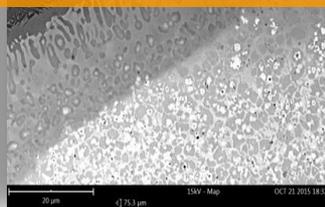


ПНИЭР «Создание технологии высокоскоростного изготовления деталей и компонентов авиационных двигателей методами гетерофазной порошковой металлургии» (Соглашение № 14.581.21.0010 от «01» декабря 2014 г.)

**ГЕТЕРОФАЗНАЯ ПОРОШКОВАЯ ЛАЗЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ
ПРЯМОЕ ЛАЗЕРНОЕ ВЫРАЩИВАНИЕ**



Индустриальный партнер



Соисполнители



Руководитель работ:
д-р. техн. наук, проф. Г.А. Туричин



АКТУАЛЬНОСТЬ

Преимущества внедрения аддитивных технологий

Проблемы развития машиностроительной отрасли:

- **Детали становятся сложнее;**
- Оборудование, инструмент, оснастка дороже;
- Требования к квалификации растут по экспоненте.
- Аналогично нарастает дефицит работников;
- Цикл изготовления увеличивается;
- Коэффициент использования материала падает к 0,05;
- **Себестоимость растёт**
- Полная автоматизация и «цифровизация» производства
- Увеличение производительности изготовления деталей сложной формы из труднообрабатываемых материалов
- Снижение материалоемкости производства
- Снижение себестоимости
- Расширение технологических и конструкторских возможностей

ПОТРЕБНОСТЬ РЫНКА

Экспертная оценка доли перевода на высокоскоростное прямое лазерное выращивание *данные ОДК	Ti	Al	Fe, Ni
Потребность в машинах, шт Авиа и космос, Судостроение, Энергетика, Химмаш, ТЭК, другое	350	1500	1750

СРАВНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ



Casting and welding

Нормы расхода: 2693,8 кг (5\$/кг)
Материал: сталь 10X18H9T
Номенклатура деталей в узле 33 шт.
Количество деталей в узле 113 шт.
Трудоёмкость изготовления 3320н/ч
КИМ 0,07
Себестоимость (оценочно) **24 млн. руб.**



Пилотная деталь -
Корпус опоры СТ
36.490.010
D 2000мм; H 450 мм

Casting

Нормы расхода: 1500 кг (5\$/кг)
Номенклатура деталей в узле 18 шт.
Количество деталей в узле 21 шт.
Трудоёмкость изготовления 1600 н/ч
КИМ 0,13
Себестоимость (оценочно) **11,6 млн. руб.**

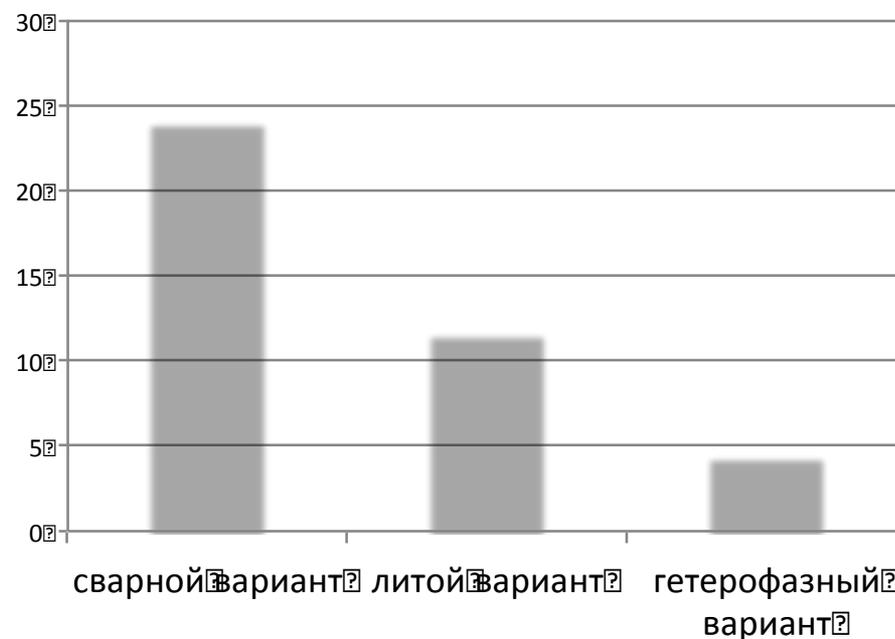
Selective laser melting (SLS)

Невозможно технологически

Direct laser deposition (HLPM)

Нормы расхода: (оценочно) 200 кг (300 \$/кг)
Номенклатура деталей в узле 1 шт.
Количество деталей в узле 1 шт.
Трудоёмкость изготовления (оценочно) 120 н/ч
КИМ (оценочно) 0,94
Себестоимость (оценочно) **4,4 млн. руб.**

Себестоимость млн.руб./шт.



Технология прямого лазерного выращивания:

Производительность - не менее 45 куб. мм/с.

Материалы – сплавы на основе железа, никеля, кобальта и др.

Максимальная температура эксплуатации выращенных изделий не менее 500 °С

Технологическая установка прямого лазерного выращивания:

Размер рабочей зоны - не менее 2000x2000x800;

Количество координат - не менее 5;

Контролируемая рабочая атмосфера.

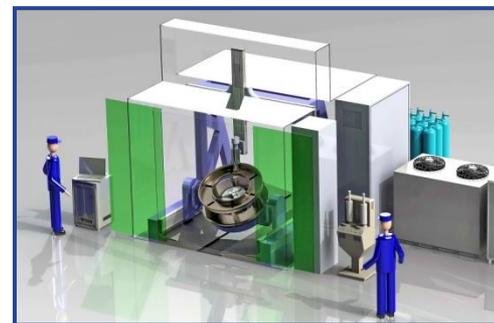
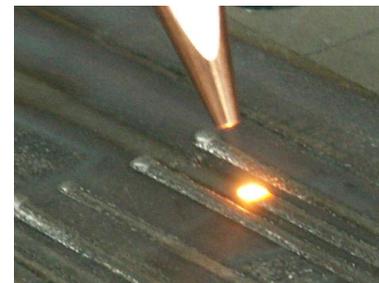
Конкурентные преимущества разработки

Размер рабочей зоны увеличен в 1.5 раза

Возможность масштабирования установки под задачи Заказчика

Управляемое оплавление порошка и реализация принципов гетерофазной порошковой металлургии

Контроль и адаптивное управление

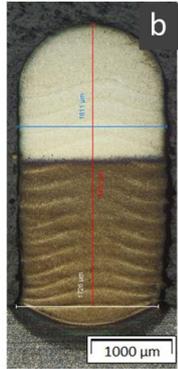


аналог



Суть гетерофазной порошковой лазерной металлургии

DMD, DED, LENS

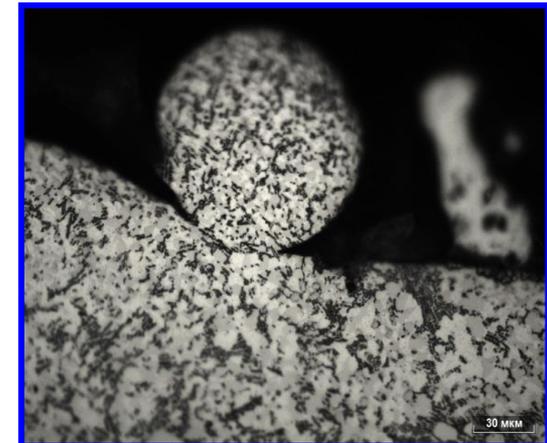
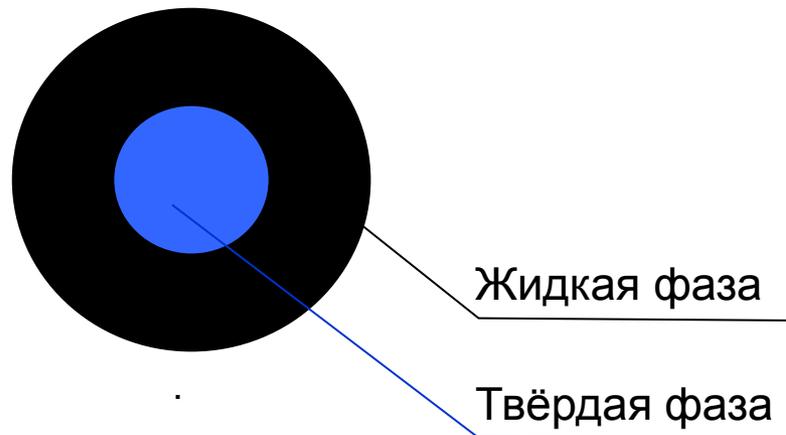
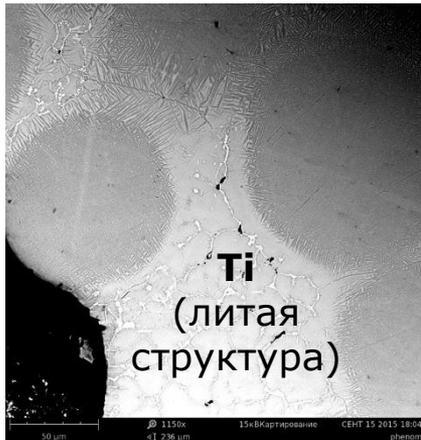


HLPM



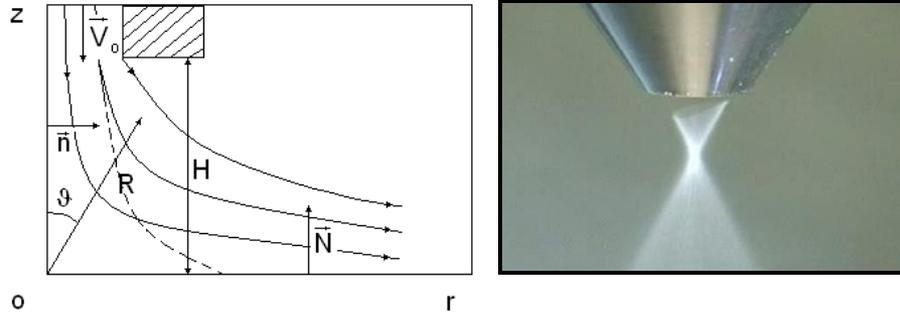
- Некоаксиальная (непараллельная) подача со сканированием – производительность изготовления высокоточных заготовок деталей до 18 кг/ч (при толщине стенки 3 - 20 мм).
- Некоаксиальная подача сфокусированной газопорошковой струей – производительность до 5 кг/ч (стенка 0.8 - 3 мм)
- Коаксиальная подача сфокусированной струей – производительность до 1 кг/ч (стенка от 0,6 – 2 мм)

Через узкий факел газовой взвеси порошка пропускается лазерное излучение. Получаем жидкую оболочку и твёрдое ядро порошинки. Нет сплошного плавления порошка. Двухфазная ванна расплава и объемная кристаллизация.

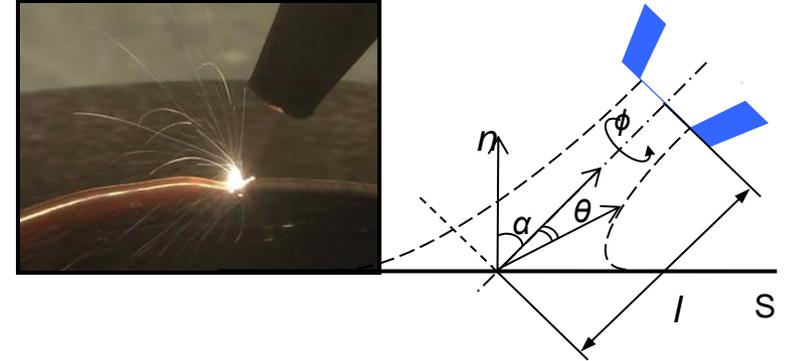


МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНОСА ПОРОШКА

Coaxial scheme



Non-coaxial scheme



Solution of Laplace equation

$$\Delta\varphi = 0 \quad \vec{v} = \text{grad}\varphi \quad \left. \frac{\partial\varphi}{\partial n} \right|_g = 0 \quad \left. \frac{\partial\varphi}{\partial N} \right|_m = 0 \quad \left. \frac{\partial\varphi}{\partial z} \right|_{z=H} = V_0$$

$$\varphi = AR^2 \frac{3\cos^2\theta - 1}{2} \quad v_z = -\frac{4Q}{\pi Hd^2} z \quad v_x = \frac{2Q}{\pi Hd^2} r$$

$$\varphi = \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{m=0}^k \frac{r^m}{m \cdot l^{m-1}} A_{k,m} \cos k\phi P_m^k(\cos\theta)$$

$$A_{k,m} = \frac{(2k+1)(k-m)!}{2\pi(k+m)!} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi f(\theta, \phi) P_m^k(\cos\theta) \cos k\phi \sin\theta d\theta d\phi$$

$f(\theta, \phi)$ - Determined by reflection method, depend from nozzle shape and gas consumption

Powder particles trajectories of motion

Equation of motion in approximation of weak-dusty jet

$$m\ddot{\vec{r}} = m\vec{g} - \alpha_s(\dot{\vec{r}} - \vec{v})$$

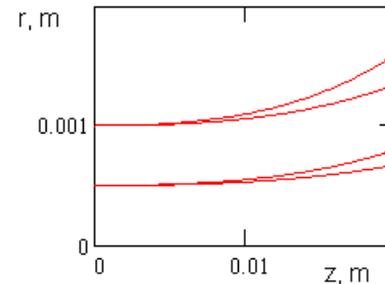
Nozzle-substrate flying time

Radial position of particle

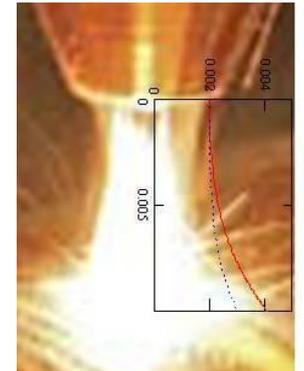
$$t_0 = \frac{1}{2\sqrt{\frac{\alpha V_0}{m H}}} \ln \frac{V_0 + H\sqrt{\frac{\alpha V_0}{m H}}}{V_0 - H\sqrt{\frac{\alpha V_0}{m H}}}$$

$$r = r_0 ch\left(\frac{H}{V_0} \sqrt{\frac{\alpha V_0}{2m H}}\right) \approx r_0 \left(1 + \frac{H}{V_0} \frac{\alpha}{4m}\right)$$

Analysis of turbulent pulsations of gas velocity



Gas-powder jet boundary



МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВА ЧАСТИЦ ПОРОШКА И ФОРМИРОВАНИЯ ДВУХФАЗНОЙ ВАННЫ

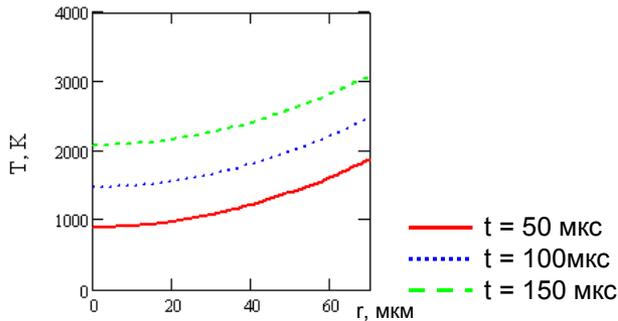
Одномерная тепловая задача

$$\frac{1}{\chi} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad T|_{t=0} = T_0 \quad \frac{\partial T}{\partial r}|_{r=0} = 0 \quad -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial r}|_{r=R} = q$$

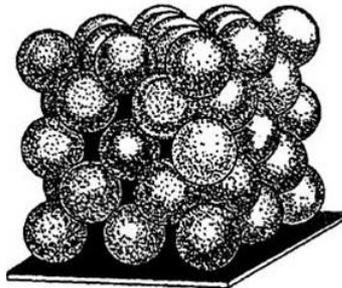
Решение

$$T(r,t) = T_0 + \frac{3q \cdot \chi^{3/2} \cdot \pi^{1/2}}{\lambda \cdot R \cdot r} \int_0^t \frac{\tau}{(t-\tau)^{1/2}} \cdot \exp\left(\frac{r^2}{4\chi(t-\tau)}\right) \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{r}{2\sqrt{\chi(t-\tau)}}\right) d\tau$$

Радиальное распределение температуры в частице



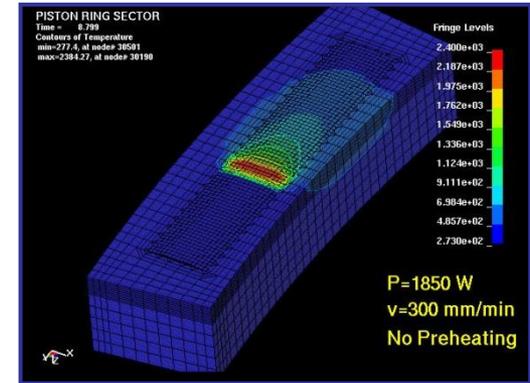
Плотная упаковка сферических частиц (0.74)



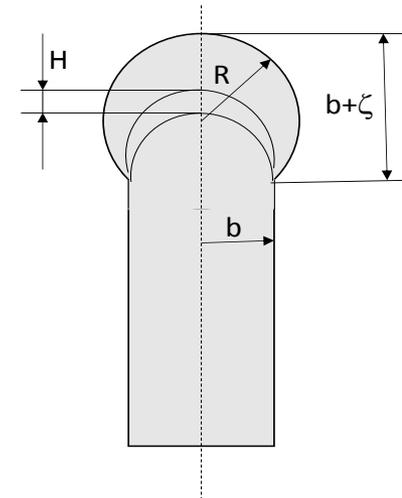
Глубина проплавления

$$\delta = R - \frac{3q \cdot \chi^{3/2} \cdot \pi^{1/2}}{\lambda \cdot R(T_p - T_0)} \int_0^t \frac{\tau}{(t-\tau)^{1/2}} \cdot \exp\left(\frac{r^2}{4\chi(t-\tau)}\right) \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{r}{2\sqrt{\chi(t-\tau)}}\right) d\tau$$

Тепломассоперенос в выращиваемом валике



Устойчивость выращивания

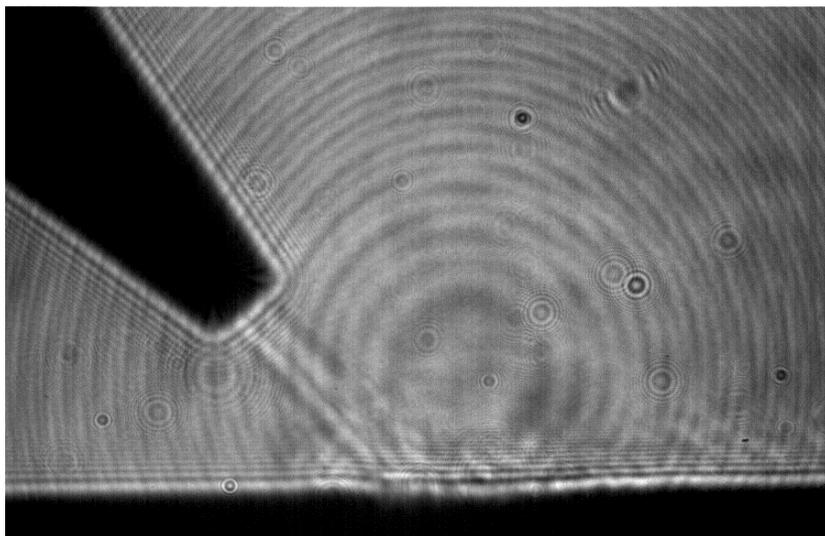
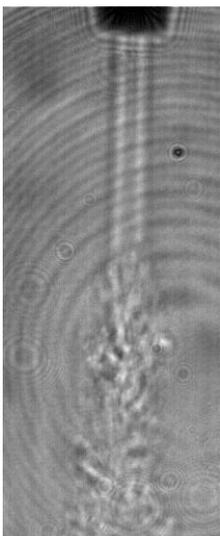


Условие устойчивого выращивания

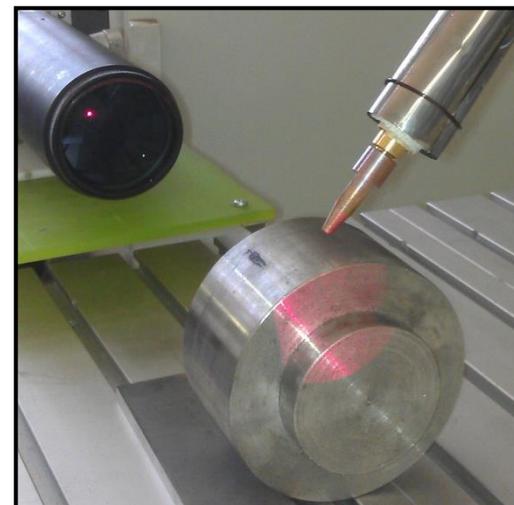
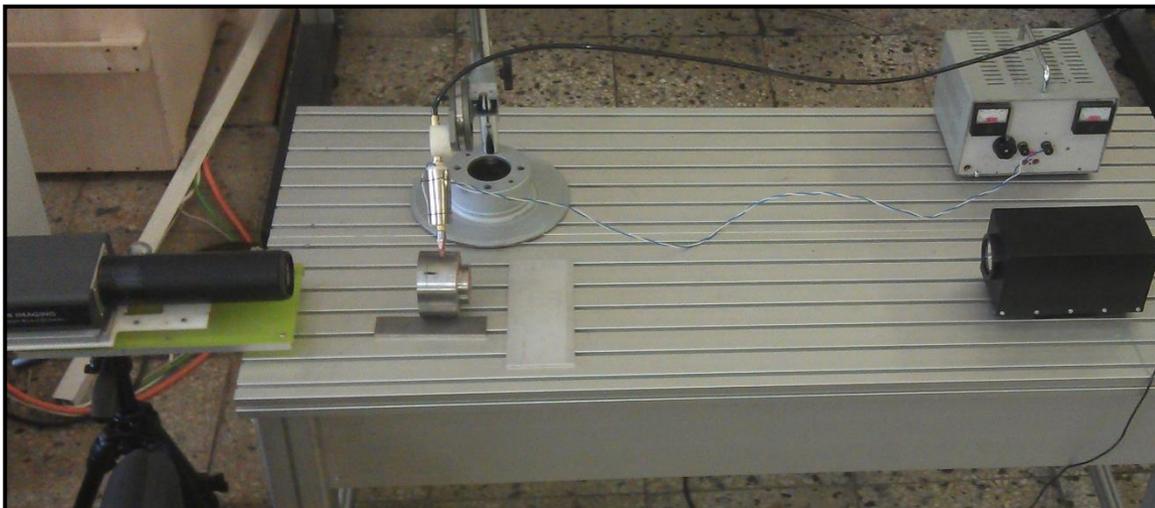
$$2 \frac{\sigma H^2}{v_0 b^3 L} < \frac{\partial j}{\partial z}$$

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПЕРЕНОСА ПОРОШКА

Structure of gas and powder-gas jets

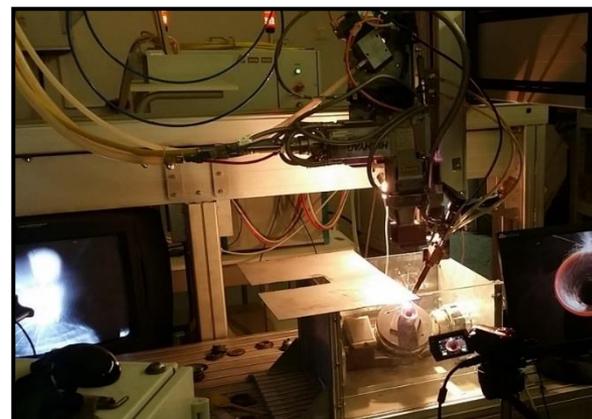
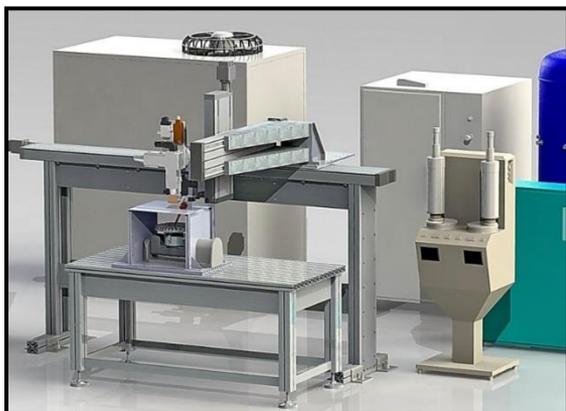


Research installation

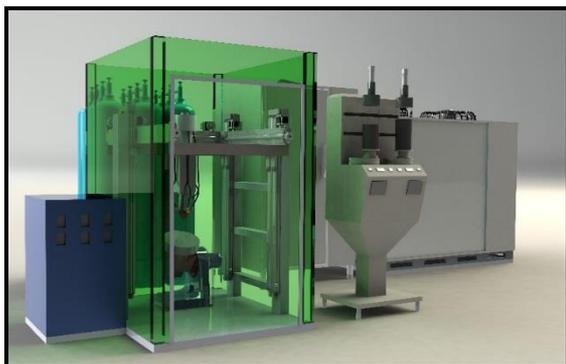


Разработка типоразмерного ряда технологических машин

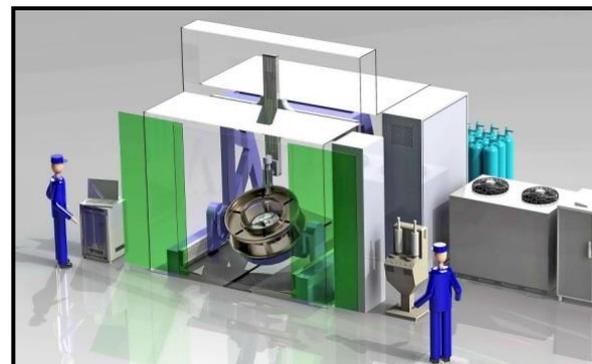
Размер рабочей зоны 150x150x100



Размер рабочей зоны 400x400x250

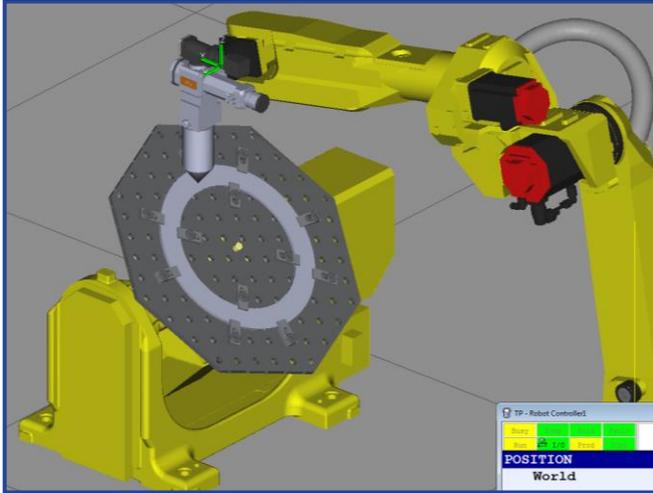


Размер рабочей зоны 2500x2000x1000

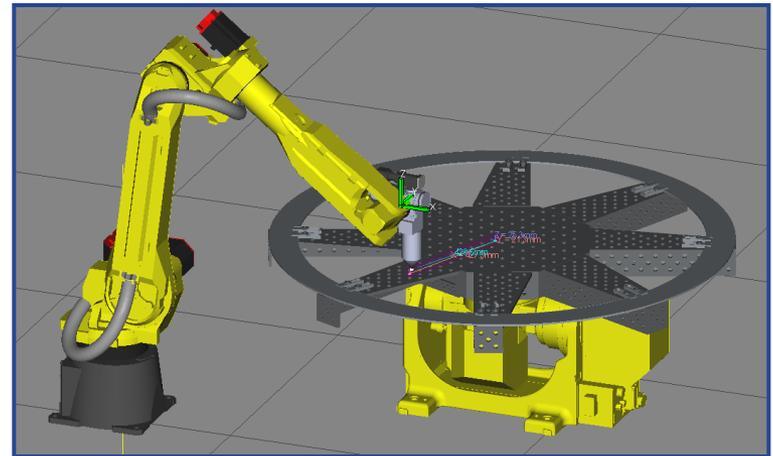


Разработка типоразмерного ряда технологических машин

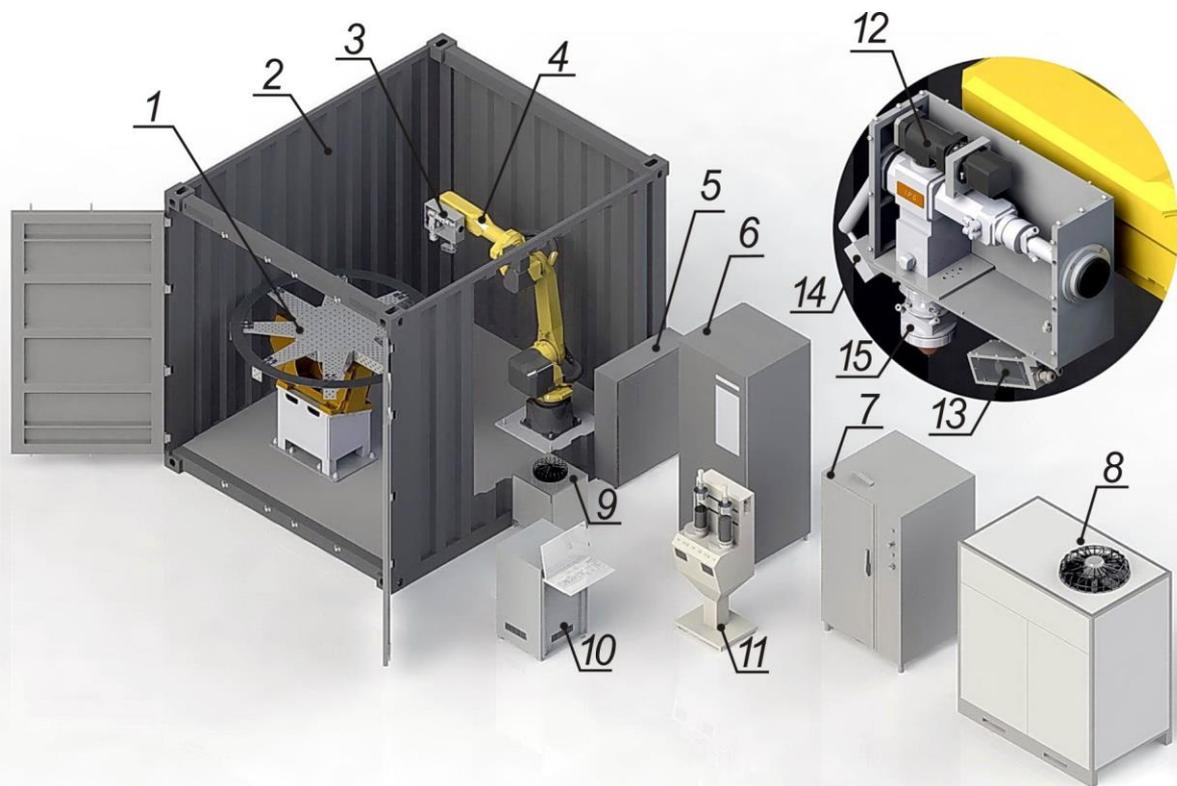
Размер рабочей зоны 650x650x500



Размер рабочей зоны 2000x2000x1000



Лабораторная технологическая установка лазерного выращивания



- 1 – Двухосевой вращатель,
- 2 – Рабочая камера,
- 3 – Лазерная наплавочная головка,
- 4 – Робот манипулятор,
- 5 – Система подготовки и подачи газов,
- 6 – Устройство очистки и осушки газов,
- 7 – Лазер волоконный,
- 8 – Чиллер,
- 9 – Система охлаждения,
- 10 – Стойка управления,
- 11 – Порошковый питатель,
- 12 – Система контроля (процесса обработки),
- 13 – Система видеонаблюдения (зоны обработки),
- 14 – Система контроля (зоны обработки),
- 15 – Наплавочное сопло

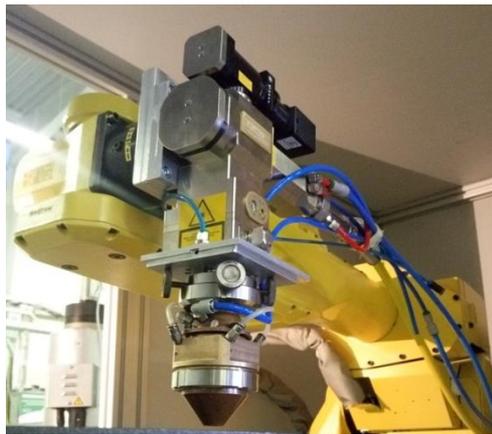
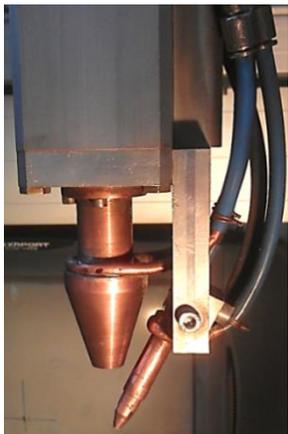
Разработаны опытные образцы технологических установок



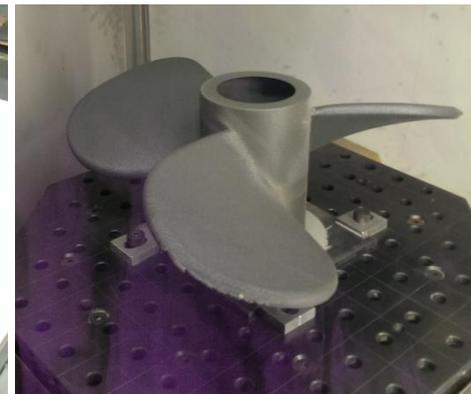
Размер рабочей зоны 150x150x100



Размер рабочей зоны 600x600x600



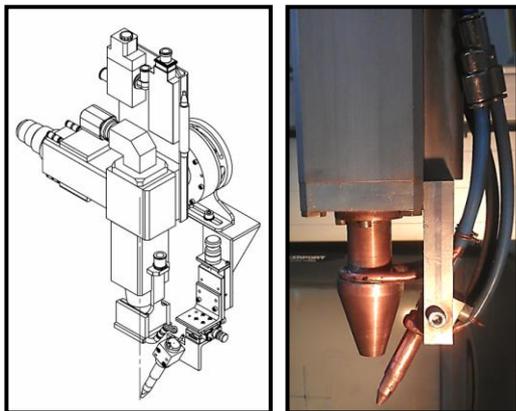
Российский технологический инструментарий



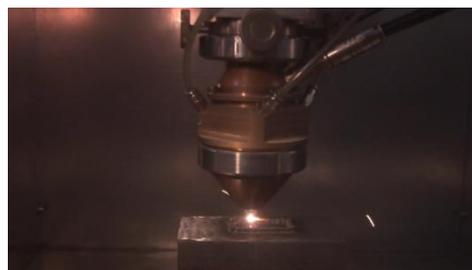
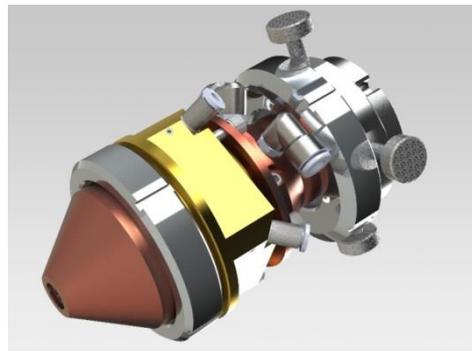
Изделия

Разработка технологических головок для прямого лазерного выращивания

**Некоаксиальная
головка**
**высокая
производительность**



**Коаксиальная
головка**
**сложные формы
изделий**



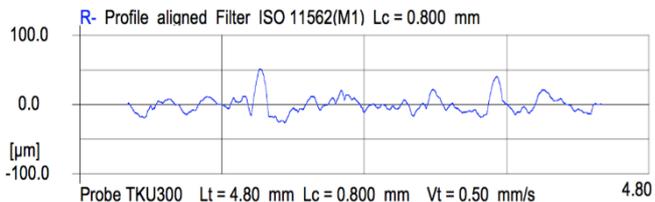
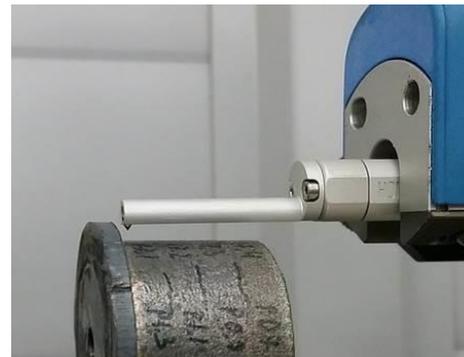
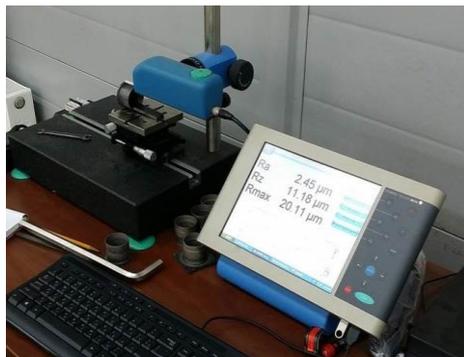
**4-ёх струйная
головка**
**градиентные
структуры**



Модельный образец



Профилометр Hommel Tester W55



Варьируемые параметры

$V = 30 - 45$ мм/с

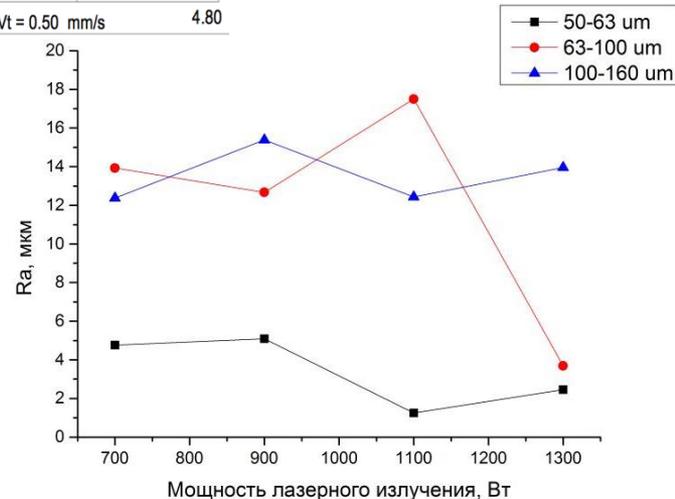
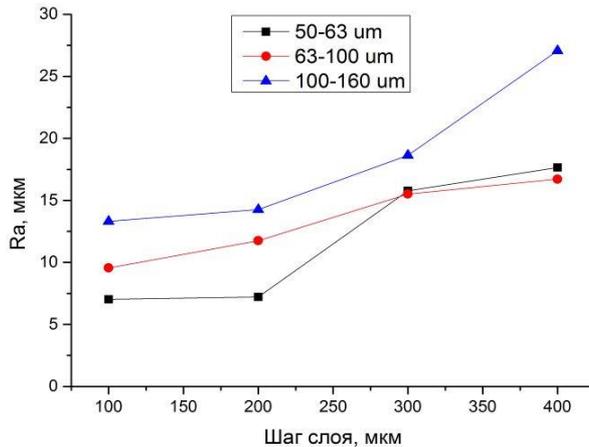
$P = 700 - 1300$ Вт

$h = 100-400$ мкм

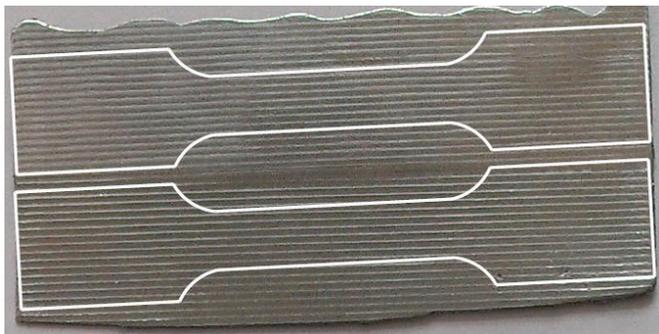
Фракционный состав порошка

50-63 мкм, 63-100 мкм,

100-160 мкм



Сплав EuTroloy 16625M.04



УСТАЛОСТНЫЕ ИСПЫТАНИЯ

№ ступени нагрузж.	Напряжение, МПа	Наработка, циклов	Результат испытаний
1	210	20x10 ⁶	Не разрушился
2	230	2x10 ⁶	Не разрушился
3	250	2x10 ⁶	Не разрушился
4	270	1,46x10 ⁶	Разрушился

ИСПЫТАНИЯ НА РАЗРЫВ

Состояние	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %
без Термообработки	487	855	28,8
	489	876	26,6
после Термообработки (отжиг для снятия напряжения при T=1000 С, 3 часа)	454	870	31,9
	504	840	22,3
Прокатанный (лист)	414-758	827-1103	30-60
Отожженный	414-655	827-1034	30-60
Литой	310	590	25

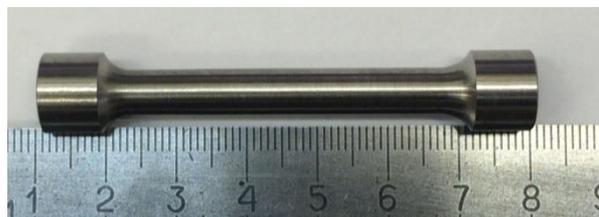
Качество материала полученного методом лазерной гетерофазной порошковой металлургии соответствует прокату

ИСПЫТАНИЯ НА РАЗРЫВ



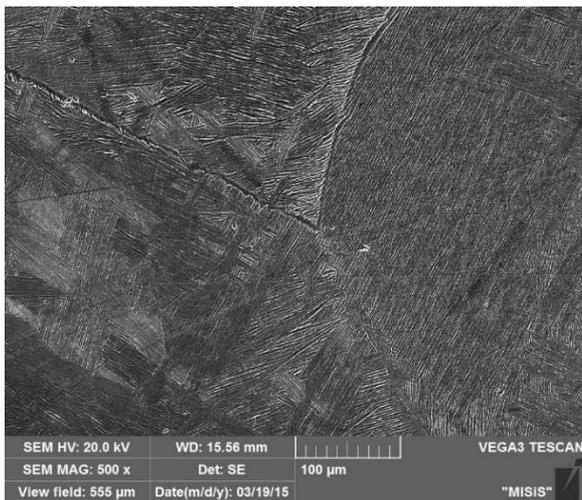
Состояние	T, °C	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %
Выращивание	20	882	968	6,6
	20	914	916	3,1
	350	775	875	8,5
Выращивание + ГИП	20	885	951	9,7
	20	882	935	8,4
	350	649	740	24,0
Литье (образец с σ_B max)	20	876	951	6,4 (13,2)
	350	505	617	13,7
Литье + ГИП (образец с σ_B max)	20	851	943	7,3 (9,0)
	350	482 (494)	618	17 (17,9)

ДЛИТЕЛЬНАЯ ПРОЧНОСТЬ

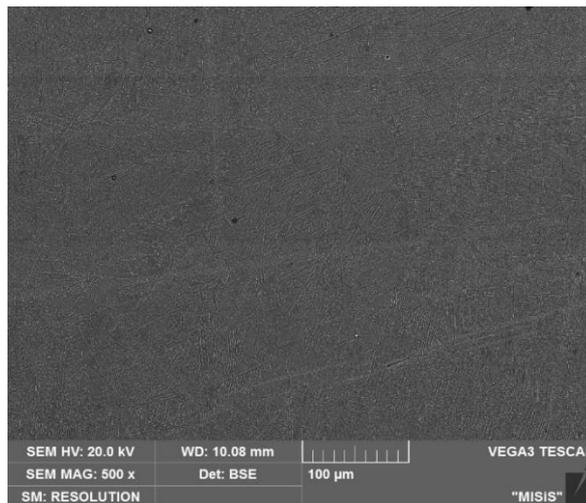


Состояние	T, °C	Напряжение, кг/мм ²	Время, часы
Выращивание	500	48	50 ч
Поковка (по ОСТ)	500	48	≥ 50 ч
Литьё не испытывается			

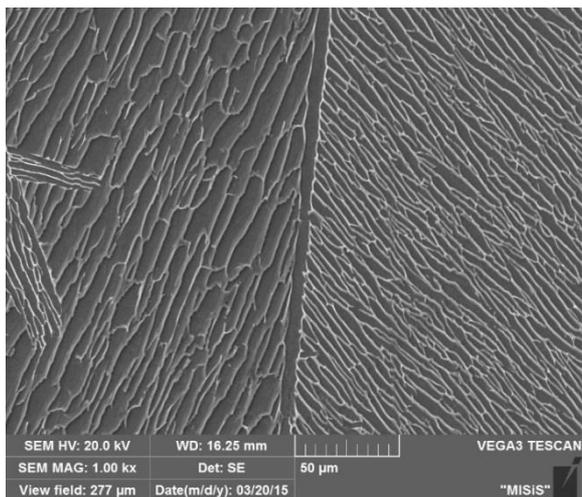
Литье



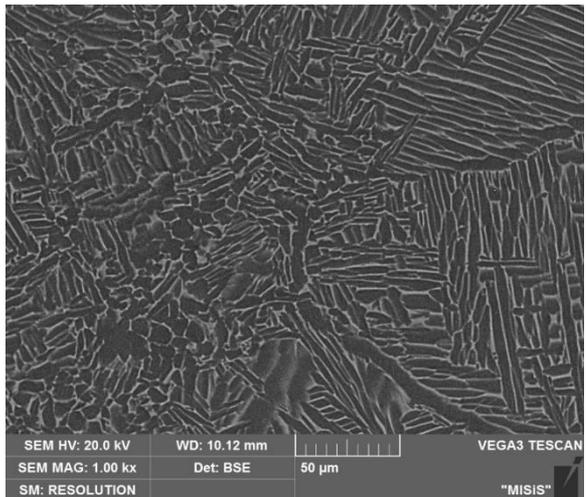
Выращивание



Литье + ГИП



Выращивание + ГИП

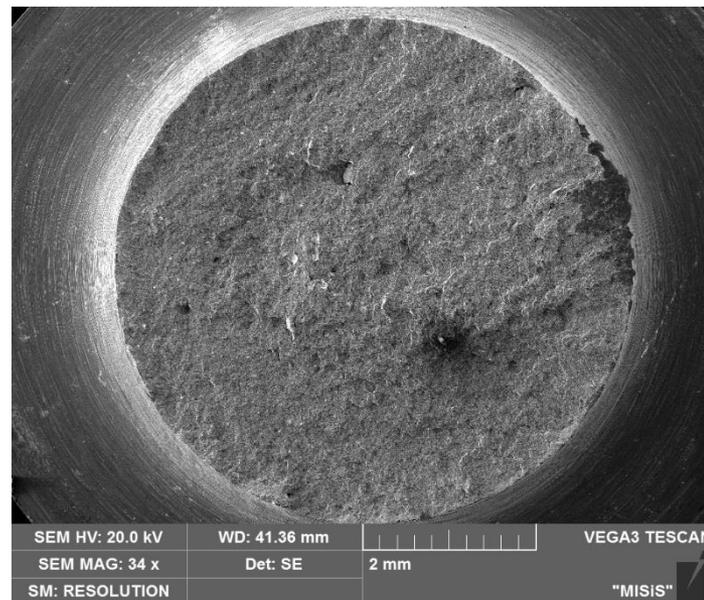
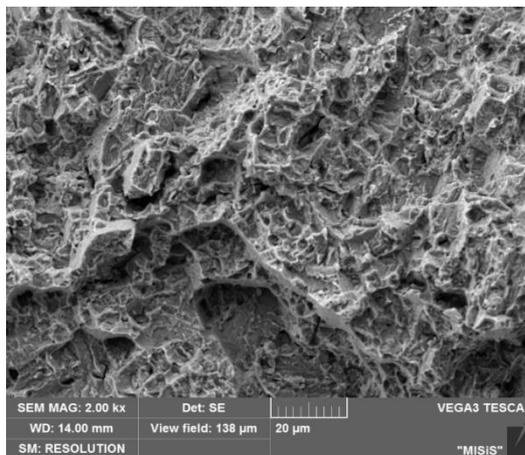


Структура в образцах, полученных методом гетерофазной порошковой лазерной металлургии, существенно более дисперсная, чем у литых образцов, что обеспечивает потенциал для получения более высокого уровня механических свойств.

ИСПЫТАНИЯ НА РАЗРЫВ



Состояние	T, °C	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %
Выращивание	20	1046	1353	11,5
Выращивание + ТО	20	820	985	7,4
Литье (образец с σ_B max)	20	1075	1108	2,9 (4)



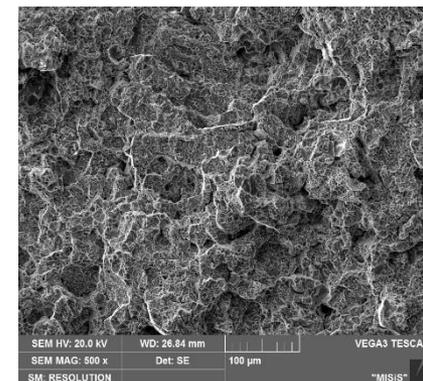
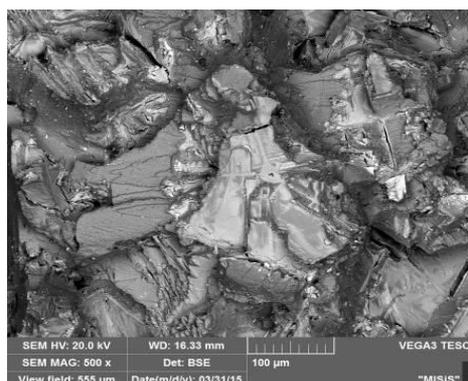
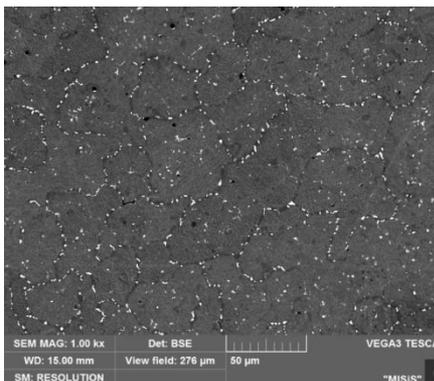
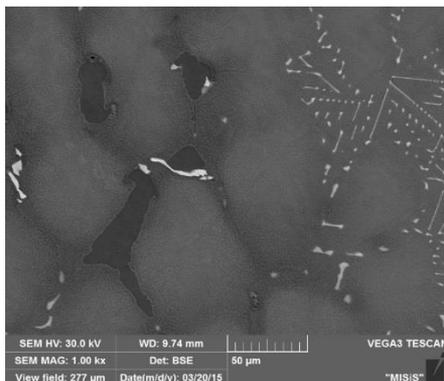
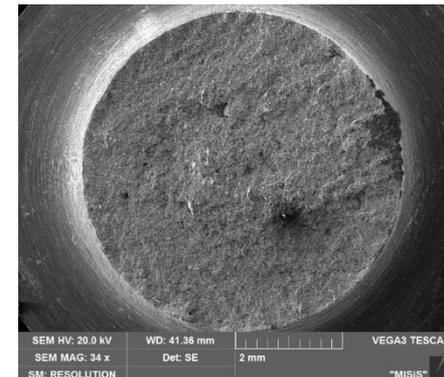
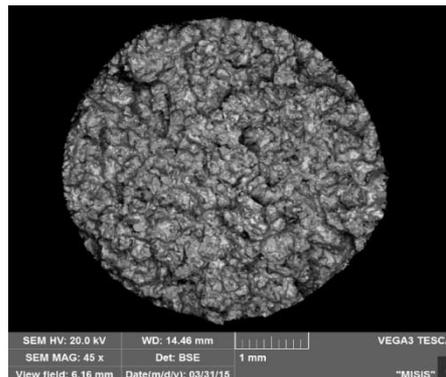
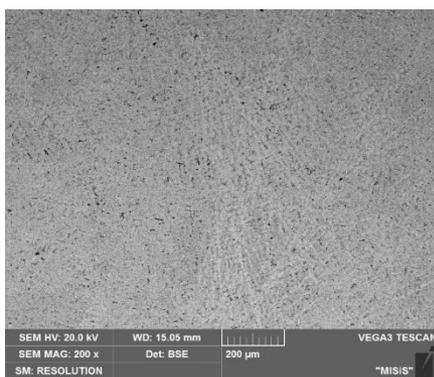
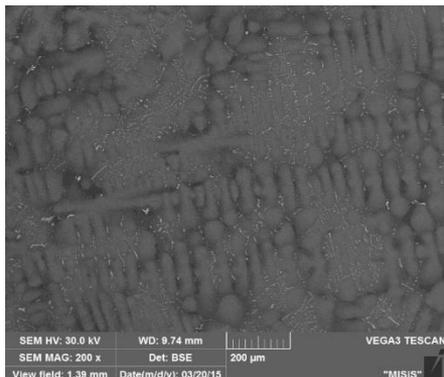
Предел прочности у материала, полученного методом гетерофазной порошковой лазерной металлургии на **22%**, а относительное удлинение в **2,9** раза превышает характеристики литья

Литье

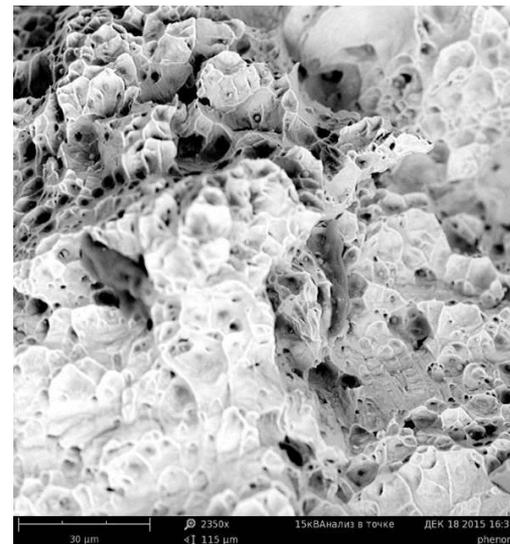
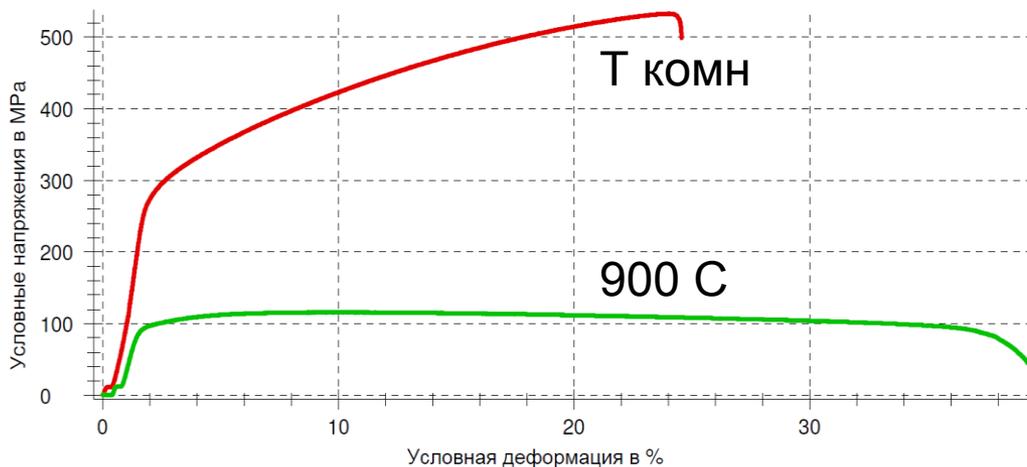
Выращивание

Литье

Выращивание



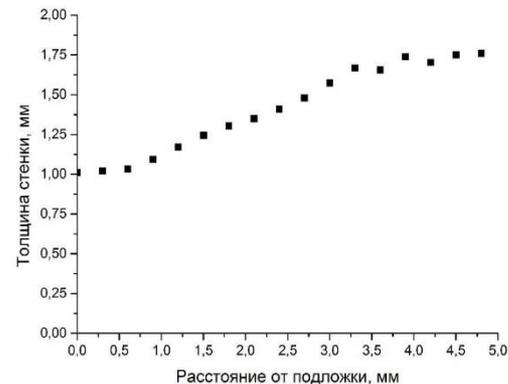
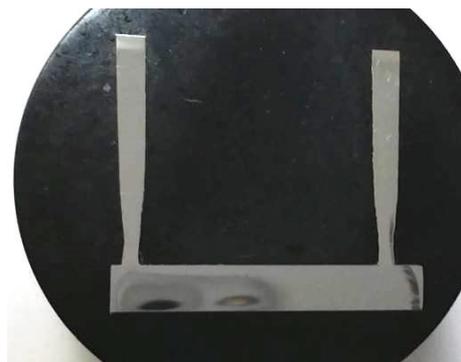
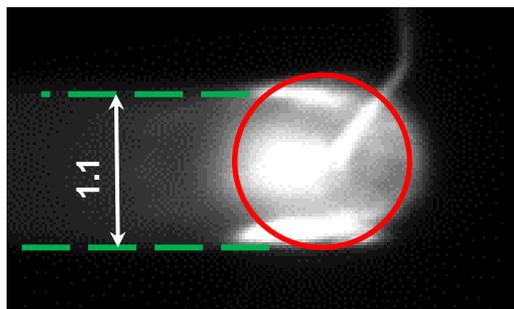
Излом в образцах, полученных методом гетерофазной порошковой лазерной металлургии, в отличие от излома литых образцов характеризует вязкое разрушение.



Состояние поставки	Толщина, мм	Предел прочности, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %
Выращенный образец, термообработанный, T _{исп} =20 °C	D _{раб.части} =6 мм	532	271,8	20,1
Горячекатанный лист (AISI 316L)	Все размеры	515	205	40
Холоднокатанный лист (AISI 316L)	h≤12,7	620	310	30
Холоднокатанный лист (AISI 316L)	h>12,7	515	205	30

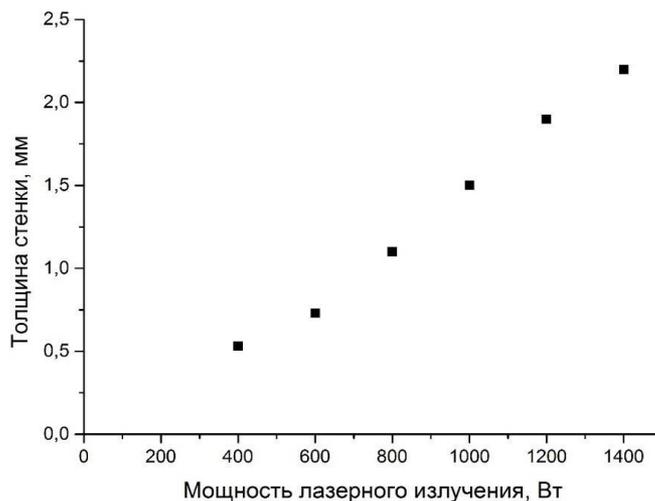
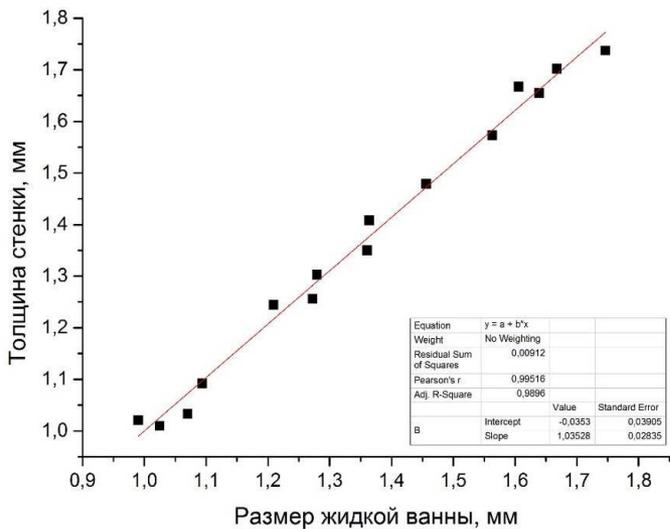
Характер излома -
вязкий

Без адаптивного управления



Контроль геометрии ванны расплава

С адаптивным управлением мощностью лазерного излучения



Апробированные материалы

Сплав на основе Fe: EuTroloy 16316.04

Fe	Ni	Cr	Si	Mo	C
осн	13	16.8	0.85	2.2	0.02



Сплав на основе Co: EuTroloy 16006.04

Co	Cr	Ni	W	Mo	C	Si	Fe
осн	28.7	1.9	4.7	2.2	1.2	1.23	1.9

EuTroloy 16316.04



EuTroloy 16006.04

EuTroloy 16496.04

Сплавы на основе Ni

EuTroloy 16496.04

Ni	Cr	Si	B	Fe	C
осн	15.9	4.3	3.2	2.6	0.76



Сплав ЭП-741

Сплавы серии ЭП

Ni	Cr	Fe	Ti	Al	Cu
осн	19.2	3	2.2	1.4	0.2

EuTroloy 16625.04

Ni	Cr	Mo	Nb	Ta	Fe	Si	Mn
осн	21.5	9	2.5	1.2	0.5	0.4	0.35



EuTroloy 16625.04



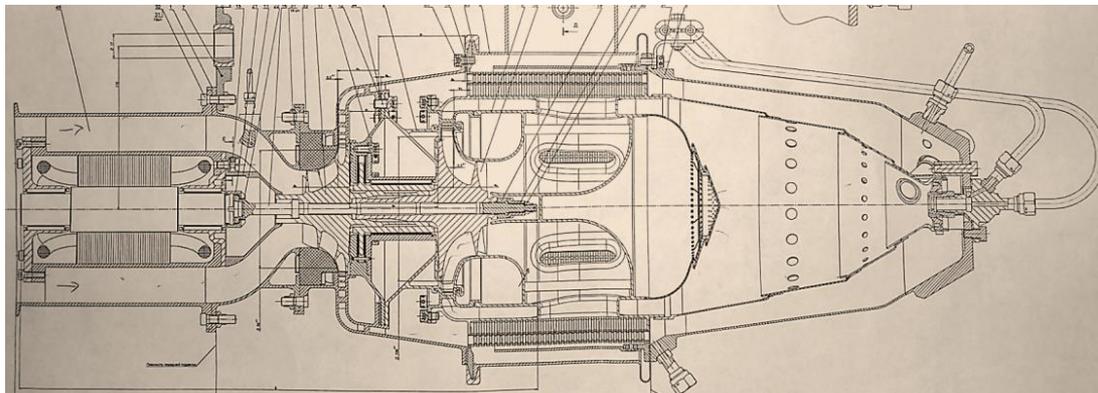
BronzeTec 19868

ЖС-6У

Сплавы на основе Ti: BT-20, BT-6

Сплав на основе Cu: BronzeTec 19868 (80Cu-15Al-5Ni)

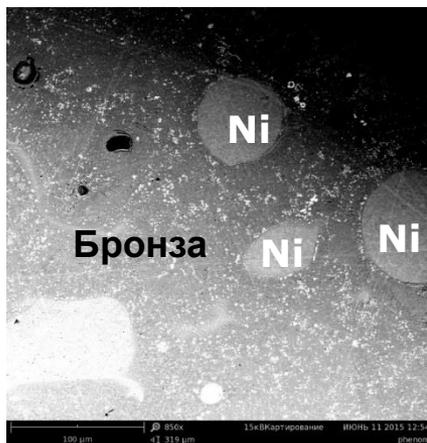
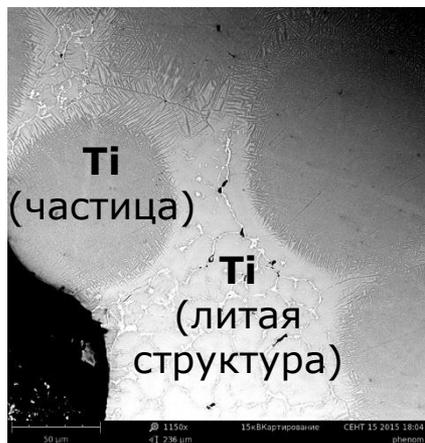
Отработаны технологии изготовления методом прямого лазерного выращивания элементов газотурбинного двигателя



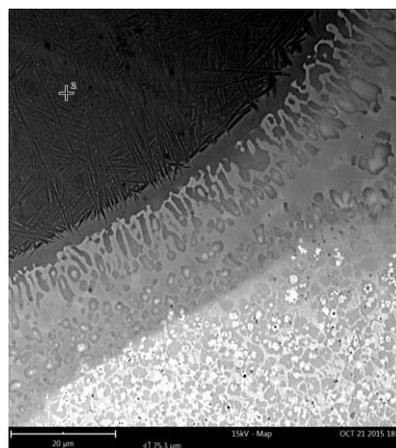
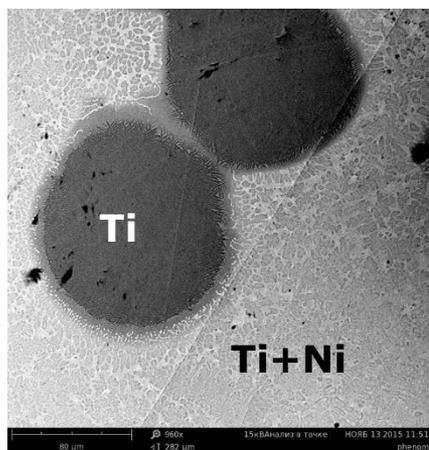
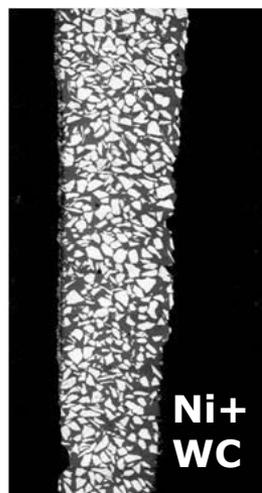
Детали «горячей» части газотурбинного двигателя



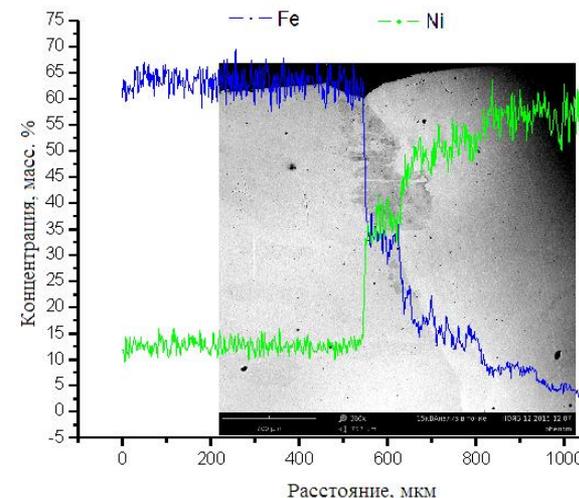
Гетерофазные структуры



Коаксиальное 4-х-струйное сопло



Градиентная структура





Кооперация в работе по гетерофазной лазерной порошковой металлургии

