

Материалы АО «ПОЛЕМА» для промышленного применения в аддитивном производстве

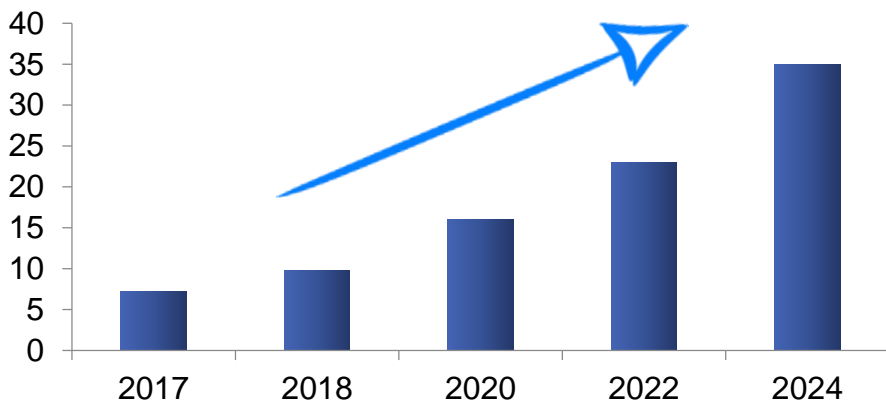
Докладчик: начальник отдела исследований
и развития АО «ПОЛЕМА»
Кубанова Анастасия Николаевна



Общие тенденции

- Рост потребления металлических порошков на **41%**.
- Увеличение продаж промышленных систем 3D печати (стоимость > 5000 \$)
- Значительный спад в продажах небольших 3D печатных установок для прототипирования (стоимость < 5000 \$)
- Рост количества производителей 3D печатных машин с **135** до **177** за 2018 г.
- По данным опроса из **1000** мировых промышленных компаний более **40%** уже применяют 3D печать для изготовления продукции в 2018 году.

Прогноз роста объема рынка аддитивного производства до 2024 года, \$ млрд



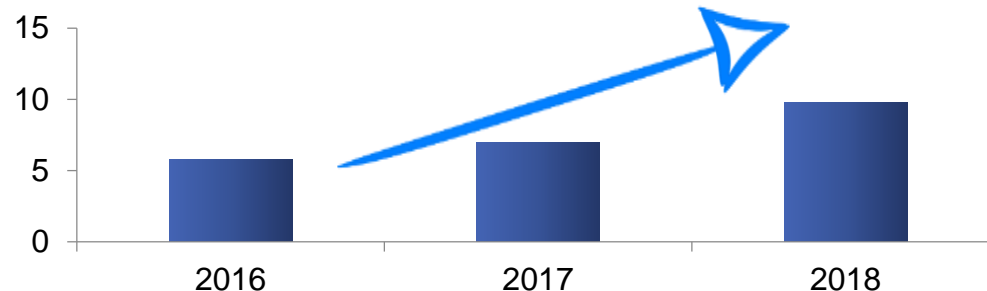
* Данные на 2020 – 2024 год являются оценочными

Источник: Wohler's report 2019

Объем рынка

- **\$ 9,8 млрд** (стоимость изделий и услуг по печати)
- **Рост** отрасли составил **62%** за 2017-2018 гг.
- Около **\$ 1,3 млрд** вложено в **107** новых проектов, связанных с аддитивным производством.

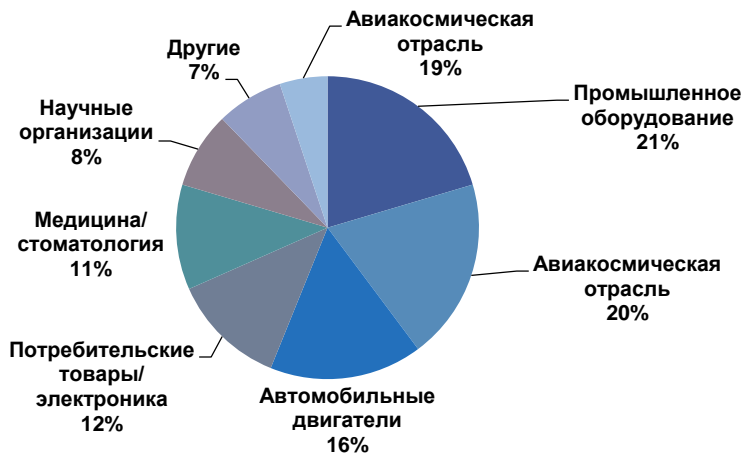
Рост рынка аддитивного производства за 2016 - 2018 гг., \$ млрд



Факторы роста аддитивного производства

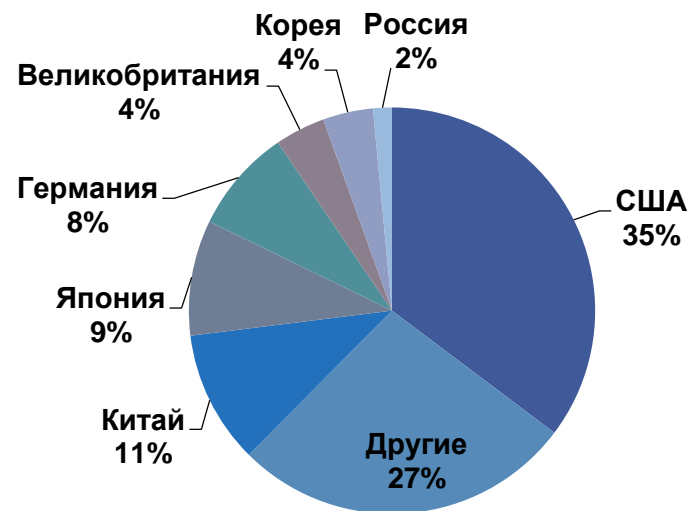
- Появление технологических инструкций.
- Освоение методов контроля качества.
- Качественное программное обеспечение для проектирования.
- Появление стандартов.

Сферы применения промышленных установок 3D печати



- Около **43%** изделий и услуг относится к производству **конечных изделий**.
- Около **50%** компаний, предоставляющих услуги по 3D-печати, предлагают **печать металлами**. В 2008 г. таких компаний было всего лишь 5%. (*Wohler's Report 2018*).
- Среди популярных металлических порошков для 3D печати: **Fe, Ti, Ni, CoCrMo** сплавы.

Распределение промышленных установок 3D печати по странам



По данным РОСАТОМА на 2017 г.

Принтеров в мире	100 000
Промышленные принтеры	14 000
Металлопорошковые	4 000
Темп роста	15%
Расход материалов	В 10 раз ниже
Снижение трудозатрат	В 3-8 раз

Общие тенденции

- Уверенный рост рынка 3D печати в России: увеличение в **10 раз** за **8 лет**.
- Объем рынка по состоянию на **2018 год** составил **4,5 млрд. рублей**
- На закупку оборудования, доп. оборудования и материалов приходится около **65%** объемов рынка.
- Отечественные принтеры составляют порядка **40%** продаж на российском рынке, при этом подавляющая часть производимого оборудования – для печати пластиком.

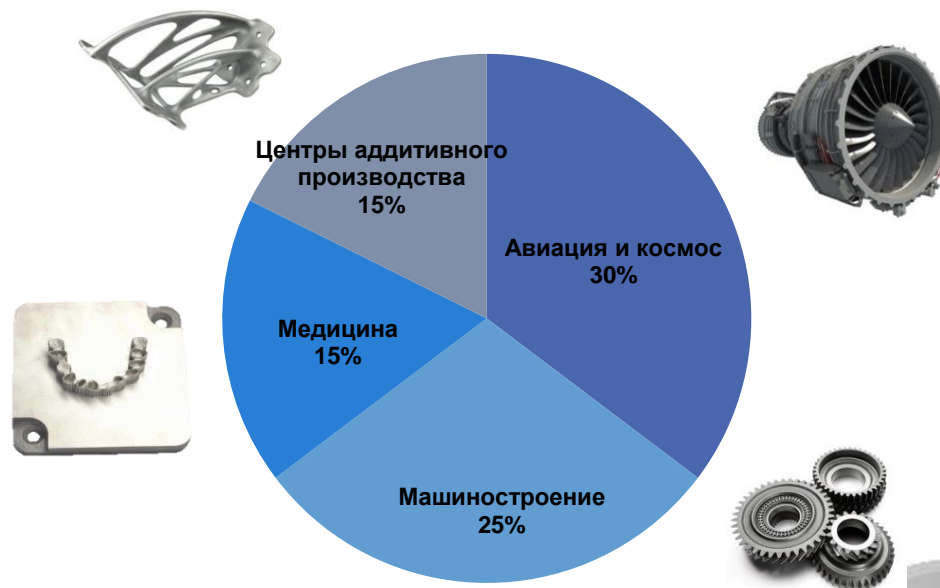
По состоянию на **2018 год** объем рынка аддитивного производства в Российской Федерации прогрессирует устойчивыми, быстрыми темпами, демонстрируя ежегодный рост около **20%** и на конец года составил **4,5 млрд. рублей***

Оборудование	2,6 млрд. руб.
Материалы	279 млн. руб.
Периферийное оборудование	280 млн. руб.
НИОКР	864 млн. руб.
Услуги	187 млн. руб.
3D ручки	289 млн. руб.

Предпосылки к развитию российского рынка технологий аддитивного производства

- Сохранен значительный научный потенциал.
- Разработаны отечественные 3D-принтеры промышленного класса.
- Производители металлических порошков существенно повысили качество.
- Понимание промышленными потребителями преимуществ 3D печати.
- Переход к производству конечных функциональных изделий.

Отраслевая структура российского рынка аддитивного производства



РОСТ ДОЛИ ОБОРУДОВАНИЯ РОССИЙСКОГО ПРОИЗВОДСТВА ДЛЯ 3Д-ПЕЧАТИ



Объем производства гражданского и промышленного отечественного оборудования в денежном выражении в Российской Федерации по сравнению с 2011 годом вырос в **23** раза и достиг отметки в **760,4 млн. рублей** в год, а импортозависимость за период 2011-2018 гг. снизилась с **96%** до **60%**.

Реализация за 2018 г.:

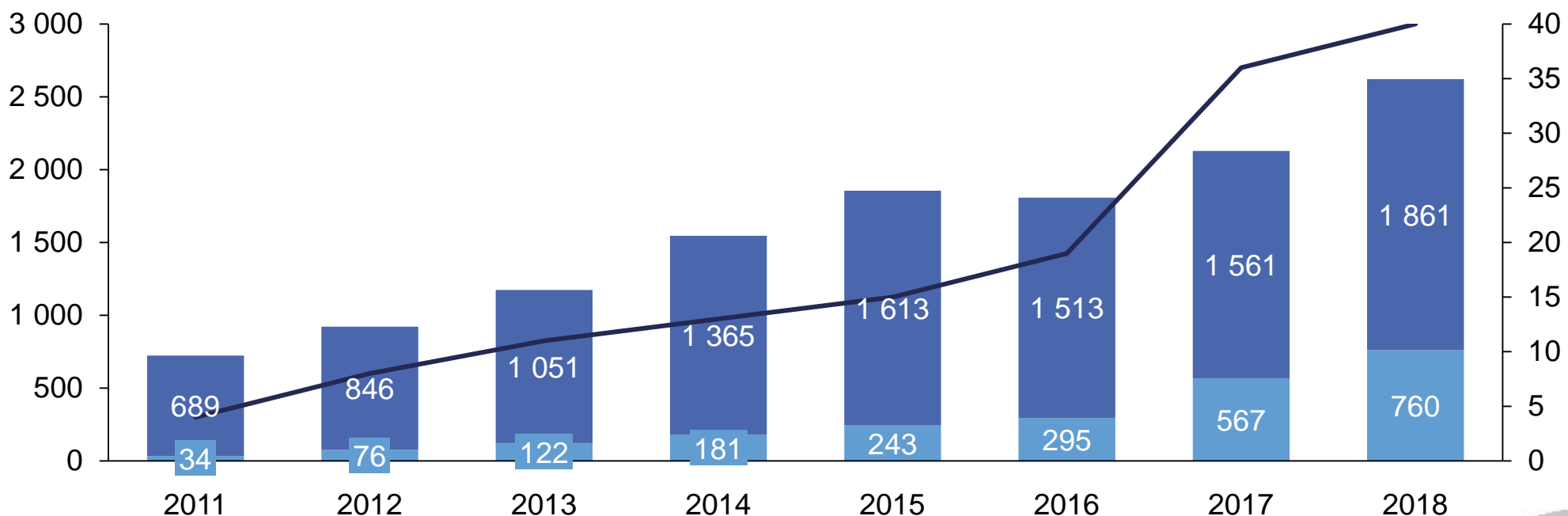
Промышленные:

Металлические принтеры **5 шт.**
Неметаллические принтеры **18 шт.**

Бытовые:

Настольные принтеры **2880 шт.**

Соотношение принтеров иностранного и российского производства в период 2011-2018 гг. (в рублях)



АО «ПОЛЕМА»

**О КОМПАНИИ И РЕАЛИЗУЕМЫХ
ПРОЕКТАХ**



История

- 1961 – 1991** Основание компании. Освоение производства электролитического рафинированного хрома, изделий из W и Mo. Запуск крупнейшего в России комплекса по производству металлических порошков мощностью 3000 тонн в год.
- 1992 – 2003** Налажен выпуск проката из W и Mo: листов, электродов, распыляемых мишеней.
- 2004 – 2013** Развитие предприятия в составе ПМХ. Открытие филиалов в Швейцарии, Южной Корее, Тайване.
- 2014 – 2018** Освоение производства порошков для 3D. Реализация проектов при поддержке ФРП: «Порошки для 3D, MIM, наплавки, напыления», «Материалы для станкостроения и высокотемпературных процессов». Открытие филиала в Китае.
- 2019 – 2025** Новые проекты. Запуск в производство высокотехнологичных материалов.

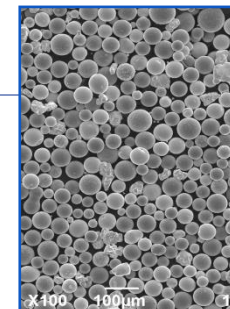
Лидерство



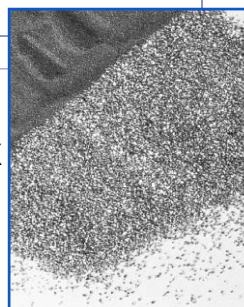
Крупнейший в мире производитель высокочистого хрома и изделий из него



Единственный в России производитель сферических порошков вольфрама и молибдена для 3D печати



Крупнейший в России производитель металлических порошков, в том числе для наплавки, напыления и аддитивных технологий



Единственный в России производитель молибденового проката полного цикла



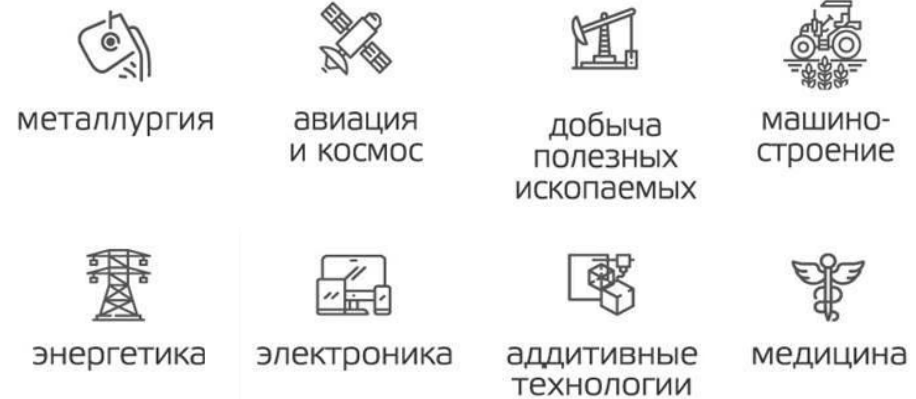
О КОМПАНИИ: ГЕОГРАФИЯ, СФЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ, ВИДЫ ПРОДУКЦИИ



География продаж



Сферы применения



Виды продукции

Чистота хрома 99,95 – 99,99%

ВИДЫ ПРОДУКЦИИ:
порошок, чешуйки,
пластины,
распыляемые мишени,
испаряемые катоды

Чистота вольфрама и молибдена – 99,95%

ВИДЫ ПРОДУКЦИИ:
листы, пластины, лодочки,
прутки, электроды



Более 250 видов металлических порошков на основе: Fe, Ni, Co, Cu, Zn, W, Ti, а также смеси и сплавы

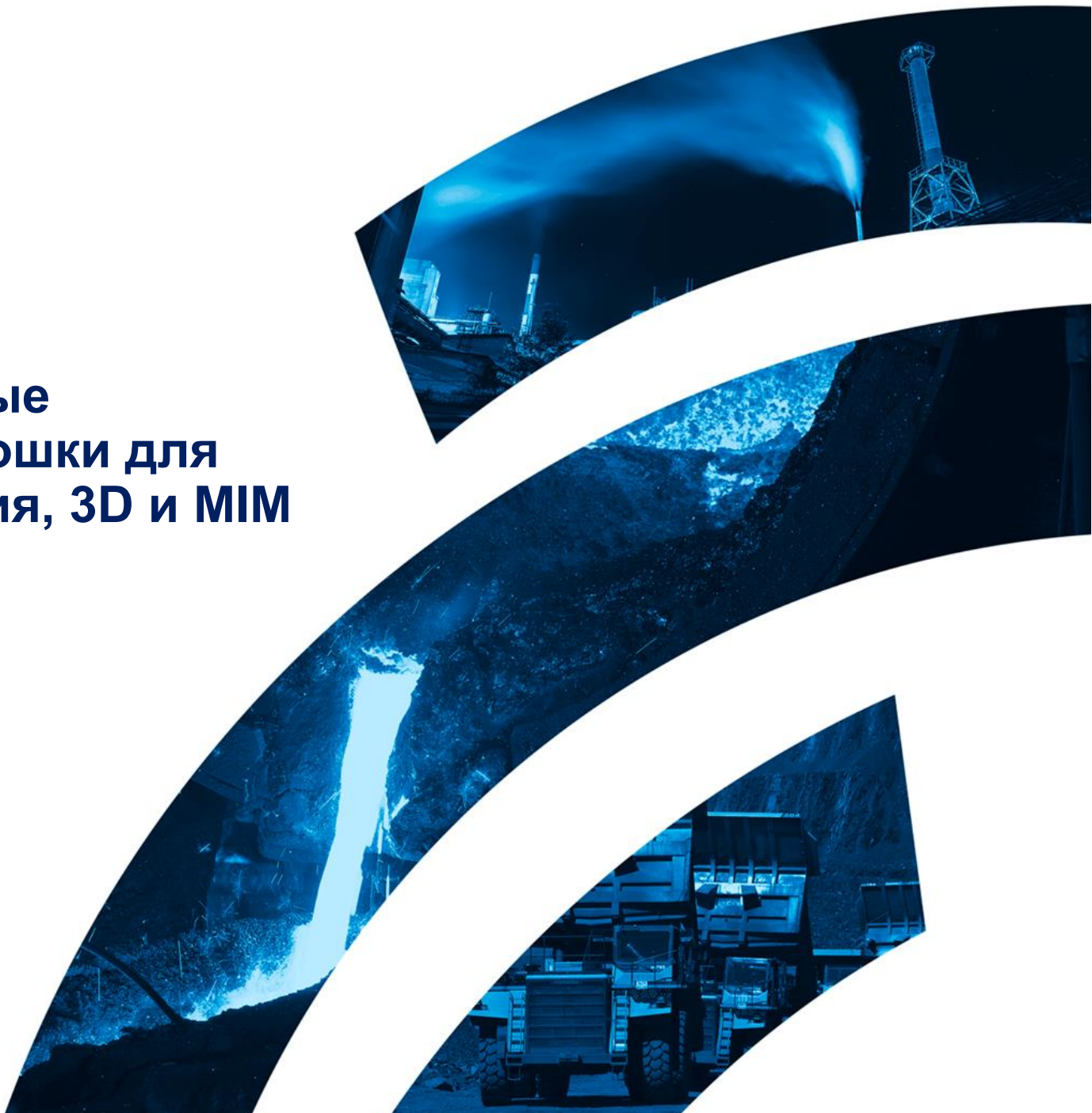
ВИДЫ ПРОДУКЦИИ:
порошки для компактирования,
наплавки и напыления, аддитивных технологий

Уникальные порошковые сплавы и композиции Al-Ti, Al-Ti-Si, Al-Cr, Cu-Cr, Cu-W

ВИДЫ ПРОДУКЦИИ:
заготовки, распыляемые мишени,
испаряемые катоды, электроконтакты

**ПРОЕКТ:
Высоколегированные
металлические порошки для
наплавки, напыления, 3D и MIM
технологий**

при поддержке



ПРИМЕНЕНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ ДЛЯ ПОКРЫТИЙ И АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ



Прочее

нанесение декоративных и защитных покрытий на пластик, дерево и т.д.



Сельхозтехника

восстановление деталей и нанесение защитных покрытий на с/х технику



Нефтегазодобыча

нанесение покрытий на запорно-регулирующие устройства, седла клапанов, роторы, валы, подшипники перекачивающих устройств



Горнодобывающая

восстановление деталей ГШО, бурового оборудования



Машиностроение

восстановление карданных валов, рулевых реек, ГБЦ



Металлургия

восстановление валов прокатных станов



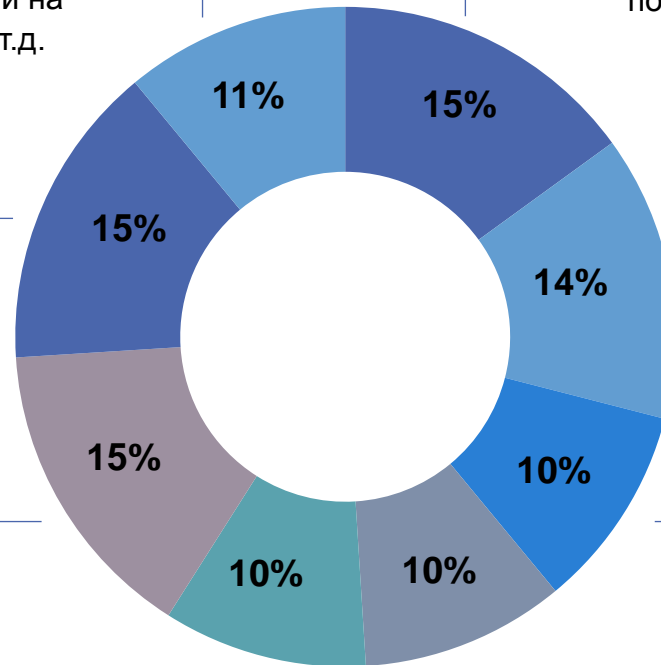
Ремонт прочего промышленного оборудования

восстановление валов бумажно-целлюлозных машин



Авиакосмическая

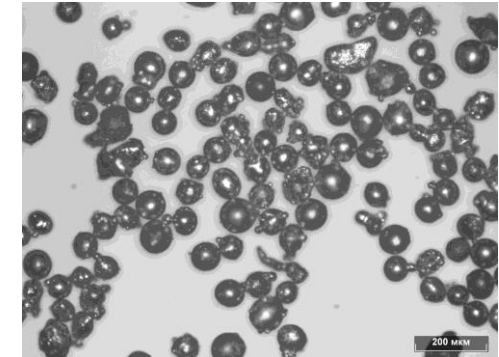
восстановление лопаток ГТД, нанесение покрытий из тугоплавких металлов



ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОРОШКОВ ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ ПР-03Х17Н14М3 (АНАЛОГ 316L) И ПР-08ХН53БМТЮ (АНАЛОГ INCONEL 718) ПРОИЗВОДСТВА АО «ПОЛЕМА»

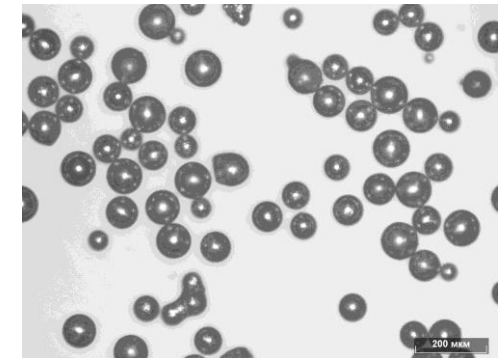


Результаты определения формы частиц ПР-03Х17Н14М3 (аналог 316L)				
Форма частиц	После распыления		После сфероидизации	
	%	Количество, шт.	%	Количество, шт.
Сферическая	50	87	93	164
Округлая	45	77	7	12
Угловатая	5	7	-	-



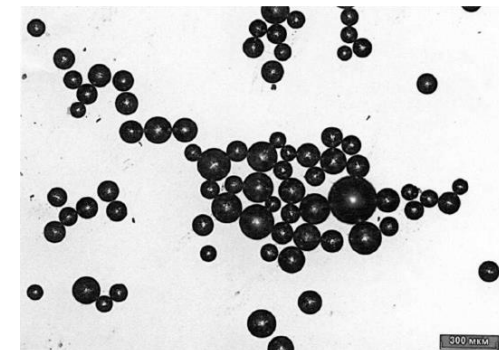
Внешний вид частиц аналога 316L после распыления x100

Результаты анализа аналога ПР-03Х17Н14М3 (аналог 316L)						
Н/пл, г/см3	Текучесть, с	Плотность после утряски, г/см3	Гранулометрический анализ, масс. %			
			100 мкм	80 мкм	56 мкм	поддон
После распыления						
4,37	16,2	-	0,1	80,7	15,6	3,6
После сфероидизации						
4,71	13,2	5,0	3,7	71,4	24,5	0,4



Внешний вид частиц аналога 316L после сфероидизации x100

Результаты определения формы частиц ПР-08ХН53БМТЮ (аналог Inconel 718)		
Форма частиц	%	Количество, шт
Сферическая	99	156
Округлая	1	2
Угловатая	0	0



Внешний вид частиц аналога Inconel 718 после сфероидизации x300

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА 3D-ОБРАЗЦОВ ИЗ ПОРОШКА НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ (АНАЛОГ 316L)



Испытание на растяжение плоских образцов из стали 07X18H12M2 (аналог 316L)

Направление 3D-печати образца	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа
Горизонтальное	622,9	771,35
Вертикальное	575,3	676,49



Справочно:
механические свойства
образцов из горячекатаной
и кованой стали марок
AISI 316, AISI 316L

Испытание на сжатие цилиндрических образцов из стали 07X18H12M2 (аналог 316L)

Направление 3D-печати образца	Модуль упругости, МПа	Предел прочности на сжатие, МПа
Горизонтальное	8070	3030
Вертикальное	7700	2977

Испытание на растяжение цилиндрических образцов из стали 07X18H12M2 (аналог 316L)

Направление 3D-печати образца	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа	Относительное растяжение, %
Горизонтальное	510	660	28,5
Вертикальное	560	670	25

Предел текучести, МПа

205 - 310

Предел прочности, МПа

500 - 700

Относительное растяжение, %

40 - 55

Показатель	Исходный порошок	После сфероидизации, промывки и сушки
РЭМ (растровый электронный микроскоп)		
Текущность, с	Mo – не течёт W – 25 сек (после сушки) Cr – 29,6	Mo – 10,4 с W – 7,3 с Cr – 16,3
Насыпная плотность, г/см ³	Mo – 3,96 W – 9,38 Cr – 3,12	Mo – 6,4 W – 9,9 Cr – 4,19

- Повышение текучести
- Повышение насыпной плотности
- Снижение содержания кислорода

Применение

Наплавка и напыление защитных покрытий, 3D печать

НОВЫЕ ЖАРОПРОЧНЫЕ СПЛАВЫ ПРОИЗВОДСТВА АО «ПОЛЕМА» ДЛЯ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА



Сталь **06X14H6Д2МБТ (ЭП817)** коррозионностойкая мартенситного класса.

Применение: производство сортового проката и штамповок, деталей и узлов техники специального назначения, нагруженных самолетных узлов (**рамы, лонжероны, узлы поворота и т.д.**), работающих при температурах от -70 до +300 °С в общеклиматических условиях в контакте с топливом. Хорошая свариваемость с АрДЭС, ЭЛС, не требует термообработки после сварки.

Результаты испытаний выращенных с применением технологии прямого лазерного выращивания образцов АО «НПК «КБМ» при совместной работе с ФГАОУ ВО «РУДН»

	Предел прочности, кгс/мм ²	Предел текучести, кгс/мм ²	Относительное удлинение, %
По ТУ АДИ 515-2002	85...105	≥70	≥12,5
По результату отработки	103	81	19,5
	101	85	16,5
	101	85	17,5
	105	90	15,5
	105	89	16,5



Конструкционные сплавы **ХН55В5МБТЮ** и **ХН45МВТЮБР**.

Применение: использование в качестве материала для изготовления лопаток турбин в т.ч. и в авиации с рабочей температурой выше 700С.

Марка	Аналоги	Массовая доля элементов, %							Дополнительные легирующие элементы	O, ppm
		Fe	Cr	Ni	W	Mo	Ti			
ПР-ХН45МВТЮБР	ЭП718	ост.	14,00-16,00	43,00-47,00	2,50-3,50	4,00-5,20	1,90-2,40	+	<300	
ПР-ХН55В5МБТЮ	ЭП648	<4	32,00-35,00	основа	4,30-5,30	2,30-3,30	0,50-1,10	+	<300	

✓ Порошок CompoNiAl-M5-3 производства АО «ПОЛЕМА»

Результат: получен порошок для аддитивных технологий с высокими механическими характеристиками.

Применение: 3D-печать лопаток турбинных двигателей, производство деталей реактивных двигателей и прочих узлов в авиакосмической отрасли.



✓ Сплавы высокой энтропии производства АО «ПОЛЕМА»

Результат: получен порошок для покрытий и аддитивных технологий, способный сохранять прочность и гибкость при критических для стандартных конструкционных материалов температурах.

Применение: 3D печать деталей, жаростойкие и жаропрочные покрытия; магнитомягкие пленки для высокочастотной связи; диффузионный барьер для соединений меди в сверхбольших интегральных схемах; сверхпластичные сплавы.



✓ Суперинварные сплавы производства АО «ПОЛЕМА»

Результат: получен сплав с низким коэффициентом термического линейного расширения.

Применение: компоненты оборудования и узлы, работающие при экстремальных температурах, в том числе изготовленные с использованием аддитивных технологий.

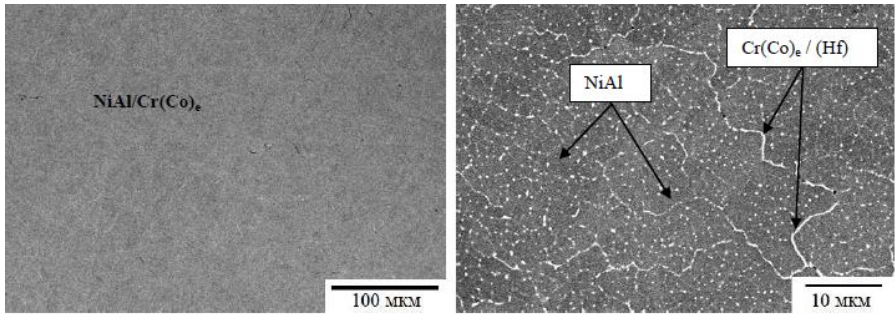


✓ Сплавы Super Duplex 25Cr

Результат: создание порошковой высокопрочной коррозионностойкой супердуплексной стали феррито-аустенитного класса для изготовления деталей со сложной геометрией при эксплуатации в условиях коррозионной среды с повышенными нагрузками и пониженными температурными параметрами.

Применение: изделия сложной и нестандартной формы, используемые в нефтегазовой промышленности, судостроении, морском строительстве, химической и пищевой отрасли.



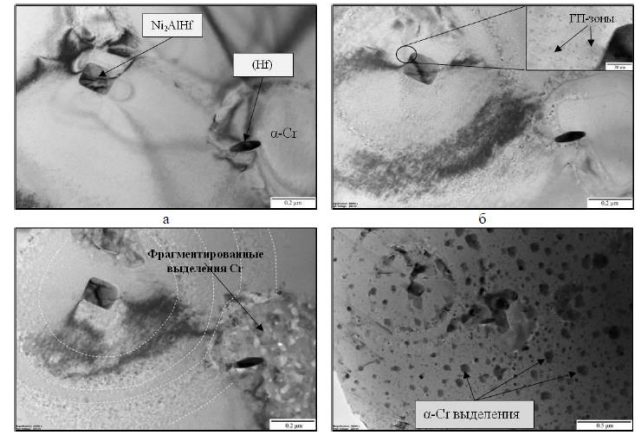


Микроструктура исследовательских образцов полученных методом СЛП

Механические свойства образцов, полученных методом СЛП

Сплав	σ_B , МПа	$\sigma_{0.2}$, МПа	ϵ , %
CoMoNiAl-M5-3 (+ТО)	1081	-	1,4
CoMoNiAl-M5-3 (+ТО+ГИП)	1386	-	2,4
33Ni-29Al-28Cr-6Mo-4Ti (+ТО)	634	-	0,85

- печать в защитной среде,
- ТО в виде отжига для снятия напряжений,
- подогрев платформы при печати.



Структурные превращения в компактном сплаве, полученном по технологии ГИП из микропорошка CoMoNiAl-M5-3, при температурах: 25 (а), 450 (б), 650 (в), 850 °C (г)

Сплав	σ_B , МПа	$\sigma_{0.2}$, МПа	ϵ , %
CoMoNiAl-M5-3	2573	1212	19,9
33Ni-29Al-28Cr-6Mo-4Ti	2255	1631	11,3
аналог Inconel 718 (производство РФ)	1669	965	22,4
Inconel 718 (производство Европа)	1701	971	23,3

Сплав получен при совместной работе АО «ПОЛЕМА» с:

НИТУ «МИСиС»
ИМЕТ РАН

Федеральные целевые программы России

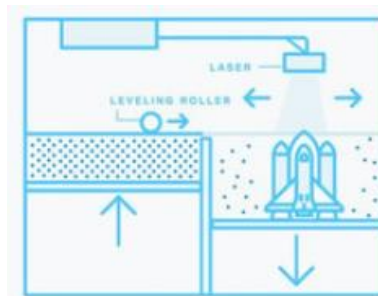


Значения механических характеристик образцов при разных температурах

Сплав	T, °C	σ_B , МПа	$\sigma_{0.2}$, МПа	ϵ , %
ПР- КХ23Н26 (3D-печать)	-150	960	750	54
	23	690	600	38
	300	550	470	34
ПР-КХ23Н26 (3D-печать + отжиг)	-150	920	640	43
	23	660	500	42
	300	530	390	37

Skoltech

Сколковский институт науки и технологий

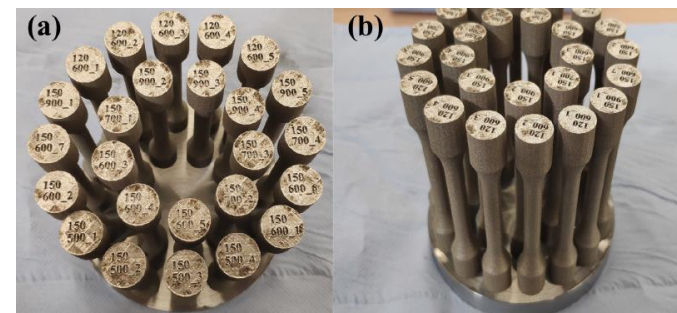


Технология PBF (Powder Bed Fusion – расплавление материала в заранее сформированном слое).



- ✓ Высокое удлинение при критических температурах.
- ✓ Высокая прочность при критических температурах.
- ✓ Не меняет химический состав при наплавке и 3D-печати.

Применение: защитное покрытие и 3D-печать



Фотографии образцов, которые использовались для проведения механических испытаний.

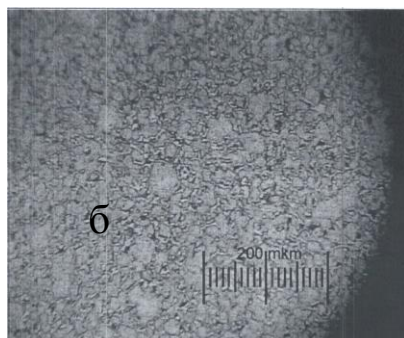
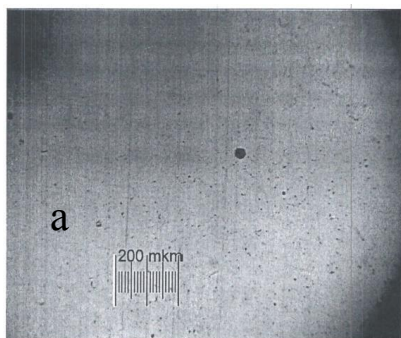
Сплав Super Duplex 25Cr

Результаты механических испытаний

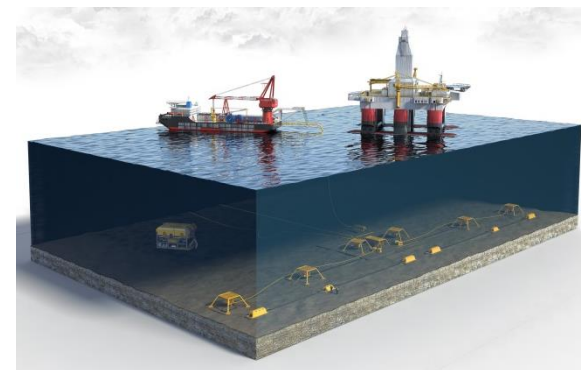
Материал	Временное сопротивление σ_B , МПа	Относительное удлинение, %
ПР-03Х25Н7АМ4Д (ГИП)	845	3,3
ПР-03Х25Н7АМ4Д (ГИП+отжиг)	860	32,5
Требуемые характеристики	750-895	Не менее 25

Результаты испытаний на стойкость к питтинговой коррозии ASTM G48 А

Материал	T, °C	ДхШхВ образца, мм	Потеря массы образца, мг/см ²	Примечание
ПР-03Х25Н7АМ4Д После ГИП+ТО	+50	50,3х25,2х3,3	0,08 - 0,20	Питтинги отсутствуют



Микроструктура образца стали ПР-03Х25Н7АМ4Д после ГИП:
 а – до травления,
 б – после травления



Суперинварный сплав

Особенность сплава – низкий Термический Коэффициент Линейного Расширения (ТКЛР)

ТКЛР равен $2,3-2,8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ в интервале температур при $T = 20-300^\circ\text{C}$

ТКЛР стали марки 12Х18Н10Т составляет порядка $22,0-23,0 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

Применение:

Измерительные приборы с высоким классом точности, термобиметаллы, криогенный трубопровод.

В настоящий момент проводятся работы по отработке технологий 3D печати данного сплава.

**Акционерное общество
«ПОЛЕМА»**

300016, г. Тула, Россия
ул. Пржевальского, д. 3

Тел.: +7 4872 25 06 68
Факс: +7 4872 25 06 78

www.metholding.ru

www.polema.net

