

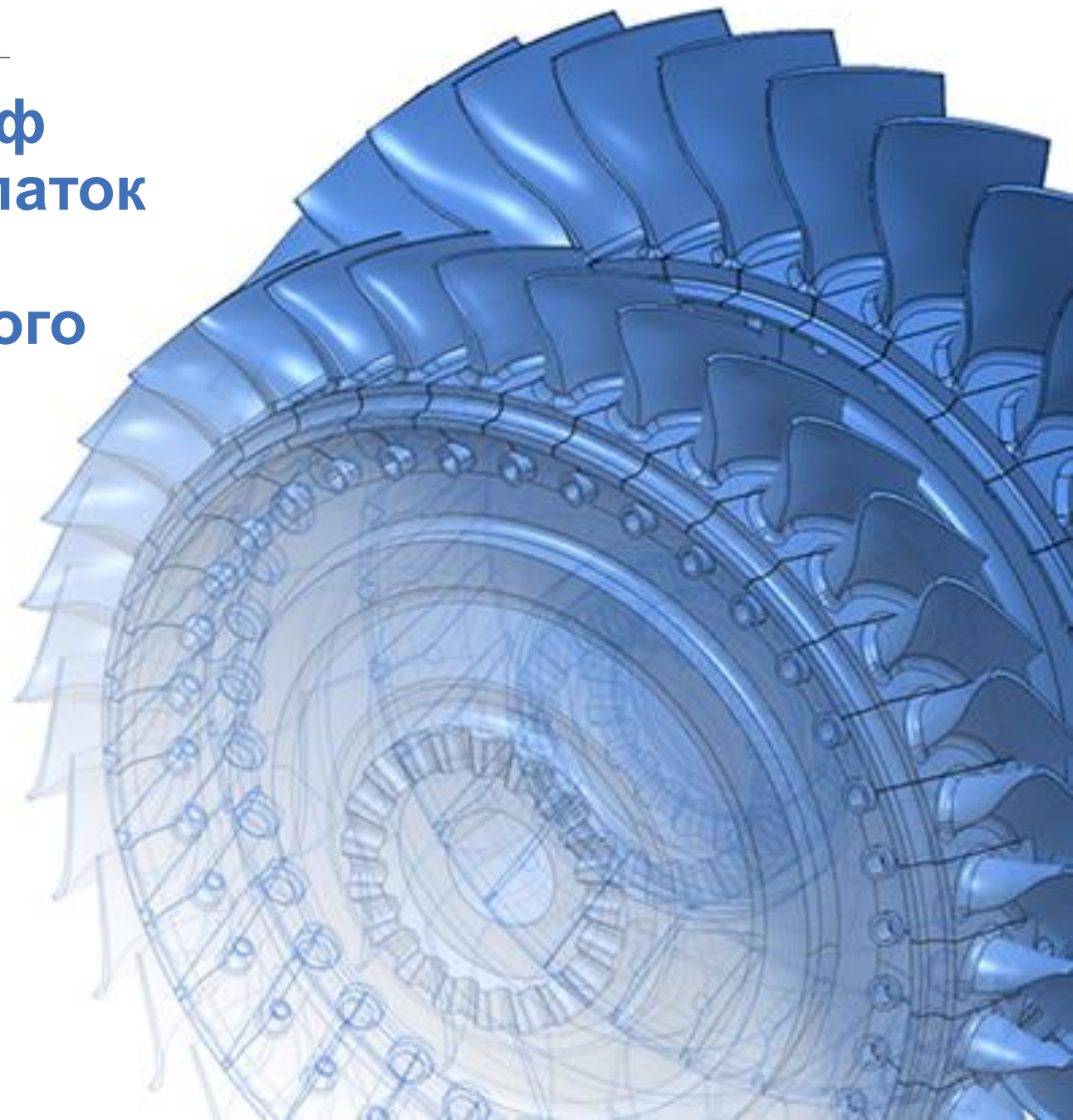
Восстановление геометрии цапф направляющих поворотных лопаток статора КВД с применением высокоскоростного атмосферного плазменного напыления

Максим Иванов

Директор департамента перспективных технологий
ООО «Космические транспортные системы»

18 апреля 2025 г.

Рыбинск



Ремонт поворотных лопаток статора КВД

Мотивация

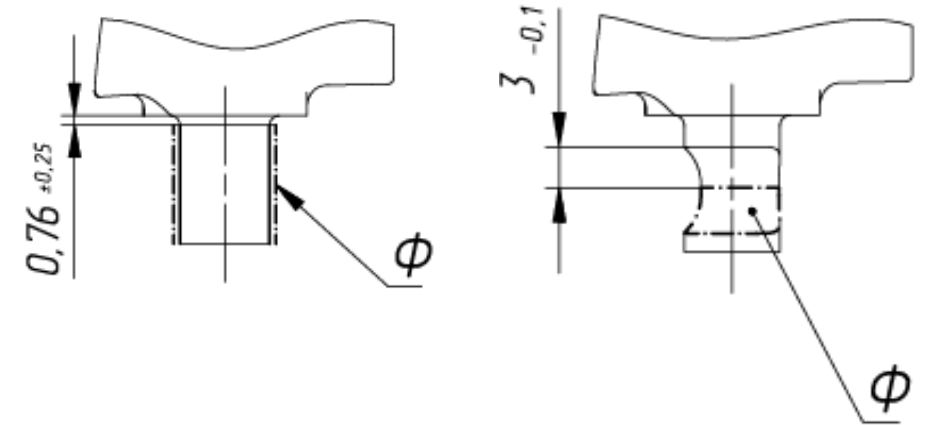
Поворотные направляющие лопатки статора КВД авиадвигателя CFM56 изготовлены из стали A-286 (система Fe-Ni-Cr). В процессе эксплуатации происходит износ внутренней цапфы в результате работы в паре трения с композитной втулкой и штифтом. Износ идет по цилиндрической поверхности и по штифтовому пазу.

Наиболее распространенным ремонтом для восстановления геометрии ПНЛ в мировой практике является напыления металлического покрытия Inconel 718 методом HVOF с последующей механической обработкой.



Постановка задачи

- Определить применимость метода высокоскоростного атмосферного плазменного напыления для проведения ремонта.
 - Определить требования к материалу-аналогу российского производства (Inconel 718).
 - Разработать алгоритм (траекторию) нанесения покрытия.
 - Проектировать средства экранирования и маскирования, обеспечивающие требования к зонам ремонта.
 - Отработать режим напыления, отвечающий жестким требованиям УР.
- Диаметр цапфы 7,0 мм
 - Температура детали не должна быть выше 150 С
 - Требуемая толщина покрытия для восстановления геометрии цилиндрической части – 0,5 мм
 - Требуемая толщина покрытия для восстановления геометрии паза - 1,2 мм
 - Прочность покрытия на отрыв не менее 65 МПа
 - Пористость не более 1 %



Цапфа с износом



Годная цапфа



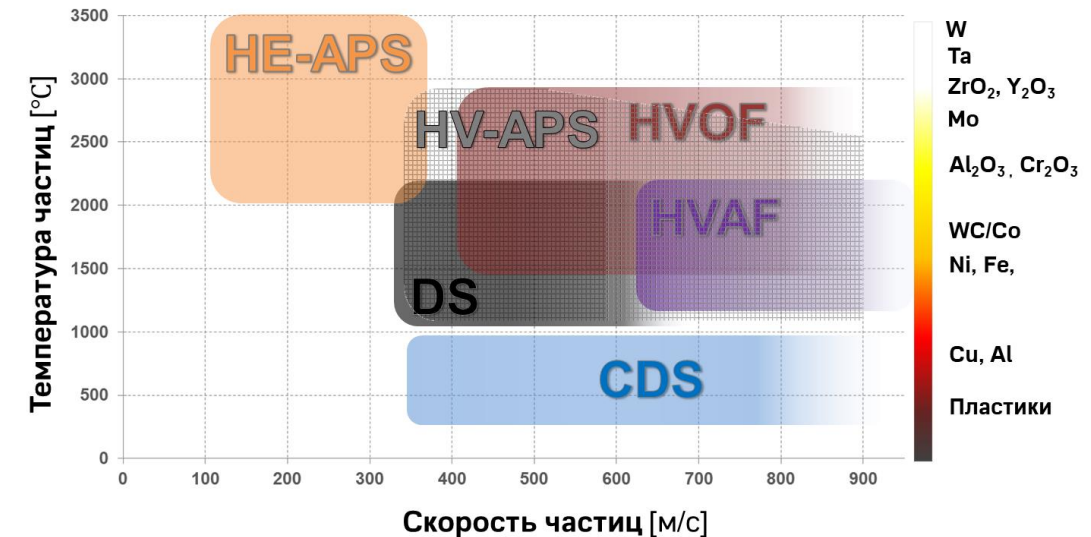
«Термоплазма»

Первая отечественная автоматизированная установка плазменного напыления, укомплектованная двумя плазматронами:

1. каскадный плазматрон для высокоэнтальпийного атмосферного плазменного напыления (ВЭ-АПН или HE-APS) керамических и металлических покрытий
2. сверхзвуковой каскадный плазматрон для высокоскоростного атмосферного плазменного напыления (ВС-АПН или HV-APS) плотных металлических покрытий



Сравнение методов газотермического напыления

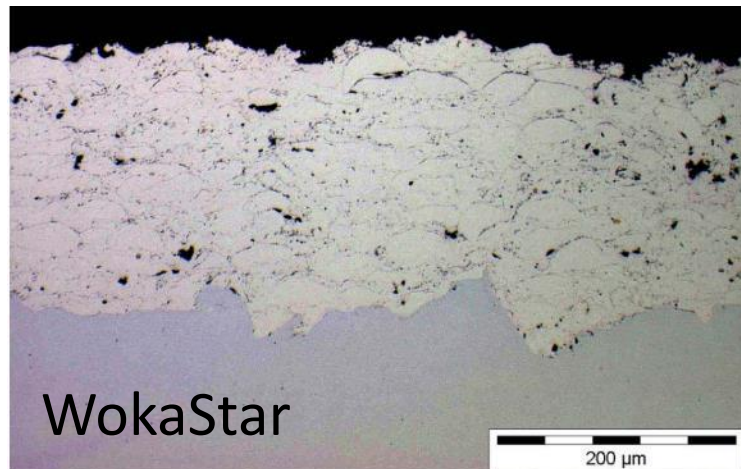


Требования к оборудованию по оригинальной процедуре Safran:

Metco Dimond Jet,
пропилен-кислород,
угол напыления не ниже 45 градусов к горизонту

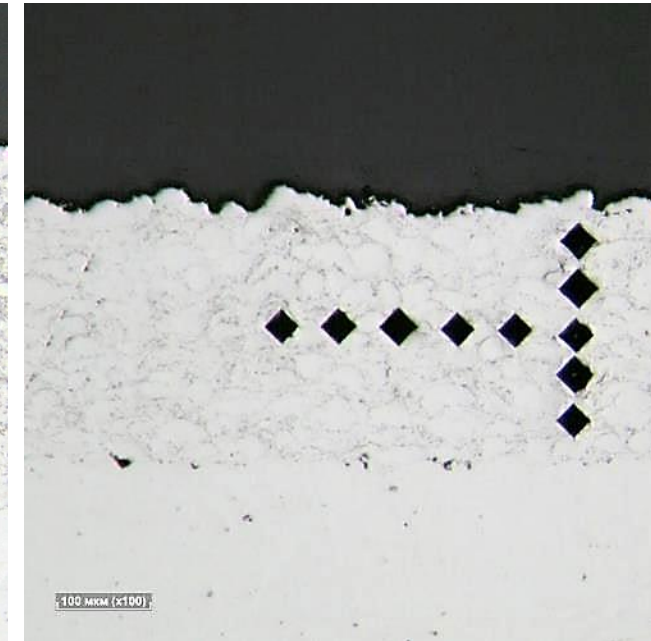
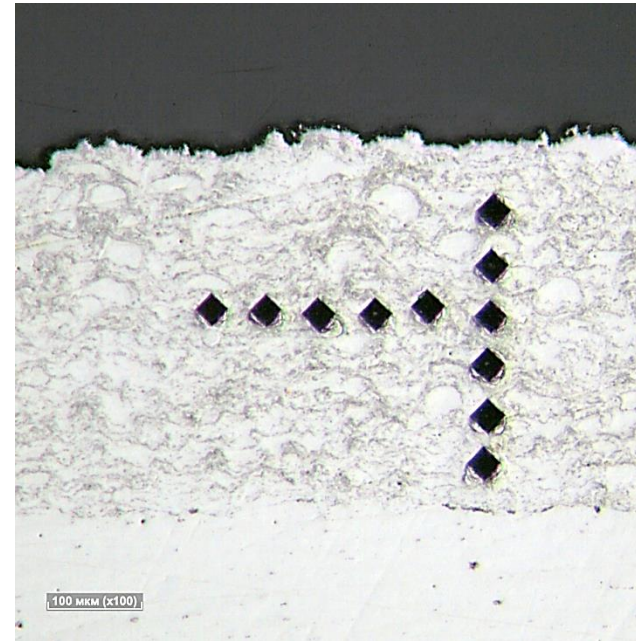
Примеры покрытий, получаемых на различных
типах установок высокоскоростного
(сверхзвукового) напыления,
рекомендованных Metco для порошка Amdry
1718, а также на плазмотроне ПНК-50

Пушка	Пористость, %	Твердость,
WokaStar	< 1	78-80
WokaJet	< 0,5	80-82
ПНК-50	<0,02	>81



Варьирование параметров плазмотрона ПНК50 позволяет получить два типа покрытий Inconel 718:

- ✓ твердое – с высоким содержанием оксидов, с высоким процентом переплавленных частиц
- ✓ вязкое – с низким содержанием оксидов, состоящее из пластически деформированных частиц.

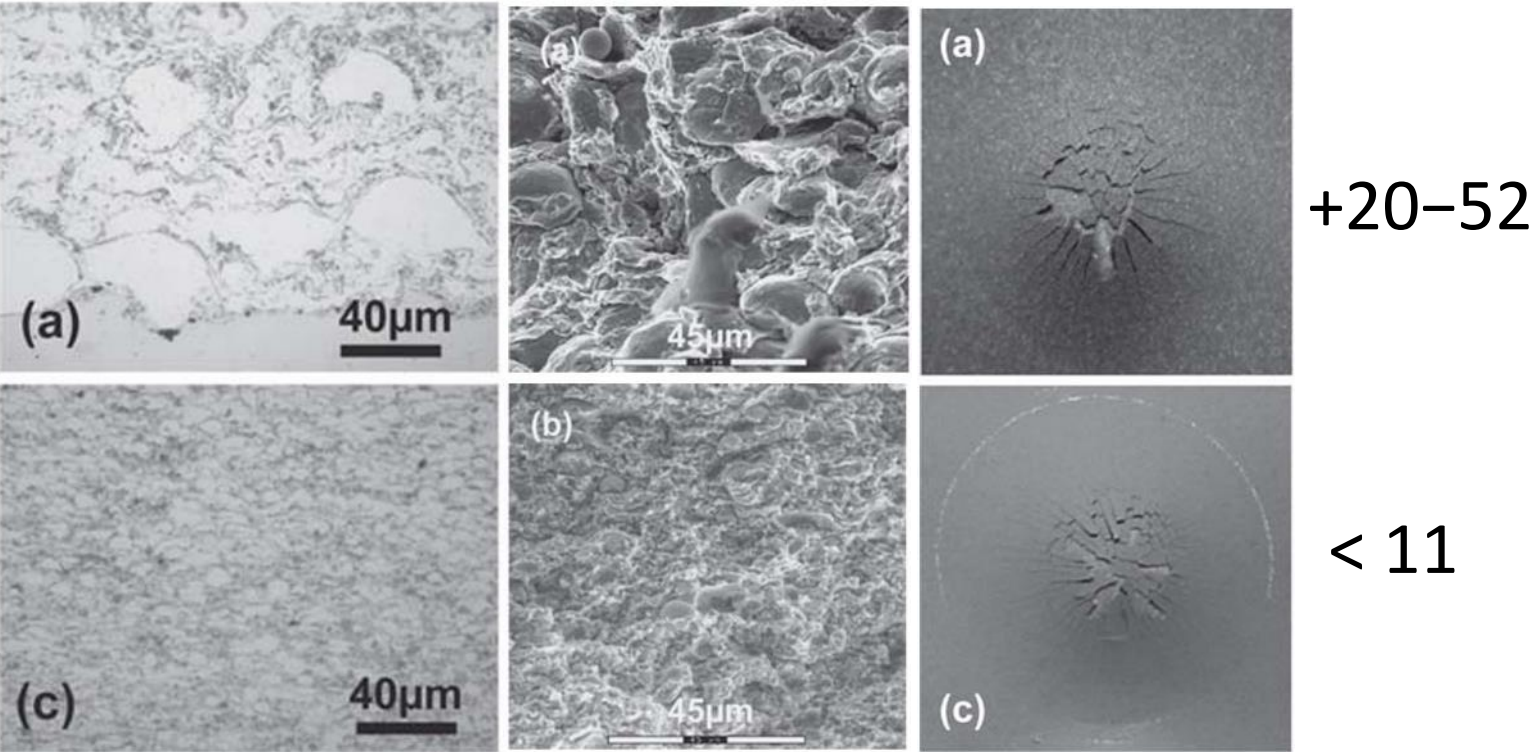


	Требования к покрытию	Состояние 1	Состояние 2
Пористость, %	не более 1,0	0,014	0,016
Размер пор, мкм	не более 5,0 мкм	3,6	5,0
Прочность покрытия на отрыв, МПа	не менее 65	>100	>100
Твердость, HR15N	не менее 79	81,9	77,4
Микротвердость, HV0,3	-	507	387

Сравнение покрытий Inconel 625, напыленных на установке Diamond Jet 2700 hybrid HVOF порошками двух фракций

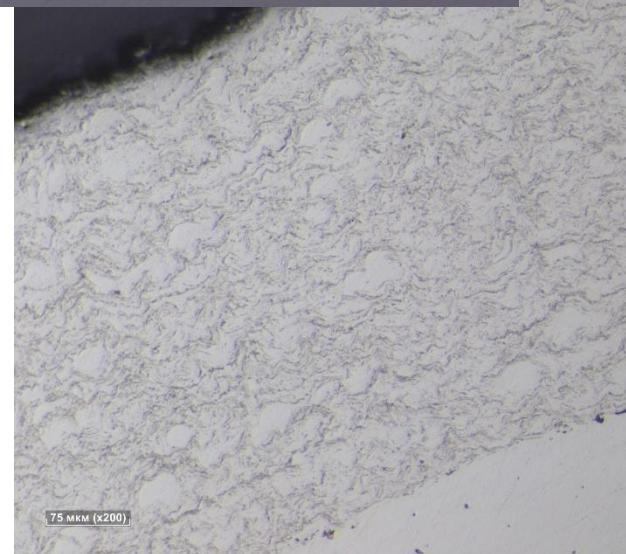
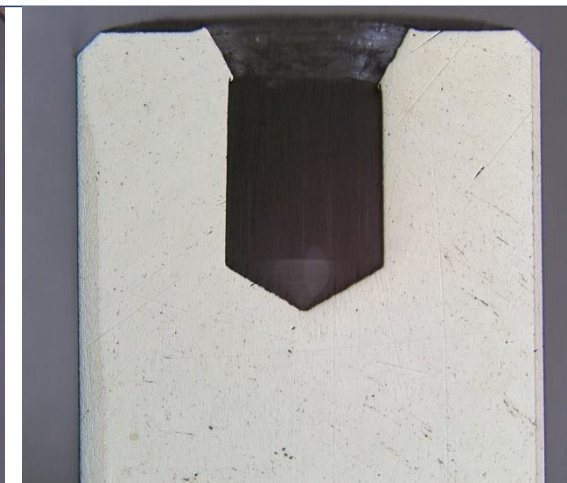
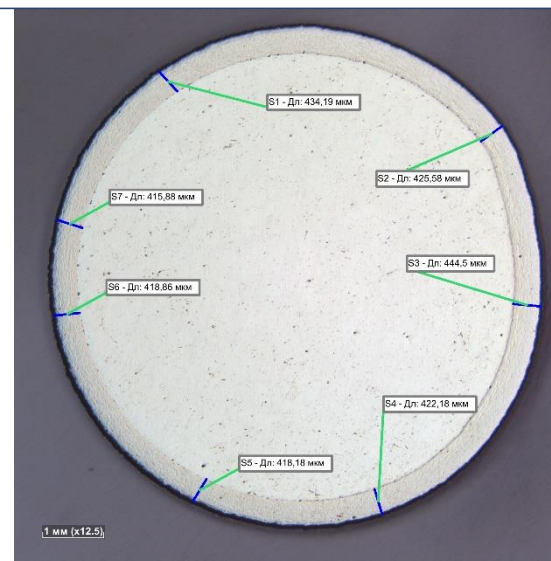
В научно-технической литературе имеются результаты сравнительных исследований покрытий Inconel 625, которые напылены методом HVOF с использованием порошков двух фракций и отличаются по структурно-фазовому составу.

Покрытия с большим содержанием оксидов и более твердые имеют меньшую стойкость к эрозии.



	Фракция	HV0.3	Erosion rate, $\times 10^{-2} \text{ mm}^3 \cdot \text{min}$	
			25 °C	300 °C
X.Q. Ma et al. Journal of Thermal Spray Technology. Volume 15(4) December 2006	+20–52	345	3.012	3.384
	< 11	375	7.62	9.12

Ремонт поворотных лопаток статора КВД

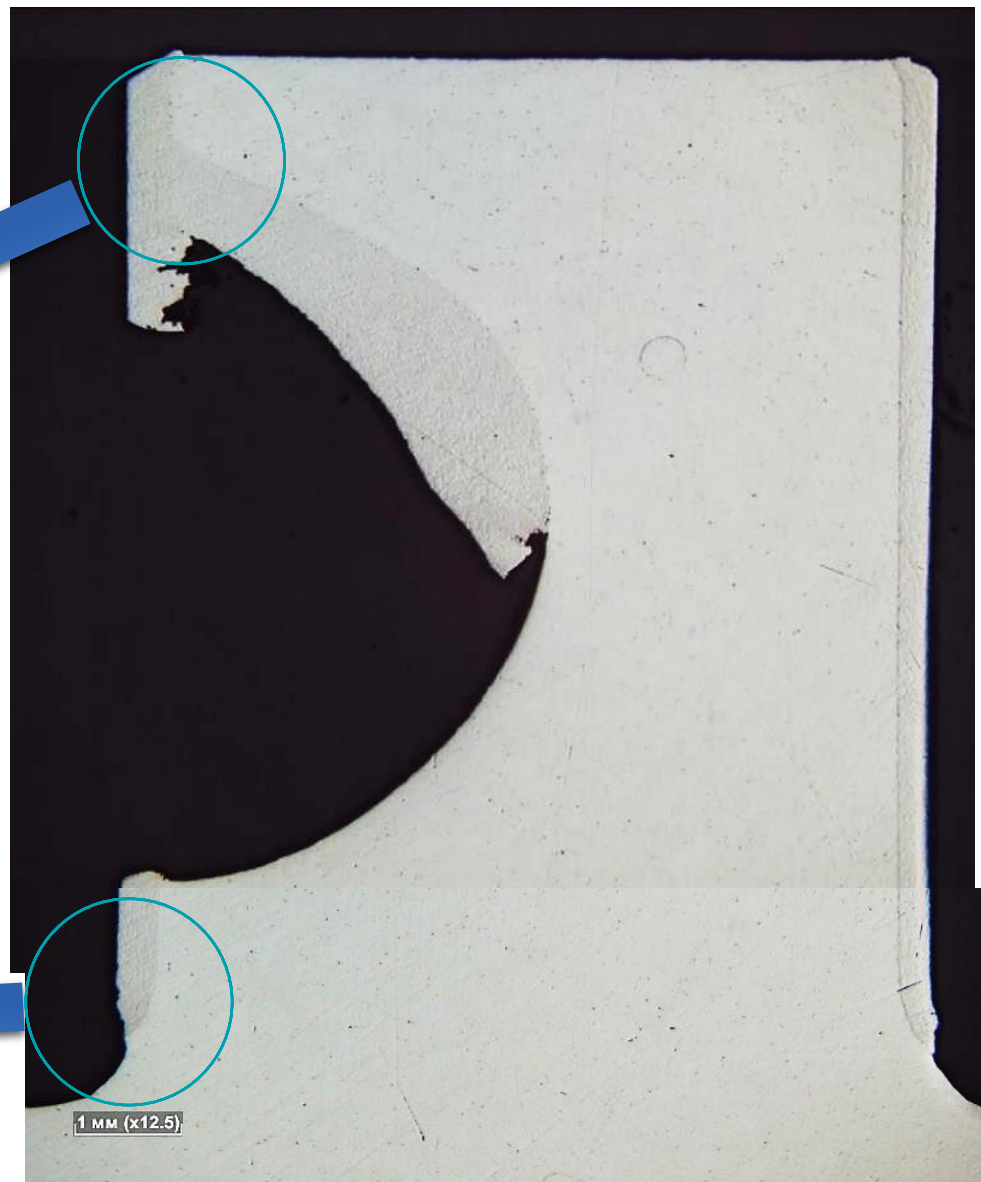
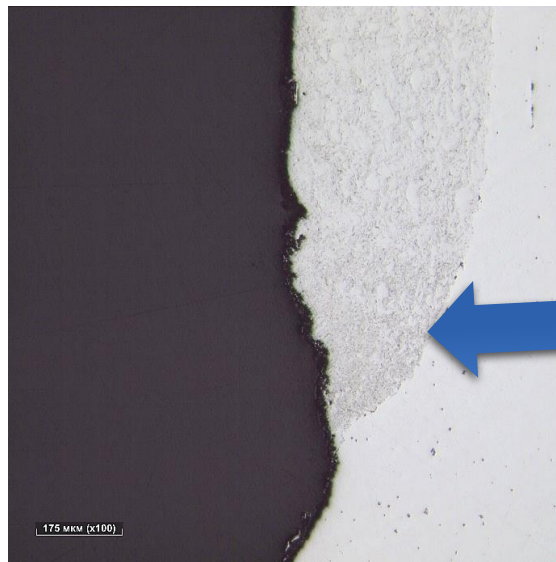


Толщина покрытия, мкм	580 - 620
Пористость покрытия, %	0,01
Размер пор, мкм	1...3
Твердость HR15N	81,0
Микротвердость HV0.3	487
Прочность на отрыв, МПа	>100

Необходимое сочетание параметров покрытия достигается при использовании порошка Inco718 фракции +10-30 мкм. Производитель: ООО «Гранком»

Ремонт поворотных лопаток статора КВД

Разработан алгоритм ремонта цапфы с пазом. Требования УР выполнены



* Лопатка без обработки радиуса перехода
и без обработки паза в размер

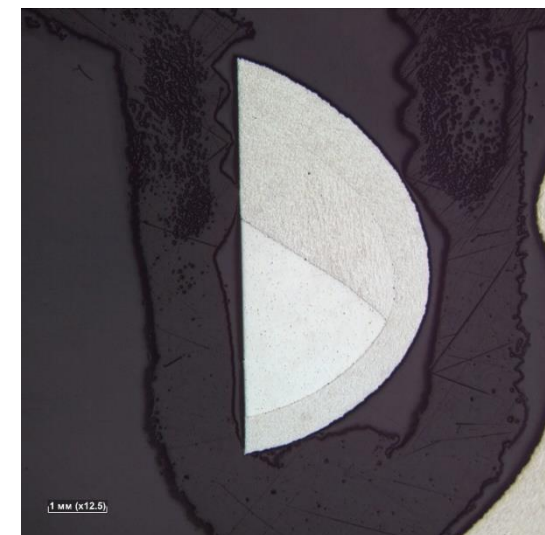
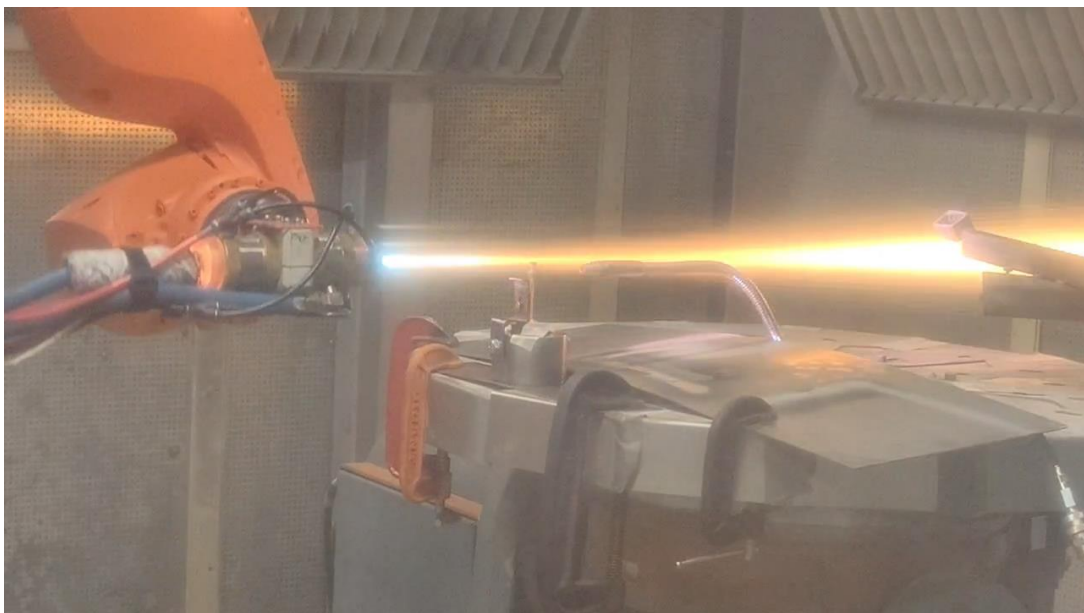
Ремонт поворотных лопаток статора КВД



Фото цапфы лопатки с износом паза по стороне ближе к перу лопатки

Разработан оригинальный алгоритм ремонта всей поверхности паза цапфы. Это позволит вернуть в эксплуатацию больше ПНЛ

Требования к твердости, пористости и размеру пор покрытия выполнены на всех зонах ремонта



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Отечественное оборудование для атмосферного плазменного напыления покрытий, в том числе высокоскоростного, «Термоплазма» (Институт теоретической и прикладной механики им. Христиановича СО РАН, г. Новосибирск) обеспечивает высокое качество покрытий, достойно себя показывает в эксплуатации и может быть использовано в серийном ремонте и производстве деталей ГТУ.
- Российские производители порошков обеспечивают металлургическое качество материалов и готовы поставлять порошки оптимальных фракций для высокоскоростного плазменного напыления.
- Разработана комплексная технология ремонта по восстановлению геометрии цапф направляющих поворотных лопаток статора КВД авиадвигателя CFM56 с применением высокоскоростного атмосферного плазменного напыления. Технологически осуществимо восстановление изношенных деталей с диаметром менее 7,0 мм, с толщиной покрытия до 1,2 мм при обеспечении высоких требований к качеству покрытий (пористость и прочность на отрыв), а также с управляемой величиной твердости.

СПАСИБО!

Максим Иванов

д.т.н., директор департамента перспективных технологий

ООО «Космические транспортные системы»

m.b.ivanov@s7.ru