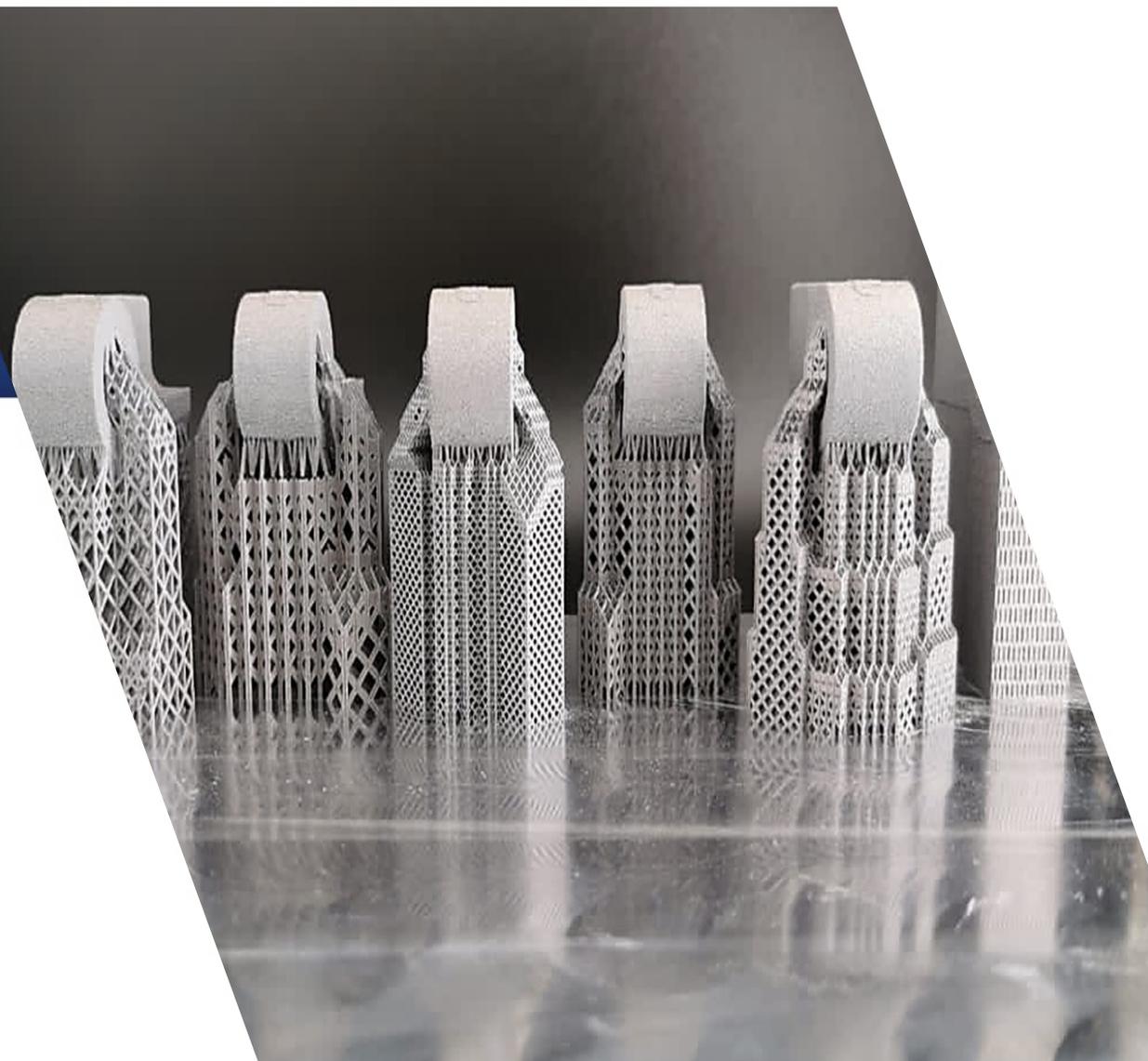


A close-up photograph of water ripples on a blue surface, located in the top left quadrant of the slide. The water is a deep blue color, and the ripples create a textured, shimmering effect.

МАТЕРИАЛЫ И ИНЖИНИРИНГОВЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ



В 2017 году РУСАЛ основал новый R&D центр – Институт Легких Материалов и Технологий (ИЛМиТ)

Стратегические цели

- Создание новой продукции с высокой добавленной стоимостью, разработка технологий и их внедрение (сплавы, композиционные материалы, керамические и армирующие материалы)
- Научная и технологическая поддержка производства и поиск новых применений производимой продукции
- Формирование научно-производственного кластера потребителей и разработчиков для расширения сфер потребления алюминия

Коллектив ИЛМиТ

Из 42 сотрудников 15 имеют степень кандидатов наук



Расположение: Москва, Ленинский проспект 6 стр. 21

Компетенции ИЛМиТ

Департамент литейных сплавов

- Новые сплавы
- Литейные технологии
- Комбинированные технологии производства

Департамент аддитивных технологий

- Материалы для 3D-печати
- Технологии изготовления деталей
- Производство порошков

Департамент деформируемых сплавов и композиционных материалов

- Металлы и композиционные материалы
- Extrusion, drawing, rolling, forging processes

Департамент химических технологий, легирующих и армирующих добавок

Новые неметаллические продукты

Легирующие и армирующие материалы

Технологии получения фторидов и редкоземельных материалов

В работе **12** R&D проектов

Более **20** партнеров – университетов и компаний в РФ и за рубежом

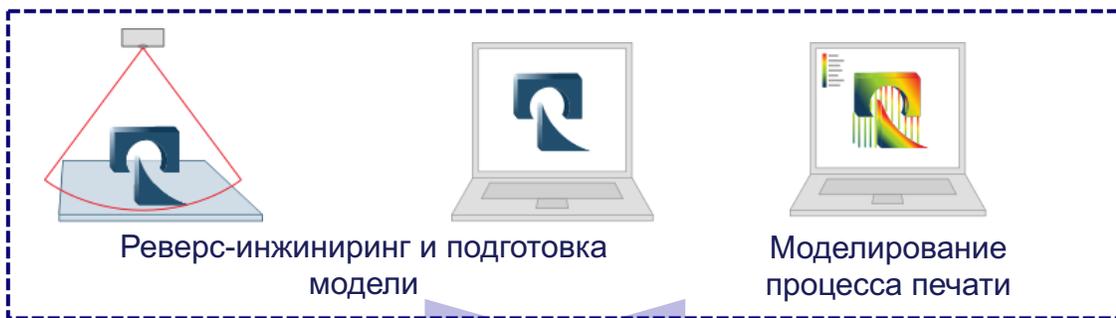
В разработке более **20** новых типов продукции



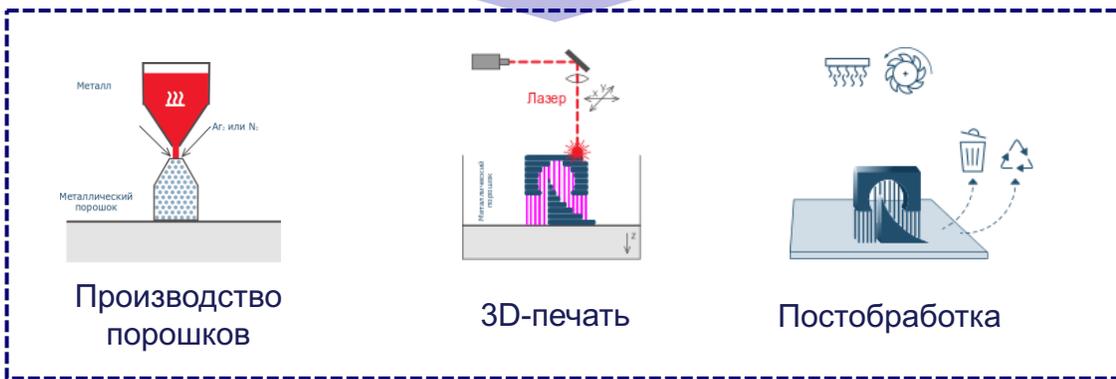
АДДИТИВНЫЙ ЦЕНТР РУСАЛ

Полный цикл создания конечных изделий

Инжиниринг



Разработка материала



Атомайзер BluePower AU12000



EOS M290



Kreon Ace Skyline

Участок литья и термической обработки

Участок механической обработки

Лаборатория моделирования производственных процессов

Лаборатория исследования физических свойств

Лаборатория исследования механических свойств материалов

Лаборатория коррозионных исследований

Лаборатория металлографического и химического анализа



Металлография



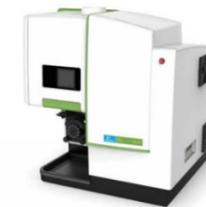
Физические свойства



Механические свойства



Химический анализ



ЛИНЕЙКА СПЛАВОВ ДЛЯ АТ

Порошки для аддитивных технологий производятся компанией РУСАЛ в соответствии с ТУ 24.42.00-002-44669951-2019. ТУ обеспечивают параметры качества порошков, предъявляемые разными производителями аддитивного оборудования.

Базовые сплавы

AlSi10Mg (RS-300)

$\sigma_B > 350$ МПа
 $\sigma_{0,2} > 215$ МПа
 $\delta_5 = 8,5$ %

AlSi7Mg (RS-356)

$\sigma_B > 300$ МПа
 $\sigma_{0,2} > 190$ МПа
 $\delta_5 = 10,0$ %

Характеристики порошка

SPAN	≤ 1,2
Текучность (Ø2,5 мм), с**	87 ± 4
Текучность (Ø4,0 мм), с**	25 ± 3
Влажность, не более, %	0,04
Содержание O ₂ , % масс.	≤ 0,1
Содержание H ₂ , % масс.	≤ 0,3

***Гранулометрический состав** порошка может быть скорректирован по согласованию с потребителем.

****Текучность порошка** может отличаться в зависимости от гранулометрического состава.

Новые сплавы

Материалы с повышенной прочностью ($\sigma_B > 400$ МПа)

PC-320 (Al-Si) – прочность 400 МПа

PC-507 (Al-Mg) – прочность 430 МПа

PC-553 (Al-Mg-Sc) – прочность 475 МПа

Материалы с повышенной рабочей T (175°C...300°C)

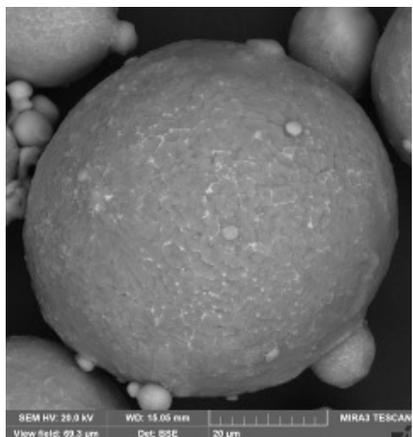
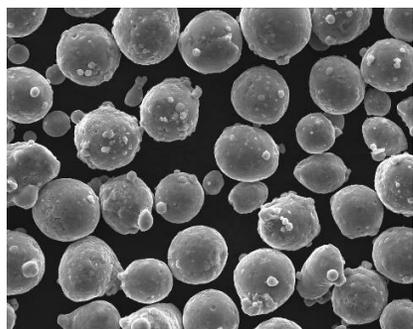
PC-230 (Al-Cu) – прочность 490 МПа

PC-390 (Al-Si) – рабочая T ~220°C

PC-970 (Al-PM) - рабочая T > 220°C

Материалы с особыми физическими свойствами

PC-333 (Al-Mg-Si) – теплопроводность 190



СПЛАВ РС-320 С ПОВЫШЕННОЙ ПРОЧНОСТЬЮ

RS-320 – Сплав системы Al-Si-Cu с высокой технологичностью при СЛС. Сплав может применяться после отжига и после Т6. Термическая обработка способствует повышению относительного удлинения и снятию остаточных напряжений. Т6 обеспечивает лучшие показатели усталости при незначительном снижении прочности. RS-320 может применяться в качестве замены литейных и некоторых деформируемых среднепрочных сплавов

Механическая свойства

Механические свойства	РС-320		AlSi10Mg	A360-F*
	Отжиг	T6	Отжиг	(литье) Отжиг
E, ГПа	71	71	68	71
σ_B , МПа	430	370	370	317
$\sigma_{0,2}$, МПа	240	300	220	165
δ_5 , %	4,0	6,1	7,5	3,5
НV	124	124	120	75
МЦУ, N _{ср} , 10 ³ цикл. (σ_{max} =157 МПа, K _t = 2,6)	7,9	19,8	5,3	-
МнЦУ, МПа (K _t = 1, N = 2·10 ⁷)	130	190	110	124

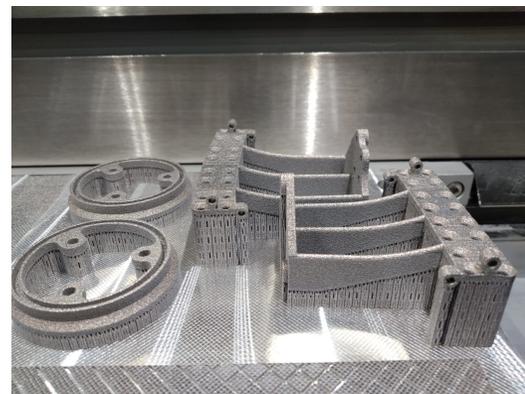
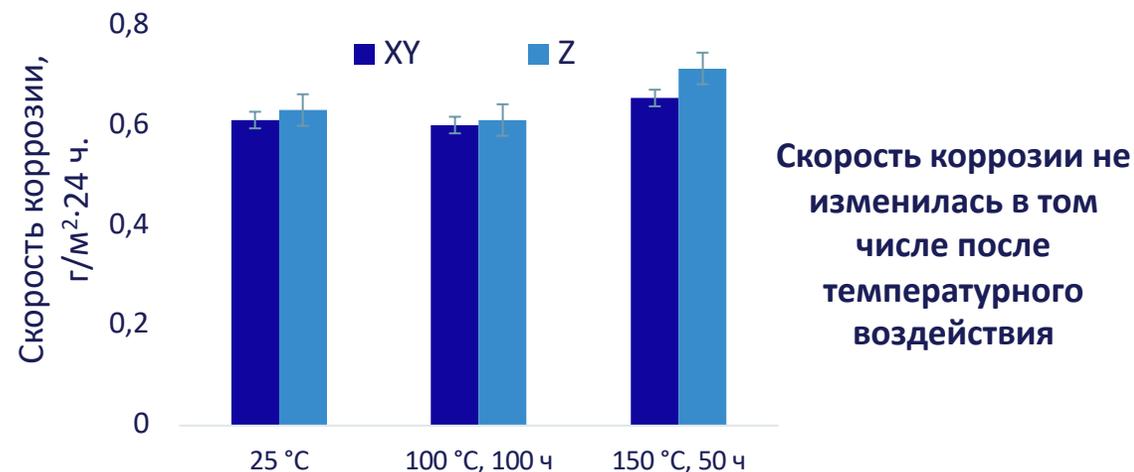
Другие свойства

Модуль Юнга при сжатии, ГПа	71,7
Предел текучести при сжатии, МПа	320
Предел прочности при срезе, МПа	215
Ударная вязкость КСТ, Дж/см ²	1,5

Физические свойства

Плотность, г/см ³	2,66
Пористость, %	≤ 0,50
КТЛР, 1/К · 10 ⁻⁶	21,5
Теплопроводность, Вт/м·К	155,0
Теплоемкость, Дж/кг · К	875
Электросопротивление, Ом · мм ² /м	0,054

Испытания на склонность к общей коррозии



Примеры изделий: компоненты экзопротеза из РС-320

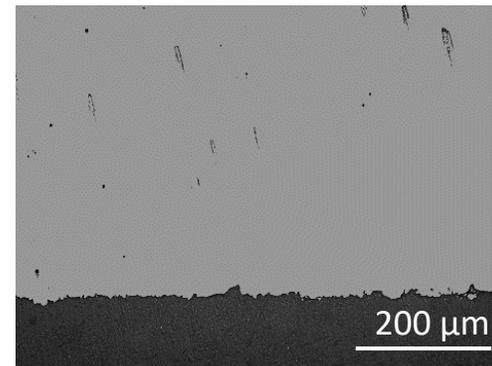
ЭКОНОМНОЛЕГОВАННЫЙ СПЛАВ PC-553

PC-553 коррозионноустойчивый высокопрочный сплав системы Al-Mg-Sc. Высокий уровень эксплуатационных характеристик достигается за счет отжига, без проведения закалки. Комплексное легирование Sc и переходными металлами позволяет достичь оптимального уровня характеристик при конкурентной стоимости по сравнению с традиционными Sc-содержащими сплавами

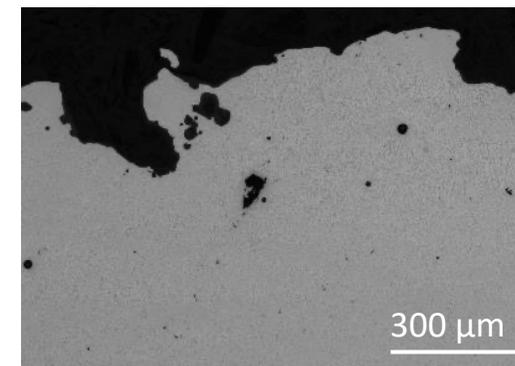
Механическая свойства

Свойства после отжига		PC - 553	2024-T3*
E, ГПа	XY	72	73
	Z		
σ_B , МПа	XY	495	440
	Z	490	
$\sigma_{0,2}$, МПа	XY	450	290
	Z	440	
δ_5 , %	XY	19,5	10,0
	Z	14,7	
МнЦУ ($K_t = 1$), МПа	XY	180	138
	Z	150 ($N = 2 \cdot 10^7$)	
Длительная прочность, МПа 100 °C, 500 h. - σ_{100}^{500} 150 °C, 100 h. - σ_{150}^{100}	Z	204 113	-

Сравнительные испытания на склонность к МКК



PC-553: коррозия отсутствует



AlSi10Mg: максимальная глубина коррозии - 300 мкм

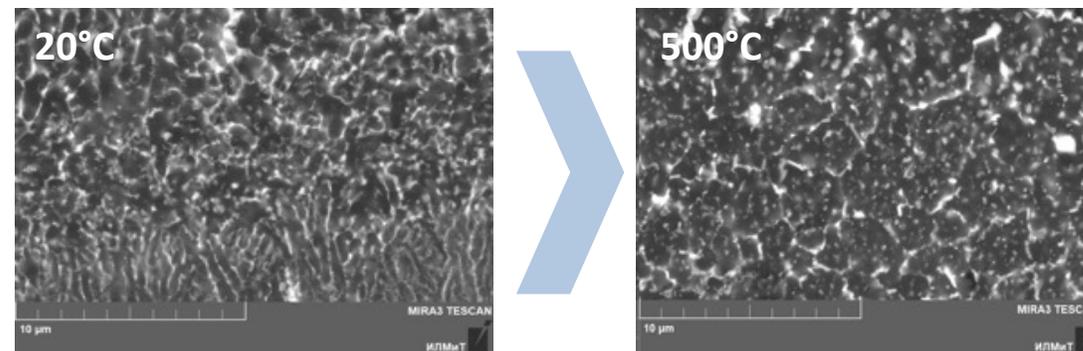
Сравнительные испытания на склонность к общей коррозии (24 часа в р-ре 1Н NaCl + 0,3 % H₂O₂)

Сплав	PC-553	7075-T1	Al5MgMn-O*	AlSi10Mg
Скорость коррозии, г/см ² ·24 ч.	0,26	30,6	0,43	0,67

ЖАРОПРОЧНЫЙ СПЛАВ РС-390

РС-390 - сплав системы Al-Si-Ni с высокой производительностью при СЛС, характеризующийся удовлетворительной прочностью в условиях повышенных температур. Сплав может применяться как после отжига, так и после Т6 в изделиях различного назначения (автомобилестроение, аэрокосмическая промышленность и т.д.), работающих при температуре до 250 °С

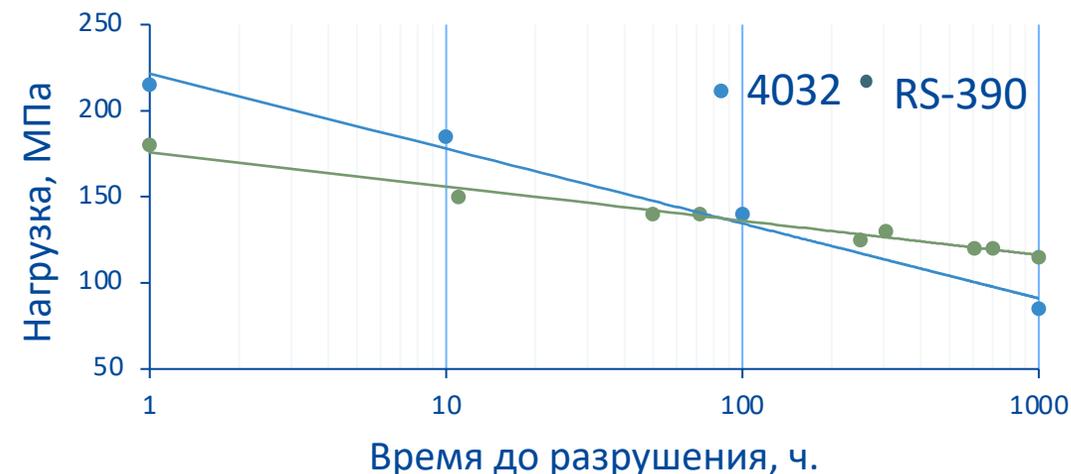
Свойства	РС-390		4032-Т6*	А390-Т5* (литье)
	Отжиг	Т6		
Свойства при T_k				
σ_B , МПа	360	360	380	295
$\sigma_{0,2}$, МПа	200	265	317	260
δ_5 , %	4	2,0	9,0	1,0
Свойства при 250 °С				
σ_B^{250} , МПа	160	170	78	90
$\sigma_{0,2}^{250}$, МПа	145	115	40	-



Структура стабильна даже при температурах нагрева под закалку за счет комплексного легирования ПМ

Физические свойства

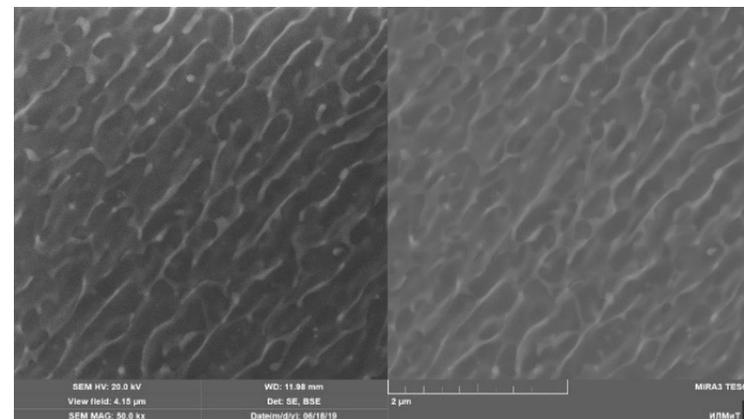
- Пористость не более **0,3 об. %**
- Плотность – **2,820 г/см³**
- ТКЛР (20 – 100°С) – **19,5 x 10⁻⁶ 1/К**
- Модуль упругости E - **76 ГПа**



ЖАРОПРОЧНЫЙ СПЛАВ РС-970

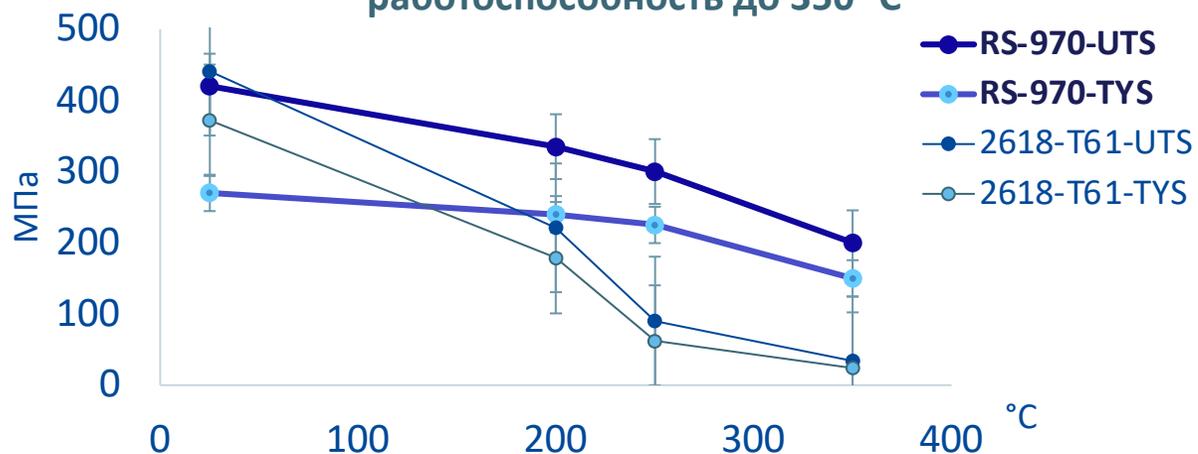
РС-970 – новый среднепрочный сплав на основе алюминия, стабилизированный переходными металлами, для работы в условиях повышенных температур. Сплав демонстрирует высокую производительность при СЛС и удовлетворительный уровень свойств в синтезированном состоянии и после отжига

Типичные механические свойства			
Сплав	RS-970 Отжиг	2219-T851* плита	2618-T61* штамповка
σ_B , МПа	420	400	430
$\sigma_{0,2}$, МПа	270	290	380
δ_5 , %	6,0	6,0	7,2



Изображение структуры сплава RS-970 в синтезированном состоянии (СЭМ)

Стабильность структуры материала обеспечивает работоспособность до 350 °С



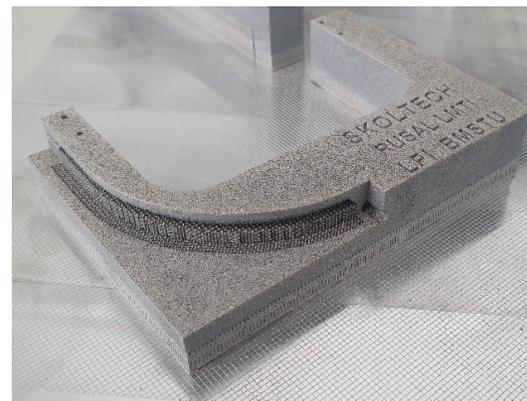
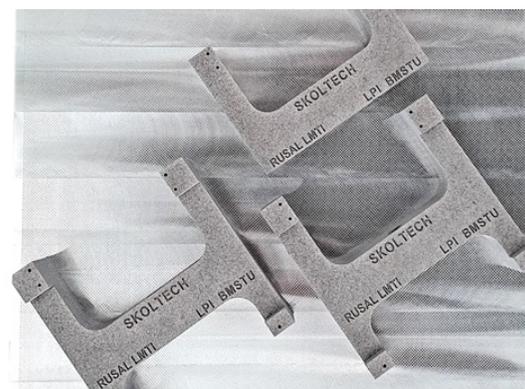
Физические свойства	
Плотность, г/см ³	2,9
Пористость, об. %	≤ 0,20

СПЛАВ РС-333 С ПОВЫШЕННОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬЮ

РС-333 – среднепрочный алюминиевый сплав системы Al-Si-Mg с высокой теплопроводностью для изготовления элементов теплообменных агрегатов. Готовые детали должны быть подвергнуты искусственному старению без промежуточной операции закалки. Уровень теплофизических свойств достигается при низкотемпературном старении без использования операции закалки. По уровню механических и тепло-физических свойств является альтернативой деформируемым сплавам систем 6061 (АД33) и 6063 (АД31).

Характеристики порошка		Физические свойства	
Кислород (O ₂), %	≤ 0,050	Плотность, г/см ³	2,656
Влага (H ₂ O), %	≤ 0,03	Пористость, об. %	≤ 0,35
Форма	Сферическая		

Типичные свойства (средние значения)			
		Синтез	Отжиг
Предел текучести σ _{0,2} , МПа	XY	160	235
	Z	170	240
Предел прочности σ _B , МПа	XY	300	315
	Z	310	320
Относительное удлинение δ ₅ , %	XY	21,0	16,0
	Z	20,0	17,0
Твердость, HV		85	95
Теплопроводность (λ), Вт/м·К		170	188



**Терморегулирующий корпус
детектора гамма-излучения
спутника «Ярило»**

Деталь оптимизирована под
изготовление методом 3D-
печати

↓
Снижение веса ~ 25%
Увеличение теплоотода ~20%

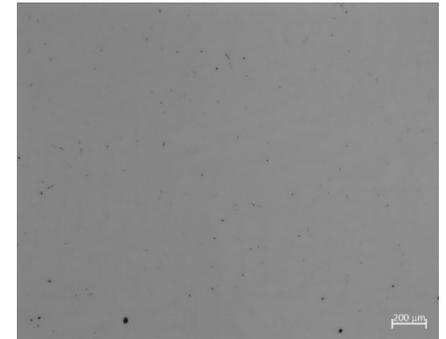
↓
Деталь была включена с
состав спутника, который
отправлен на орбиту Земли в
2020г.

PC-300 (AlSi10Mg) и PC-356 (AlSi7Mg). ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА СЛС

Оптимизация процесса СЛС является ключевым фактором снижения стоимости изделий. Однако, неоптимальное сочетание параметров СЛС может приводить к росту пористости и потере технологичности материала. В связи с этим, проведен ряд работ по разработке высокоскоростных режимов печати материалов **AlSi10Mg (RS-300)** и **AlSi7Mg (RS-356)**, обеспечивающих минимальное количество дефектов и сохранение уровня механических свойств.

Типичные механические свойства после отжига					
Материал/толщина слоя/ скорость печати		AlSi10Mg			AlSi7Mg
		30 мкм/18,4 см ³ /ч	60 мкм/41 см ³ /ч	80 мкм/60,5 см ³ /ч	60 мкм/40,2 см ³ /ч*
Предел прочности σ_B , МПа	XУ	340	350	320	300
	Z	350	350	320	310
Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	XУ	220	220	210	190
	Z	225	220	210	175
Относительное удлинение δ_5 , %	XУ	12,0	10,0	7,0	14,0
	Z	9,0	7,0	4,0	8,0

* В качестве сравнения: полученные характеристики производительности в 2 раза превышают показатели материала AlF357 (EOS), скорость печати которого составляет 20,8 см³/ч**. Свойства AlF357 после отжига не представлены

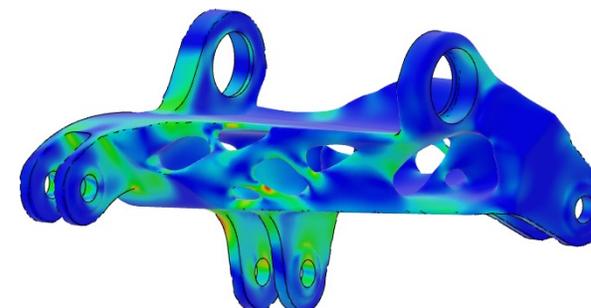
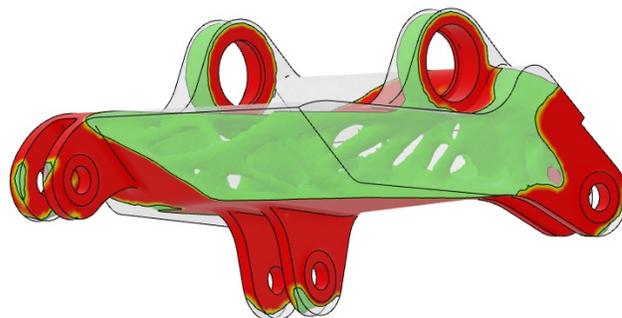
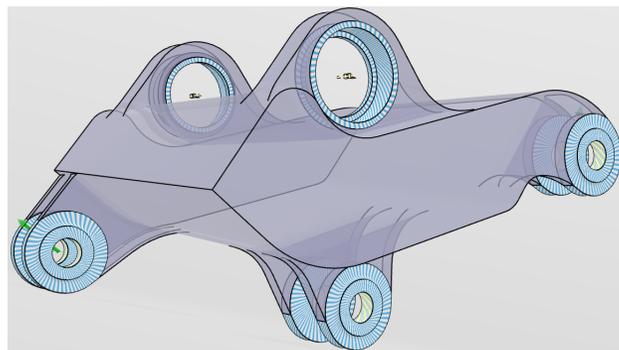


AlSi10Mg, 80 мкм,
пористость 0,1 %



AlSi10Mg, 80 мкм,
пористость 0,1 %

ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ДЕТАЛИ В ИЛМИТ



Параметры оптимизации		
	До	После
Масса, кг	0,641	0,544*
Сплав	AK7	RS-320
Плотность, г/см ³	2,7	2,7
Технология производства	Литье	3D-печать

***Минимальный коэффициент запаса при наихудшем случае нагружения составляет 1,68. Выигрыш в массе 15%**



Современные подходы к проектированию и высокотехнологичные сплавы, разработанные в ИЛМиТ, позволяют создавать детали, отвечающие современным требованиям прочности, надежности и эффективности

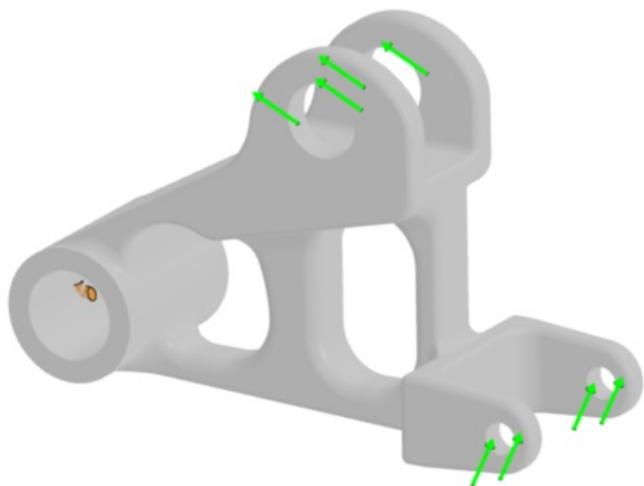
ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ДЕТАЛЕЙ В ИЛМИТ

Деталь для оптимизации: кронштейн авиационной техники

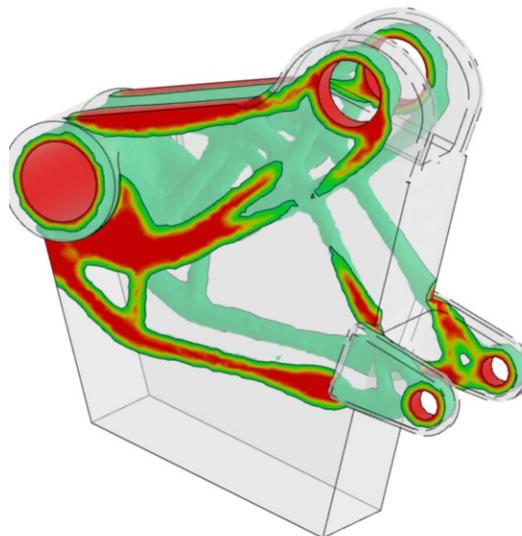
Цель оптимизации: снижение массы при условии минимизации податливости

Параметры оптимизации		
	До	После
Масса, кг	3,15	1,58
Сплав	AK9	RS-300
Плотность, г/см ³	2,7	2,7
Технология производства	Литье	3D-печать

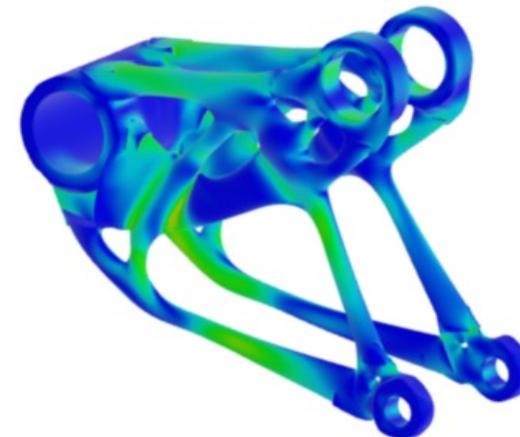
*Минимальный коэффициент запаса при наихудшем случае нагружения составляет 1,73. Выигрыш в массе 51%



Исходная деталь с нагрузками и ГУ



Распределение условных плотностей



НДС оптимизированной детали

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЕЧАТИ В ИЛМИТ

Деталь «Крыльчатка вентилятора»



Стандартная технология

АМг6

Материал

3 мес.

Цикл изготовления

60 шт.

Количество сварных соединений

9 кг

Расход материала на 1 деталь

3D печать

Материал

АК7ч

Цикл изготовления

60,5 ч.

Количество сварных соединений

0 шт.

Расход порошка на 1 деталь

1,8 кг

ALLOW

aluminium crafted by hydro power



По всем вопросам:

Даубарайте Дарья, Руководитель проекта Департамента аддитивных технологий ИЛМиТ

Dariya.Daubarayte@rusal.com

+7 (977) 816-99-15

+7 (495) 720 51 70 доб. 1227