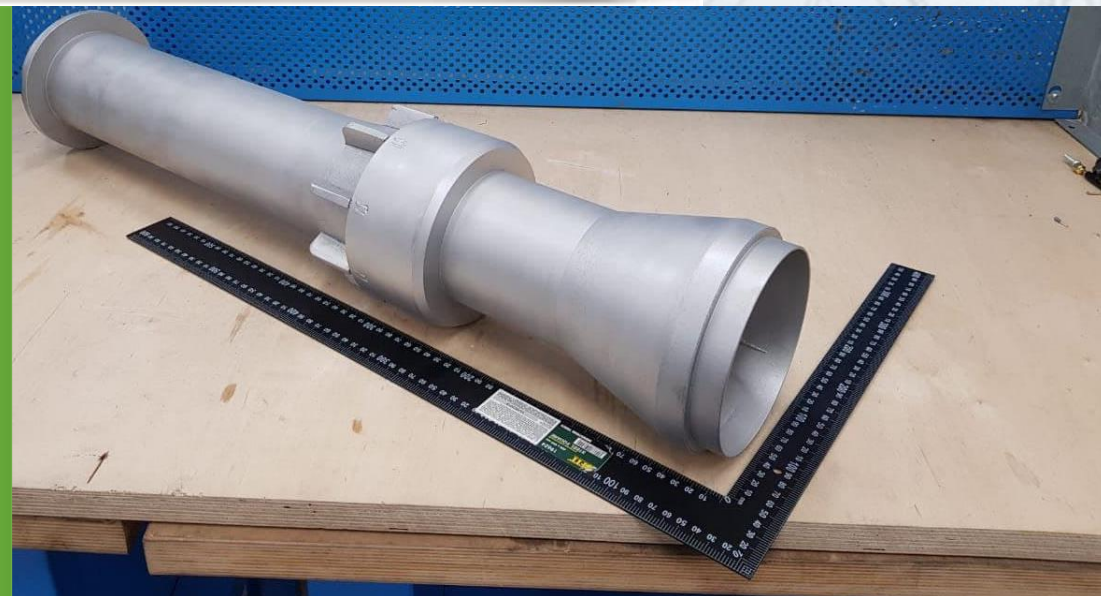
Проводимые работы:

- ✓ Изготовление демонстратора методом ПЛВ
- ✓ Изготовление опытного образца комбинированным методом
- ✓ Сертификация технологии в морском регистре
- ✓ Получение сертификата производителя

3-D модель сепарационного элемента



Изготовленный демонстратор

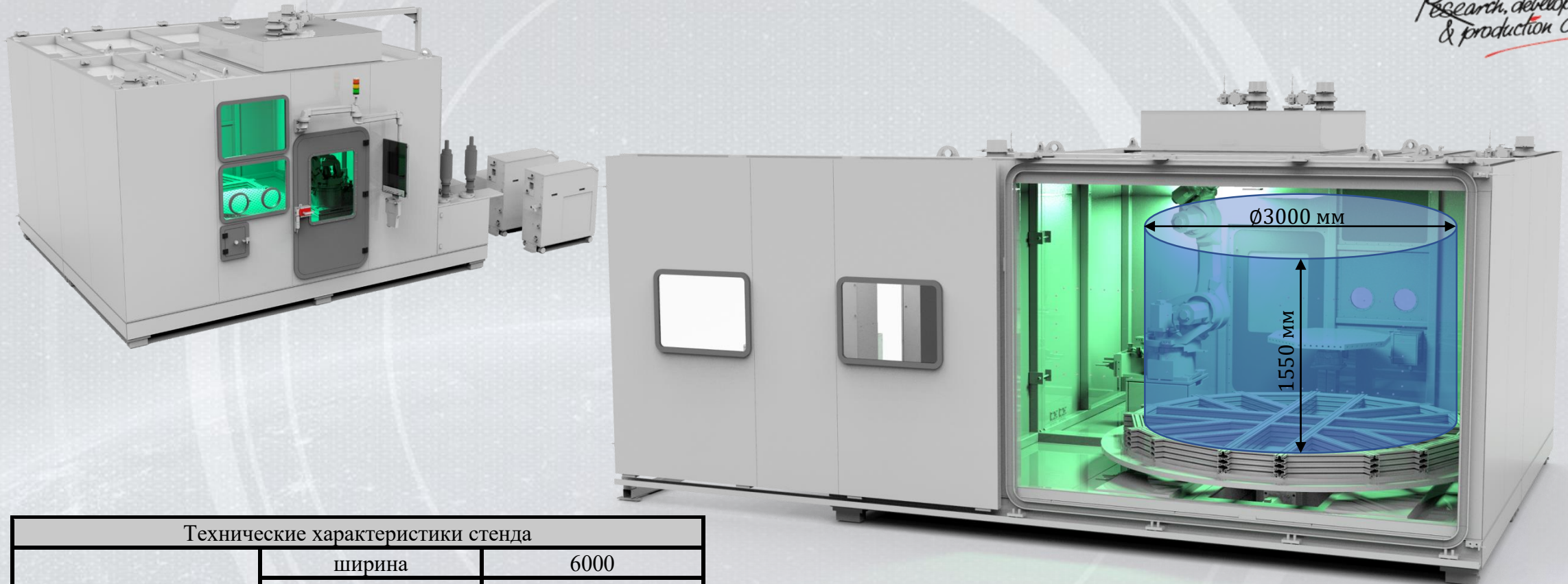




Стенды прямого лазерного выращивания



Kompozit
КОМПОЗИТ
*Research, development
& production corp.*



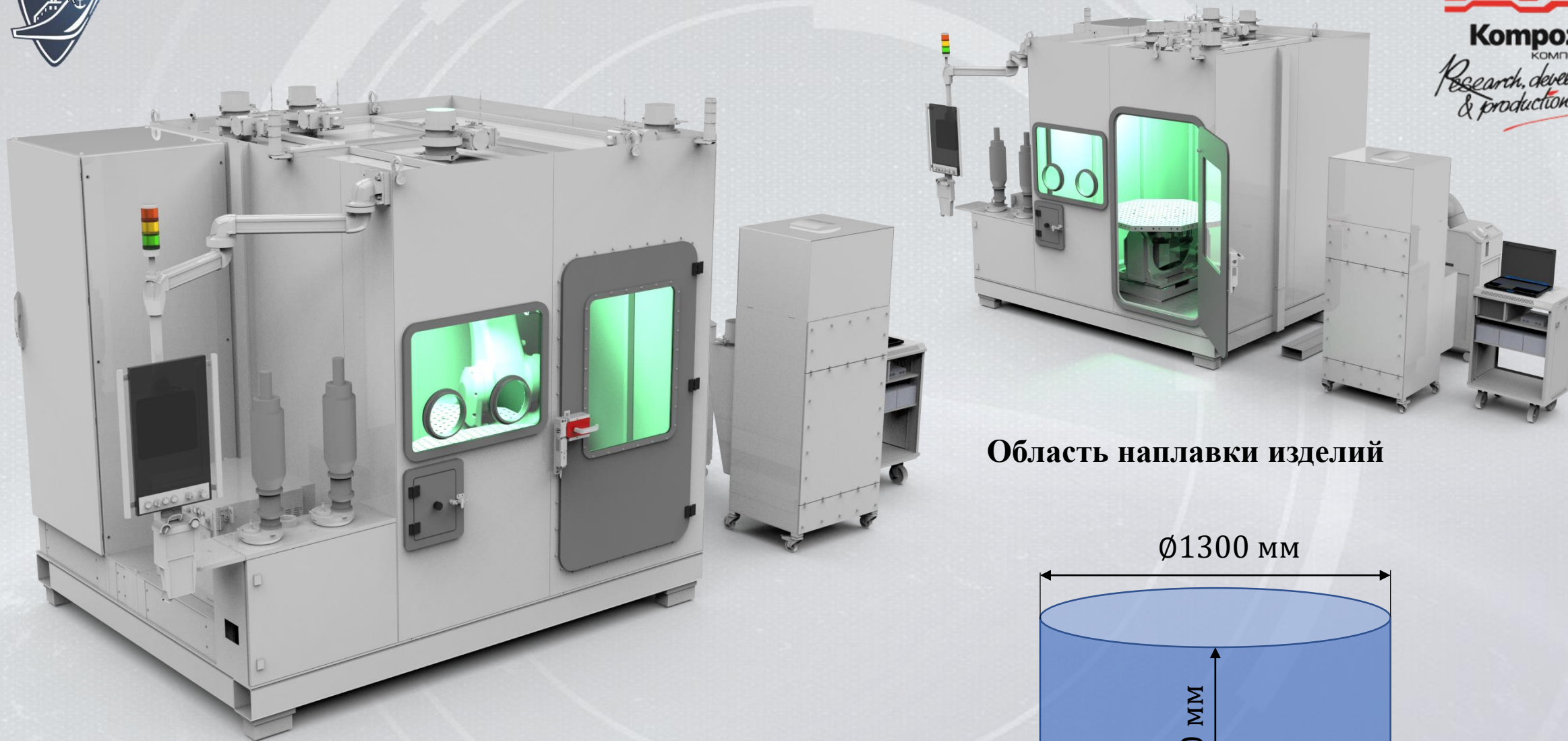
Технические характеристики стенда		
Габариты, мм	ширина	6000
	длина	9000
	высота	3400
Масса кг, не более	15000	
Потребляемая мощность	Не более 60 кВА	



Стенды прямого лазерного выращивания

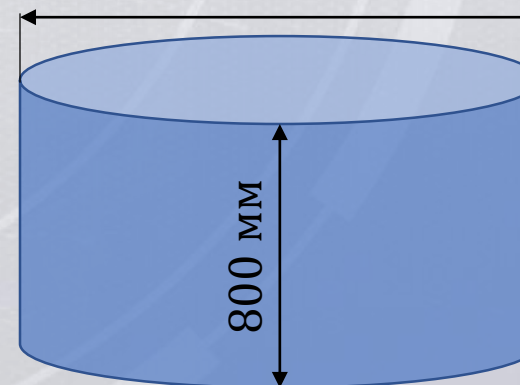


Komposit
КОМПОЗИТ
*Research, development
& production corp.*



Область наплавки изделий

Ø1300 мм



800 мм



Kompozit
КОМПОЗИТ

*Research, development
& production corp.*

Основные технические особенности стандов

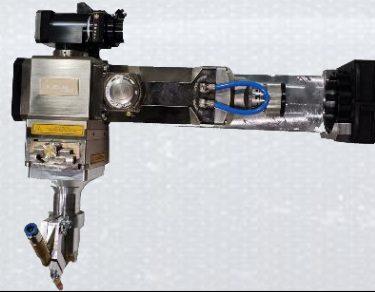


Виды технологических инструментов

Инструмент прямой наплавки порошка



Инструмент прямой наплавки
проволокой



Проволоки



Порошки



Технологические характеристики

Максимальная производительность порошкового питателя	до 1 кг/ч
Максимальная производительность проволочного питателя	до 20 м/мин
Ширина наплавляемого слоя за 1 проход	от 1 до 4 мм
Инертная среда	аргон



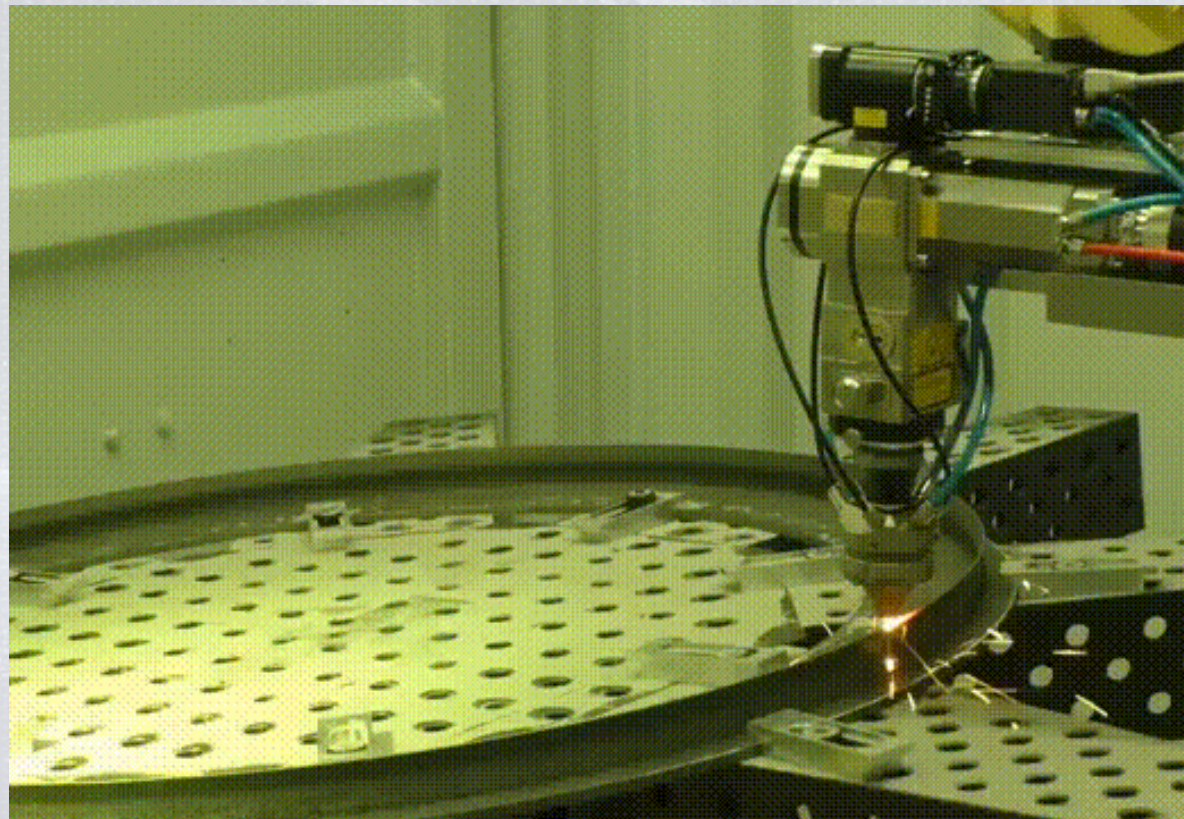
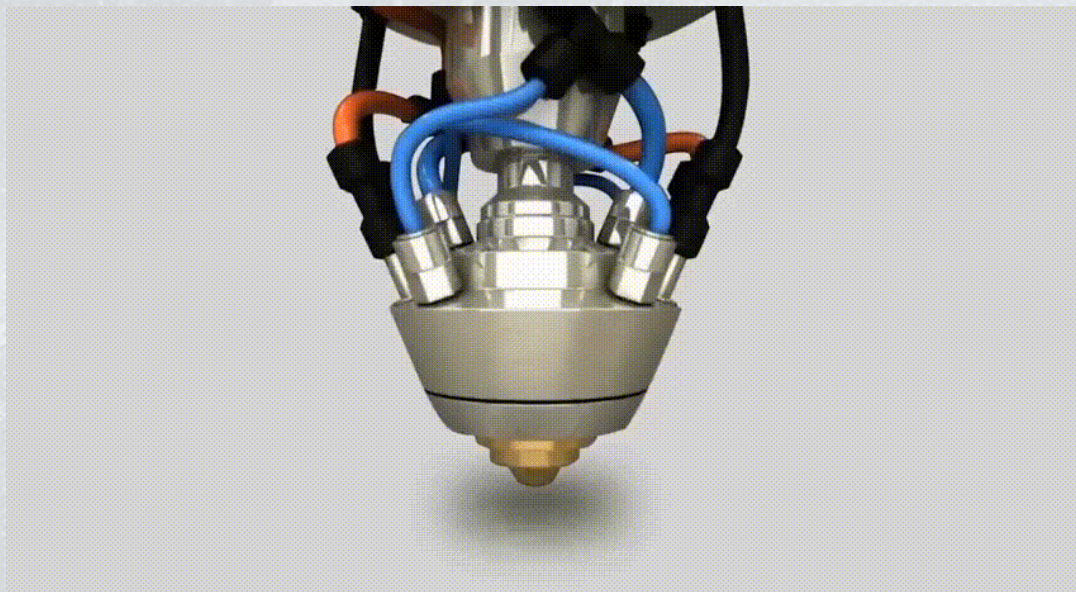
®

Kompozit

КОМПОЗИТ

*Research, development
& production corp.*

Принцип работы

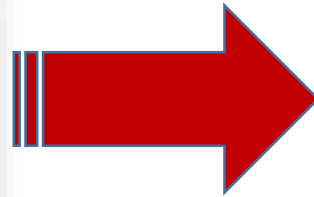




KM600M (область 620 x 620 x 1100 мм)



СЛС-1



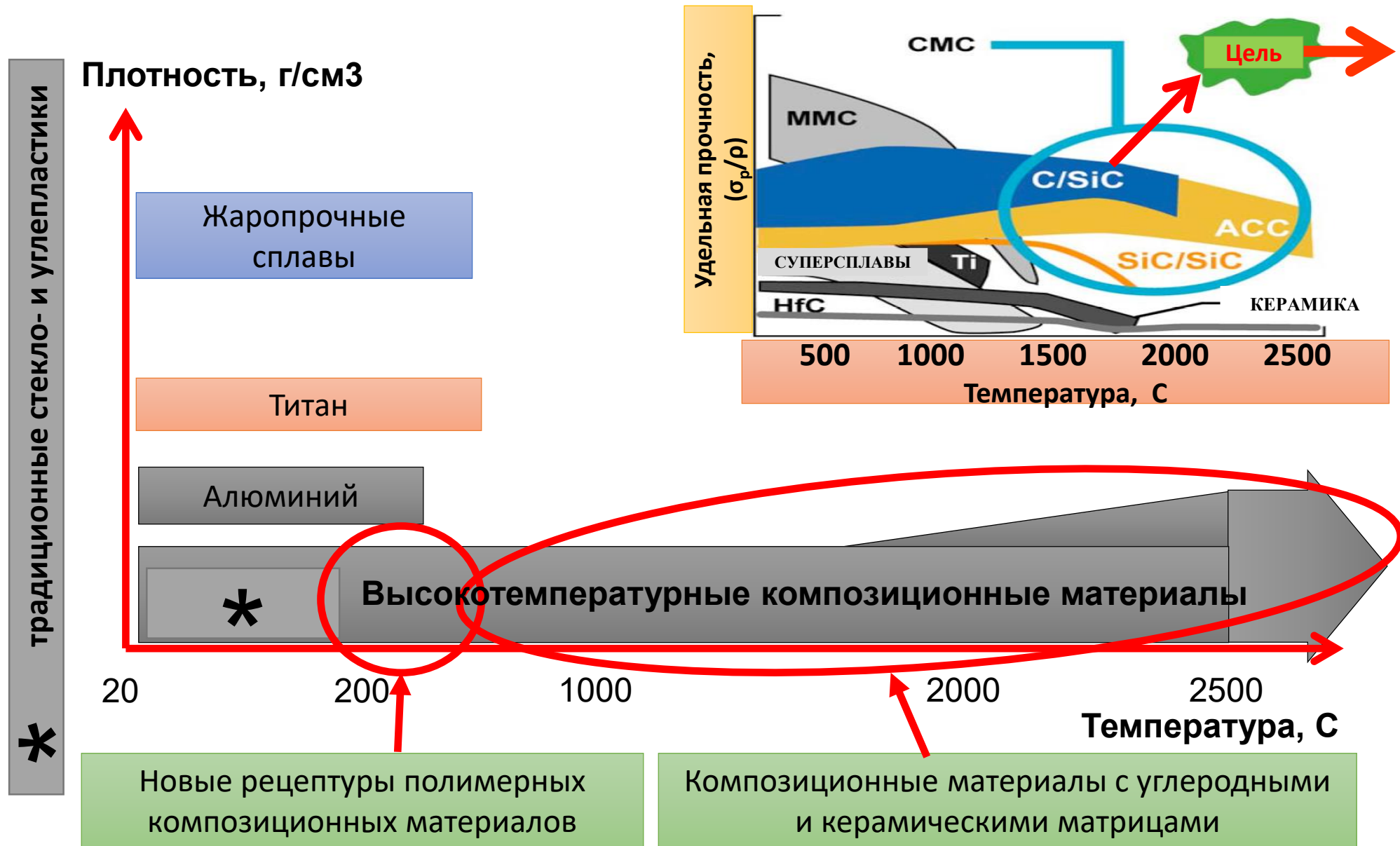
KM270M
(область 275 x 275 x 355 мм)



KM300M / KM400M
(область 305 x 305 x 400 мм,
425 x 425 x 420 мм)

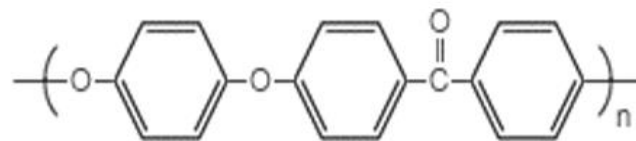


Высокотемпературные композиционные материалы



АО «Композит» разработан отечественный полимерный композиционный материал (ПКМ) и крепеж из него для крепления приборов, кабелей, трубопроводов и других конструкций

Термопласт автомат, специализированный для работы с армированным ПЭЭКом



ПОЛИЭФИРЭФИРКЕТОН



УГЛЕРОДНОЕ ВОЛОКНО

Молотое волокно – литье под давлением.
Нить, жгут – намотка, ткачество, плетение.
Лента, ткань – выкладка.



Высокотемпературный ($T_{\text{раб. до } 300^{\circ}\text{C}}$) углепластик

Крепежные детали и листовой полуфабрикат из армированного ПЭЭКа

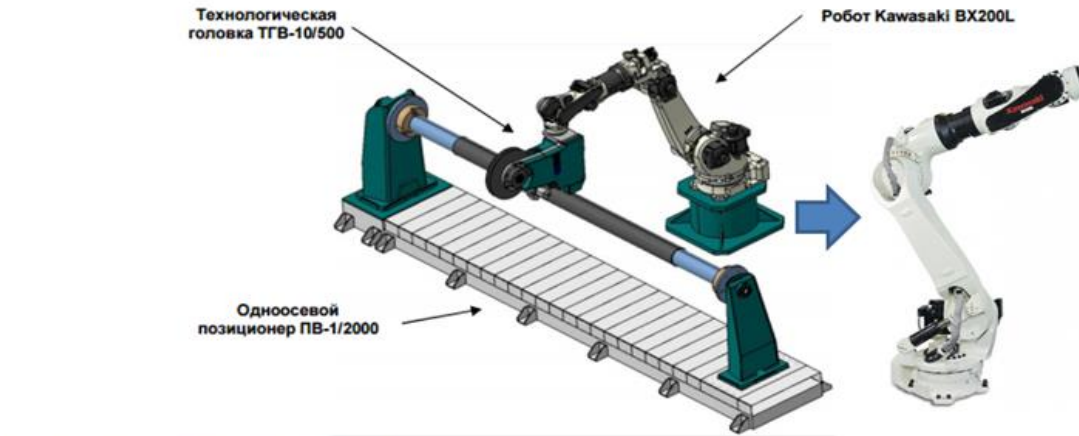
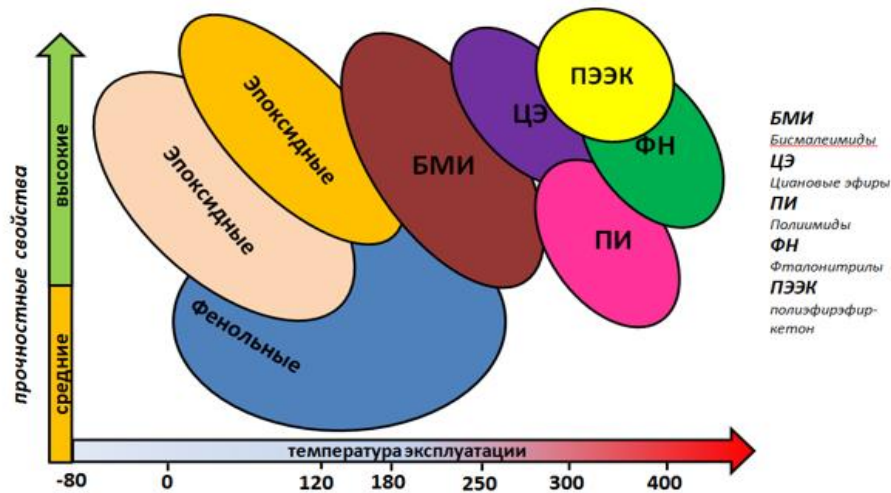


- ✓ Свойства ПЭЭК с непрерывным армированием углеродным волокном при комнатной температуре не менее традиционных углепластиков на термореактивных смолах.
- ✓ При температурах более 200°C армированный ПЭЭК по прочности в 1,5-4 раза превосходит алюминиевые сплавы, в 2-3 раза превосходит конструкционные пластмассы.
- ✓ При серийном производстве детали из армированного ПЭЭКа по цене сопоставимы с алюминиевыми деталями.
- ✓ По плотности армированный ПЭЭК в 2 раза ниже алюминия.
- ✓ По температурам эксплуатации полностью заменяет алюминий.

АО «Композит» на основе **отечественных** новых типов связующих разрабатывает полимерный композиционный материала для изготовления облегченных конструкций топливных баков, работоспособных при температурах от **минус 253 °С до плюс 250 °С**.

Разработан **отечественный роботизированный комплекс** послыного лазерного спекания для изготовления емкостей из полимерных композиционных материалов

РАЗРАБОТКА ОТЕЧЕСТВЕННЫХ СВЯЗУЮЩИХ ДЛЯ ПКМ



Количество осей робота: 6
Грузоподъемность: 200 кг
Точность укладки: ±0,2 мм
Длина детали: до 1000 мм
Диаметр детали: 500 мм

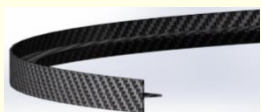


Выкладочные головки с послыным спеканием углеродной ленты с термопластичным связующим ПЭЭК

Ожидаемый технико-экономический эффект

- Снижение трудоемкости изготовления топливных баков на 20%.
- Снижение весовых характеристик конструкции топливных баков на 30%.
- Увеличение массы выводимых на космическую орбиту космических аппаратов до 10 %;
- Создание нового промышленного производства герметичных емкостей из полимерных композиционных материалов.

Средства формирования армирующих структур



Машины радиального плетения с D_{max} до 2.5 м



Автоматизированная прошивка



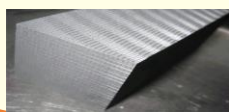
Объемное ткачество



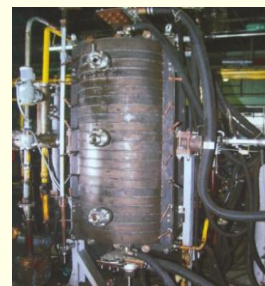
Машины формирования иглопробивных каркасов до 2000x2000x500 мм; до \varnothing 2000x2500



Средства формирования углеродных и керамических матриц



Автоклав для пропитки пеком



Печь ГФ CVI насыщения



Газостат 680 атм \varnothing 1000x1000 мм



Печи ВТО 2700 С \varnothing 1600x2000 мм



Печи ГФ CVI/CVD \varnothing 2200x2500 мм

Средства прецизионной механической обработки и NDT



5-ти координатные обрабатывающие центры Doosan, Ibarma, Hermle (зона обработки до 1400 мм), ст. защиты IP 64



Установка активной термографии

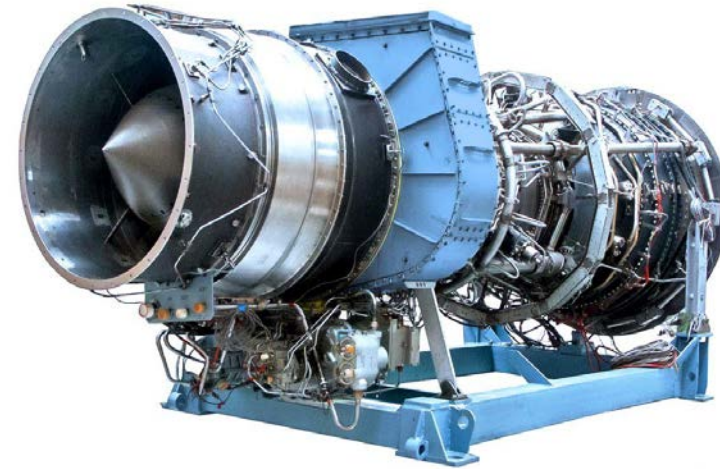
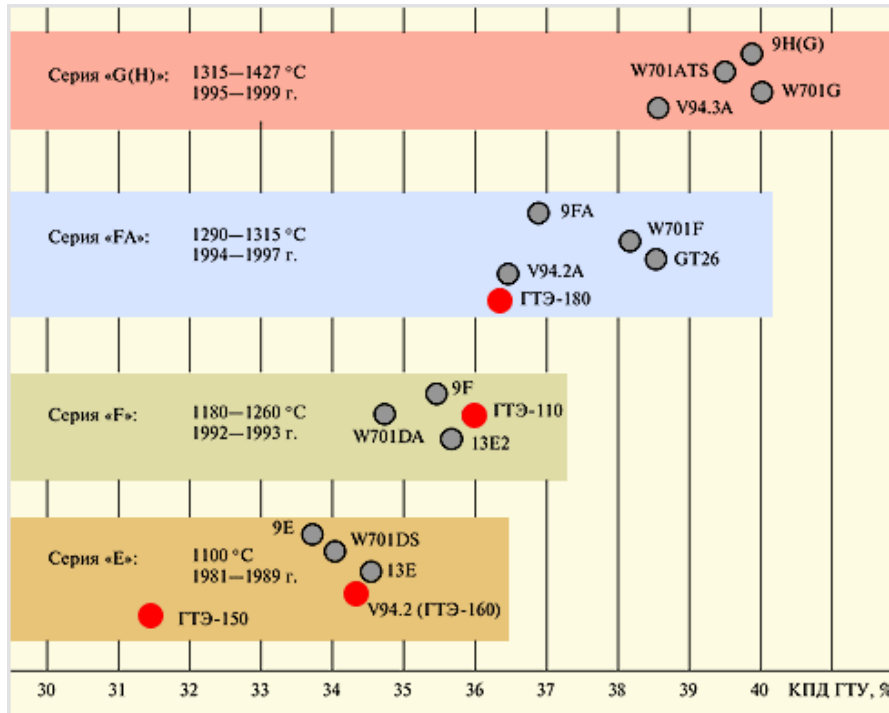


Перспективы применения композиционного материала $\text{SiC}_f/\text{SiC}_m$ в ГТУ

1427°C

цель

1600°C



Элементы камеры сгорания

Надроторная вставка



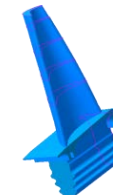
Внутренняя стенка КС



Створка жаровой трубы



Лопатка ТВД



Возможности АО «Композит» в части создания материала $\text{SiC}_f/\text{SiC}_m$

Композиционный материал $\text{SiC}_f/\text{SiC}_m$

Керамическое
ВОЛОКНО

SiCN -волокно

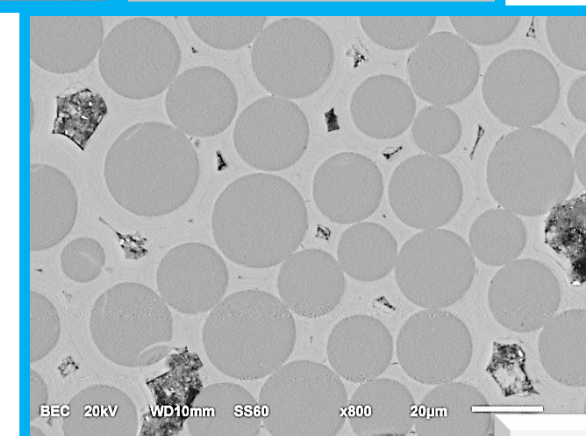
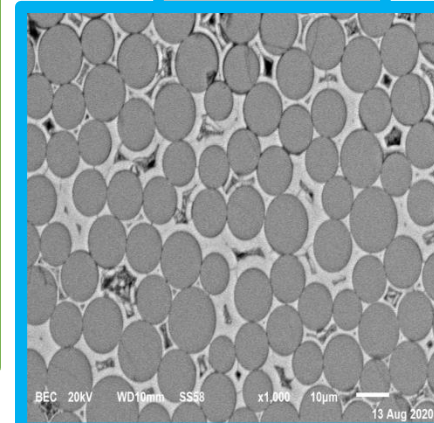
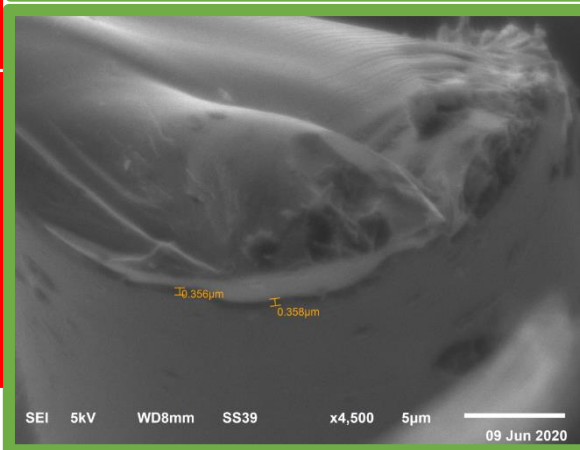
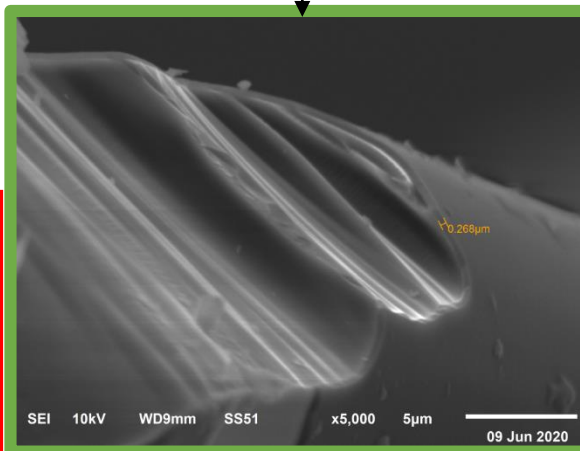
ПКС-волокно,
 SiC -волокно

Интерфаза BN

SiC -матрица

SiC -CVI

SiC -(CVI+PIP)

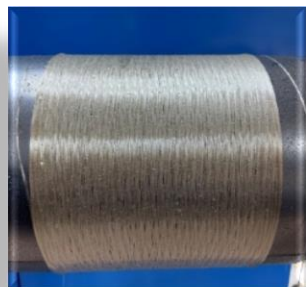


Текстильная переработка SiC-нити

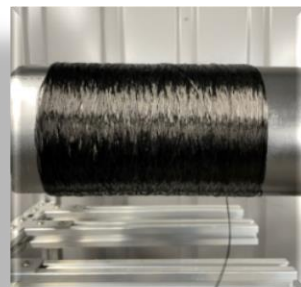


SiC-ткань производства АО «Композит» имеет следующие параметры:

- длина до 20 м;
- ширина 200 мм;
- поверхностная плотность 700..750 г/м²;
- снижение прочности нитей в ходе текстильной переработки – менее 10%



Непрерывное ПК-волокно, 0,75 к, 300 м



Непрерывное SiC-волокно, 0,75 к, 300 м



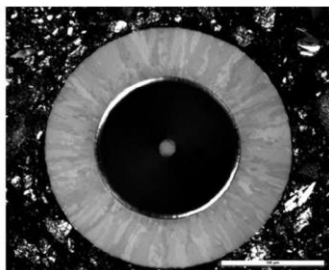
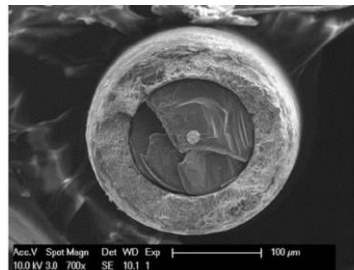
«Применение композиционных материалов в двигателестроении»

Свойства $\text{SiC}_f/\text{SiC}_m$ (бескеровное волокно) материала производства АО «Композит»

Параметры экспериментальных ККМ состава $\text{SiC}_f/\text{SiC}_m$	
Плотность, г/см ³	2,2 - 2,5
Открытая пористость, %	≤ 10,0
Объемное содержание волокна, %	≈ 30
ТКЛР 10 ⁻⁶ 1/К, при 300 К	5,0
Предел прочности при сжатии, МПа	280
Предел прочности при растяжении, МПа	140
Стойкость к термоциклированию (20 ↔ 1200 °С), циклов	10000 (не доведены до разрушения)
Стойкость к термоциклированию (20 ↔ 1400 °С), циклов	3000

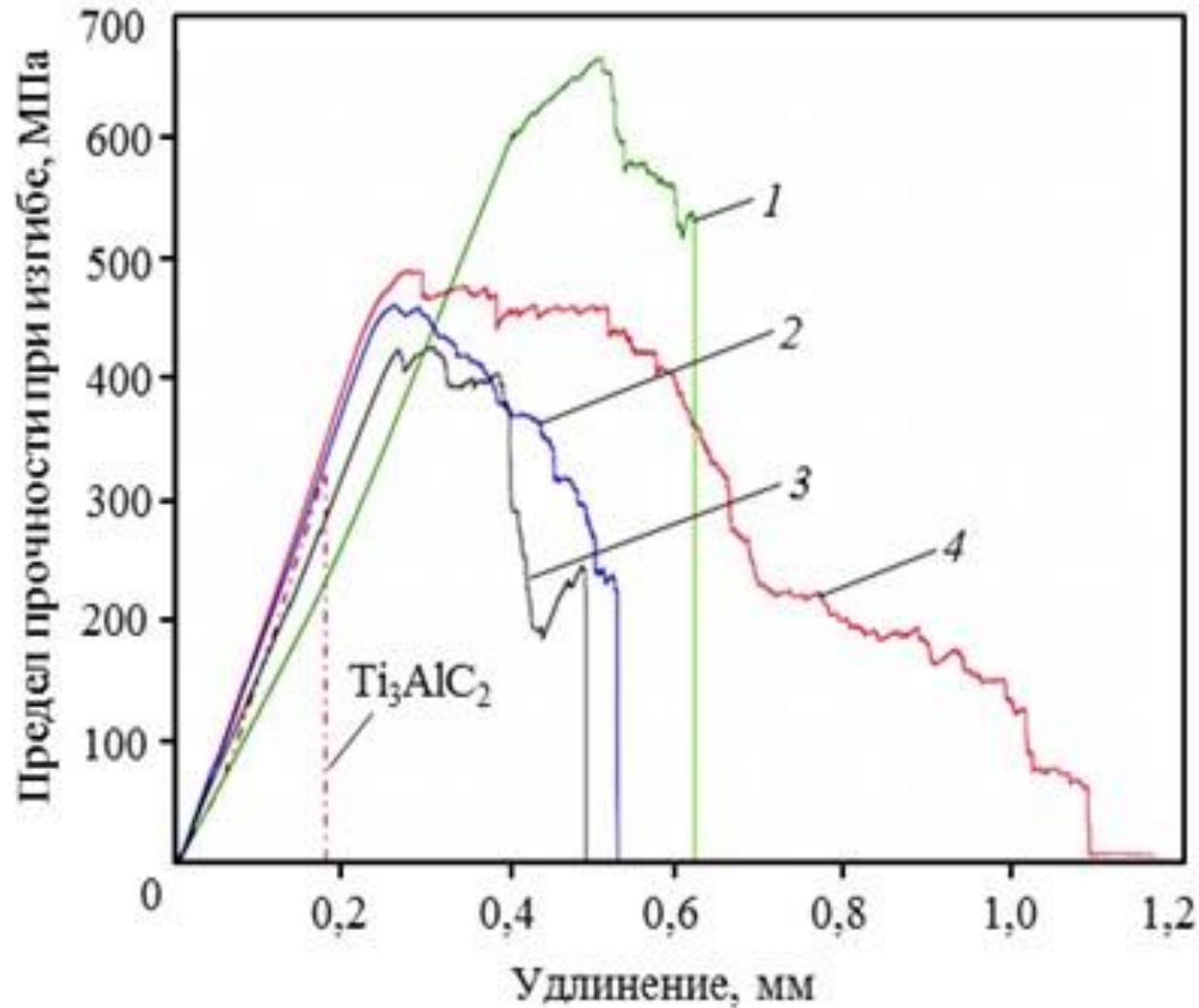
Свойства керновых волокон из карбида кремния

Фирма-производитель	Торговая марка	Диаметр, мкм	Предел прочности при растяжении	Модуль упругости	Плотность, г/см ³	Диаметр керна, мкм/тип	Толщина покрытия, мкм/тип
			ГПа				
TISICS Ltd	Sigma 1140+	100	3,4-4,1	400-410	3,4	14/W	(3-5) C
	Sigma 1240	100	3,4-4,1	400-410	3,4	14/W	1C+1TiB
Specialty Materials Inc.	SCS-0	140	1,7	400	3,2	33/C	Без покрытия
	SCS-6	142	3,4-4,0	400	3,0	33/C	3C+Si (градиентное)
	SCS-ultra	142	≥6,2	415	3,0	33/C	
FMW Composite Systems Inc.	Trimarc	126	3,5	427	3,3	12,5W/C	3C (H-S-H)*



Волокно карбида кремния на углеродном керне

Результаты испытаний на прочность при изгибе при комнатной температуре композиционных материалов



- 1 - SCS-9A,
- 2 - SCS-6,
- 3 - SCS-6/SCS-9A с матричным сплавом Ti_3AlC_2 при соотношении волокон 70/30,
- 4 - SCS-6/SCS-9A с матричным сплавом Ti_3AlC_2 при соотношении волокон и 40/60

Композиционный материал	Предел прочности при изгибе, МПа
Матричный сплав Ti_3AlC_2	350-400
SCS-6	450
SCS-9A	610
SCS-6/SCS-9A (70/30)	470
SCS-6/SCS-9A (40/60)	510

Сравнительные свойства композиционных материалов, армированных керновыми волокнами, с металлом матрицы

Материал	АМг6	АМг6-В	АМг6-SiC	BT6-SiC	BT6
Плотность, кг/м ³	2640	2550	2800-3000	3900-4000	4400
КЛТР, ($\alpha_{20 \div 100}$) • 10 ⁻⁶ град ⁻¹	24,1	7,5	7-8	6-7	8,2
Модуль упругости, ГПа (20 °С)	71	250	210	210	115
Прочность на растяжение, МПа	350 (20 °С) 120 (250 °С)	1080 (20 °С) 1000 (250 °С)	1500 (20 °С) 1450 (250 °С)	1700 (20 °С) 1600 (250 °С)	900-1100 (20 °С) 600-700 (250 °С)

ДСЕ из волокнистых металлических композиционных материалов



Кинетическое крепление



Силовые элементы квадратного/круглого сечения



Стержень привода



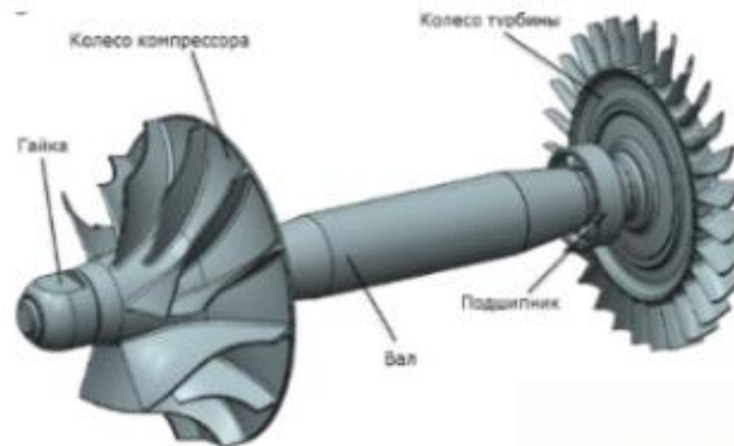
Элемент силовой ферменной конструкции.



Вал вращения двигателя



Переходная ферменная конструкция

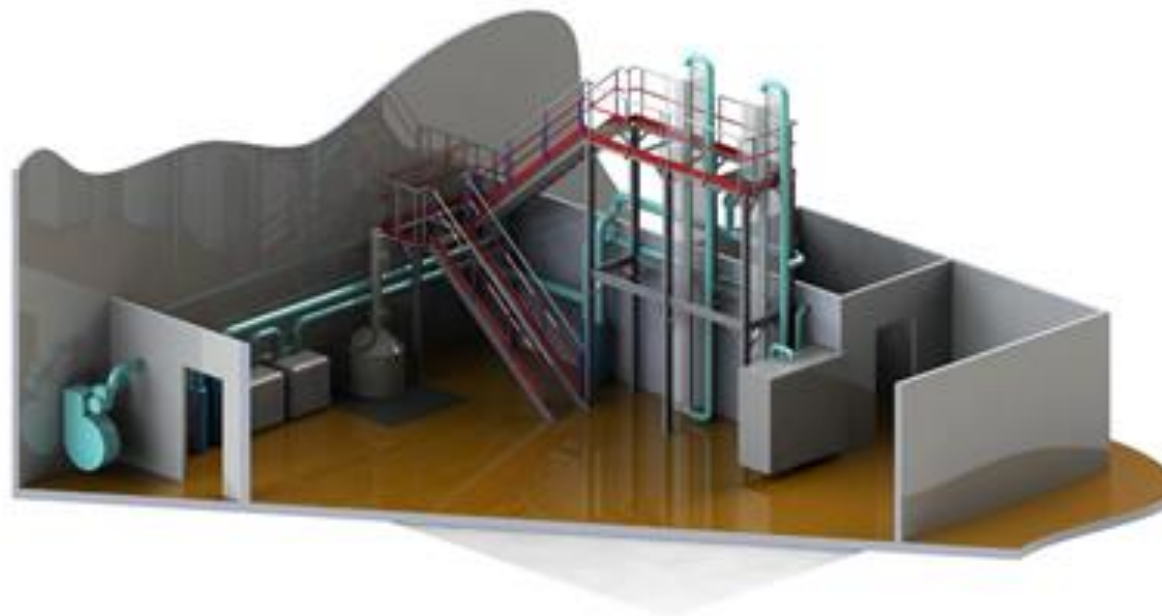
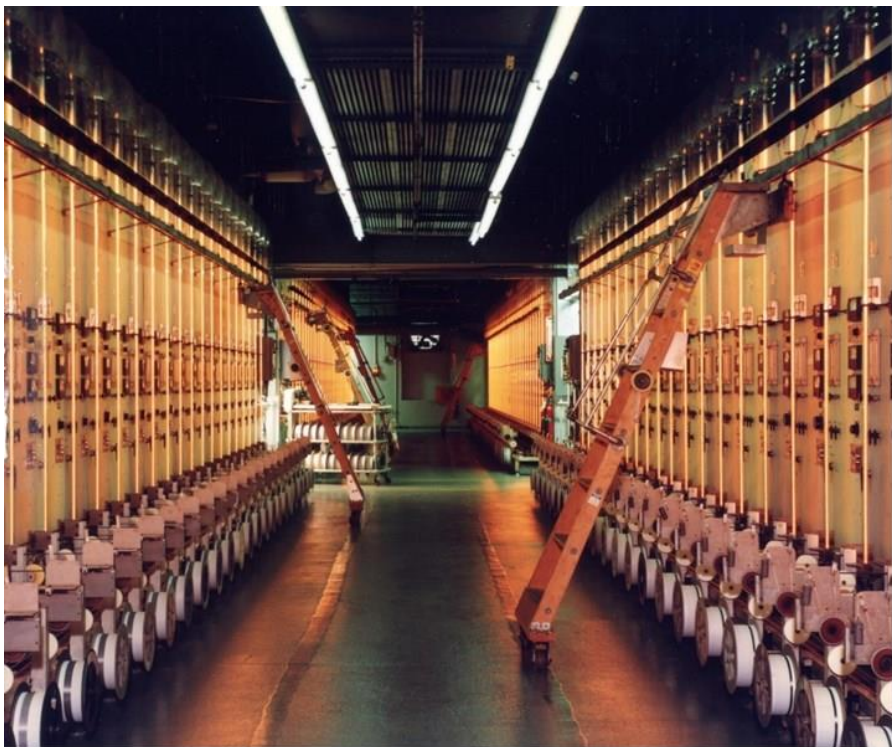


Совмещенный узел вал с крыльчатками



Лопатки вентилятора, корпусные детали, основной вал газотурбинного двигателя

Керновое SiC волокно



	SCS-6	EW-1	EC-1
Диаметр, мкм	140	140 ± 5	140 ± 1
Прочность при растяжении, ГПа	4,0	2,5	3,7-4,0
Модуль упругости, ГПа	430	330	400-430
Плотность ,г/см ³	3,0	2,8	2,9-3,0
Состав	SiC на C керне	SiC на W керне	SiC на C керне
Производительность	200 кг/сутки	-	-



Спасибо за внимание!

АО «Композит», г. Королев, ул. Пионерская, 4

e-mail: info@kompozit-mv.ru

Логачёва А.И. д-р. техн. наук, Начальник отделения ММиМТ АО «Композит»

Тимофеев А.Н., д-р. техн. наук, Заместитель генерального директора по научной работе АО «Композит»

Туричин Г.А., д-р. техн. наук, Ректор СПбГМУ

г. Санкт-Петербург, 2023