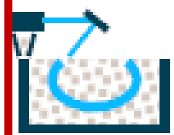
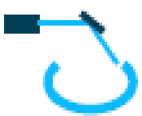
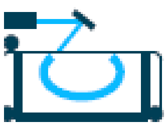
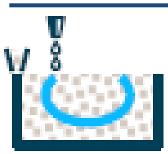
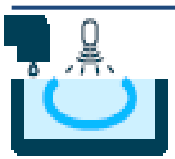
Think Additive !
Powder bed fundamentals

Summary

- Additive is different!!!
- The deposition process
- The melting process
  - DMLS
  - EBM
- The growth strategy
- The support and design arrangement
- Applicable Materials

- Applications

The additive technologies

TECHNOLOGY		SYSTEMS	MARKETS	MATERIALS	METAL RELEV.
	**Powder bed fusion** Thermal energy selectively fuses regions of a powder bed	• DMLS • EBM	• Direct part • Prototyping	• Metals • Polymers	
	**Directed energy deposition** Focused thermal energy is used to fuse materials by melting as the material is deposited	• Laser Cladding • Wire Deposition	• Direct part • Repair	• Metals • Polymers	
	**Sheet lamination** Sheets of material are bonded to form an object	• …	• Direct part • Prototyping	• Metals • Polymers	
	**Binder jetting** Liquid bonding agent is selectively deposited to join powder material	• …	• Direct part • Prototyping • Casting molds	• Metals • Polymers	
	**Material jetting** Droplets of build material are selectively deposited	• …	• Prototyping • Casting patt.	• Metals • Polymers	
	**Material extrusion** Material are selectively dispensed through a nozzle or orifice	• …	• Prototyping	• Metals • Polymers	
	**Vat photopolymerization** Liquid photopolymer in a vat is selectively cured by light-activated polymerization	• …	• Prototyping	• Metals • Polymers	

Cos’è questo Additive Manufacturing?

- **Una nuova tecnologia di costruzione che permette di mettere il materiale direttamente dove necessario evitando di toglierlo dove non serve, se si riesce!**

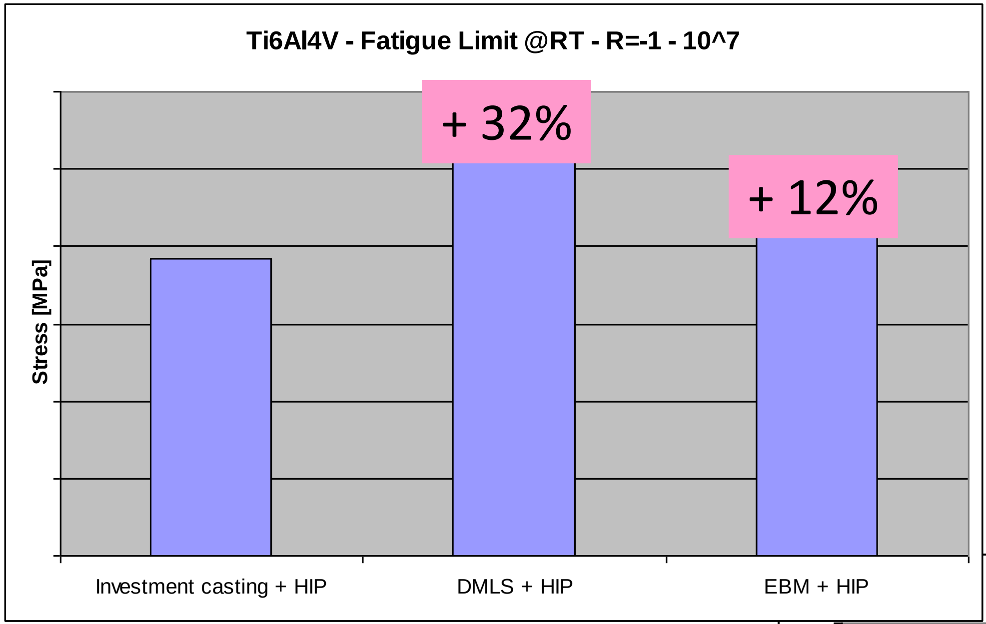
- **Adatto per quasi tutti i materiali ed aperto allo sviluppo di nuovi.**

- **Una mervigliosa tecnologia che perdona gli errori dei progettisti trasformadoli in opportunità di miglioramento di progetto**

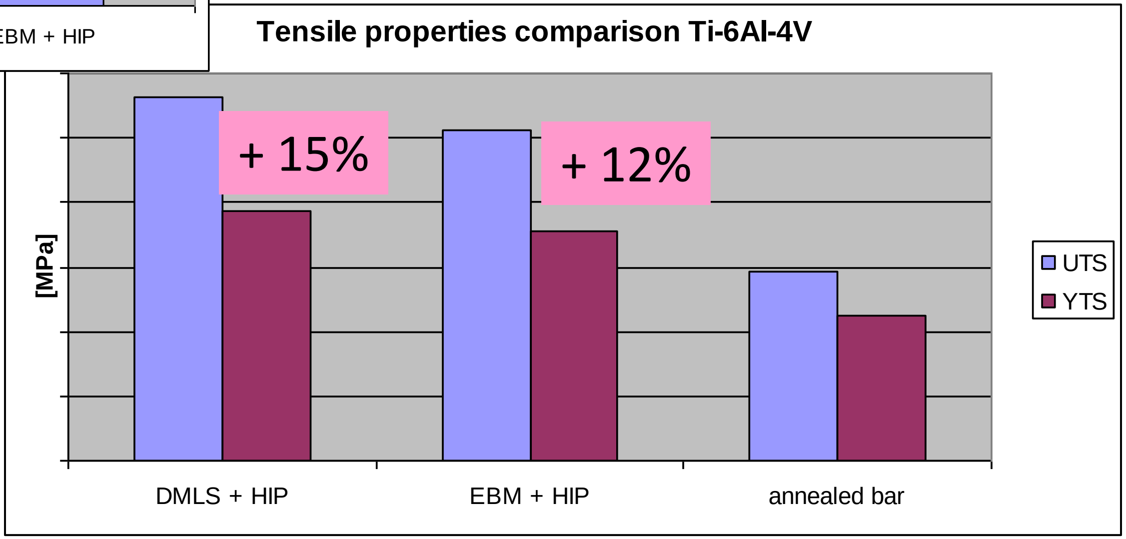
I vantaggi principali

- **Non servono attrezzature di formatura come per esempio in fonderia o in forgia: meno soldi e tempo**
- **Esecuzione rapida: giorni anziché settimane o mesi**
- **Possibilità di ideare forme complesse ma utili, a volte impossibili con altre tecnologie, senza aggravio di costi**
- **Contenimento del WIP**
- **Caratteristiche metallurgiche superiori rispetto alla fusione classica**

Ti-6Al-4V – comparison

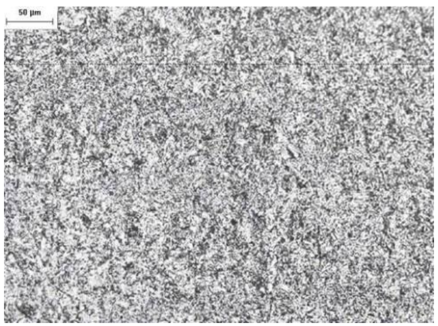


Both processes, EBM and DMLS, generate material properties better than conventional manufacturing routes

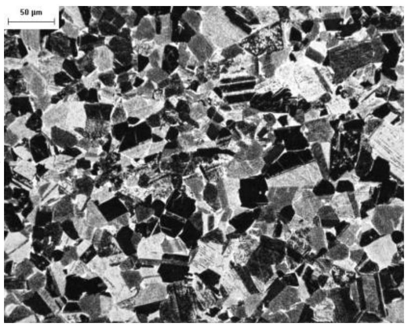


Microstruttura dei materiali

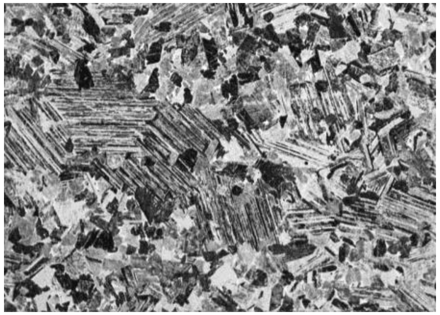
Example on a TiAl alloy



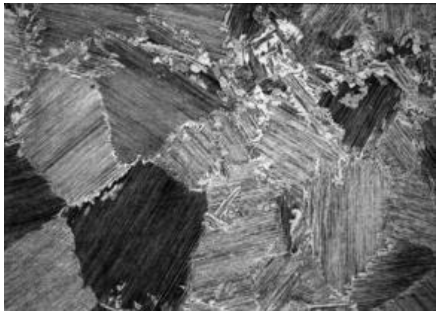
EBM
Equiaxed microstructure
(very fine & uniform grain)



HIP
Equiaxed microstructure
(recristallyzed)



Heat Treatment #1
duplex



Heat Treatment #2
Nearly lamellar

Post-EBM microstructure can be fully tailored through heat treatment, depending on design requirements

Altri vantaggi

Avio Aero
A GE Aviation Business

AM permette di concepire pezzi come unione di più pezzi altrimenti assemblati:

1. **Peso (nessuna guarnizione, viti, dadi, flange)**
2. **Costo (come sopra + risparmio sulle lavorazioni delle parti accoppiate, brasatura e/o saldatura)**
3. **Affidabilità (meno parti significa meno punti di guasto)**
4. **Sicurezza (es. evitare trafilamenti pericolosi da giunti o saldature)**

MA

- **Bisogna usare un solo materiale per tutte le parti**
- **I requisiti di sicurezza vengono applicati all'oggetto integrale anziché solo ad una parte**
- **La manutenzione deve essere attentamente considerata (la riparazione vs sostituzione può imporre dei vincoli)**

AM permette di allocare il materiale direttamente solo dove serve invece di rimuoverlo e solo dove questo è possibile e/o economicamente ancora vantaggioso

Progetto a rigidezza:

- **Aggiungere irrigidimenti tanti quanto necessario**
- **Usare sezioni ad elevato momento di inerzia non importa quanto complesse e non convenzionali**
- **Riconsiderare l'uso di materiali diversi per migliorare il rapporto prestazioni costo**
- **…..**

Progetto per resistenza:

- **Sfruttare le migliori caratteristiche dei pezzi prodotti con AM**
- **Disporre il materiale solo dove lavora realmente**
- **……**

MA

Progettare intorno alla capability del processo AM

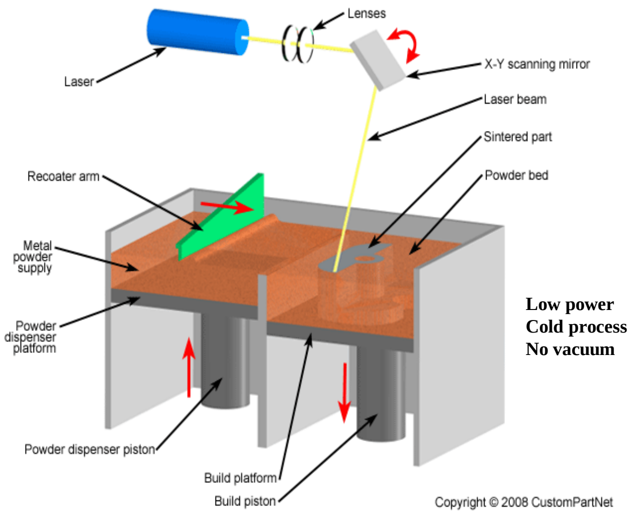
- **Evitare ove possibile sbalzi e sottosquadri maggiori di 45-55° rispetto all'asse di accrescimento (30° per DMLM)**
- **Incorporare i supporti come parti integrali della struttura (e quindi non rimuoverli)**
- **Verificare il reale requisito di rugosità, la condizione «as cast» è simile alla microfusione per DMLS o alla fusione in sabbia per EBM**
- **La capability dimensionale è vicina a quella della microfusione per DMLS o addirttura migliore della fusione in sabbia per EBM**
- **Le dimensioni delle macchine sono ancora un problema per ora; considerarle fin dall'inizio del progetto, alcune parti non entrano per pochi mm!**
- **Come alternativa considerare la saldatura di componenti separati; applicata con successo su parti in Ti6Al4V**

Vantaggi collaterali

AM è una tecnologia «verde dentro», infatti:

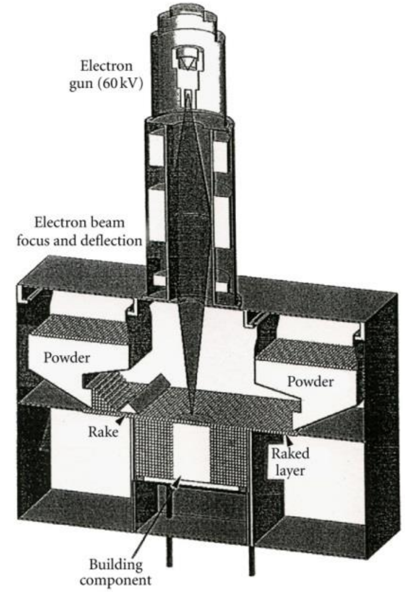
- **Usa pochissima energia per generare il pezzo perché fonde e riscalda solo quello che serve**
- **Usa poco materiale perché la polvere non utilizzata viene riutilizzata nel giro successivo, i supporti sono spesso pari al 10% del peso netto venduto**
- **Usa solo gas inerti (N_2, Ar, He) che ritornano nell'atmosfera da dove furono catturati, non usa altre sostanze inquinanti e/o tossiche**
- **Richiede meno «impronta» e quindi stabilimenti più contenuti con meno spese di condizionamento**

EBM vs DMLS



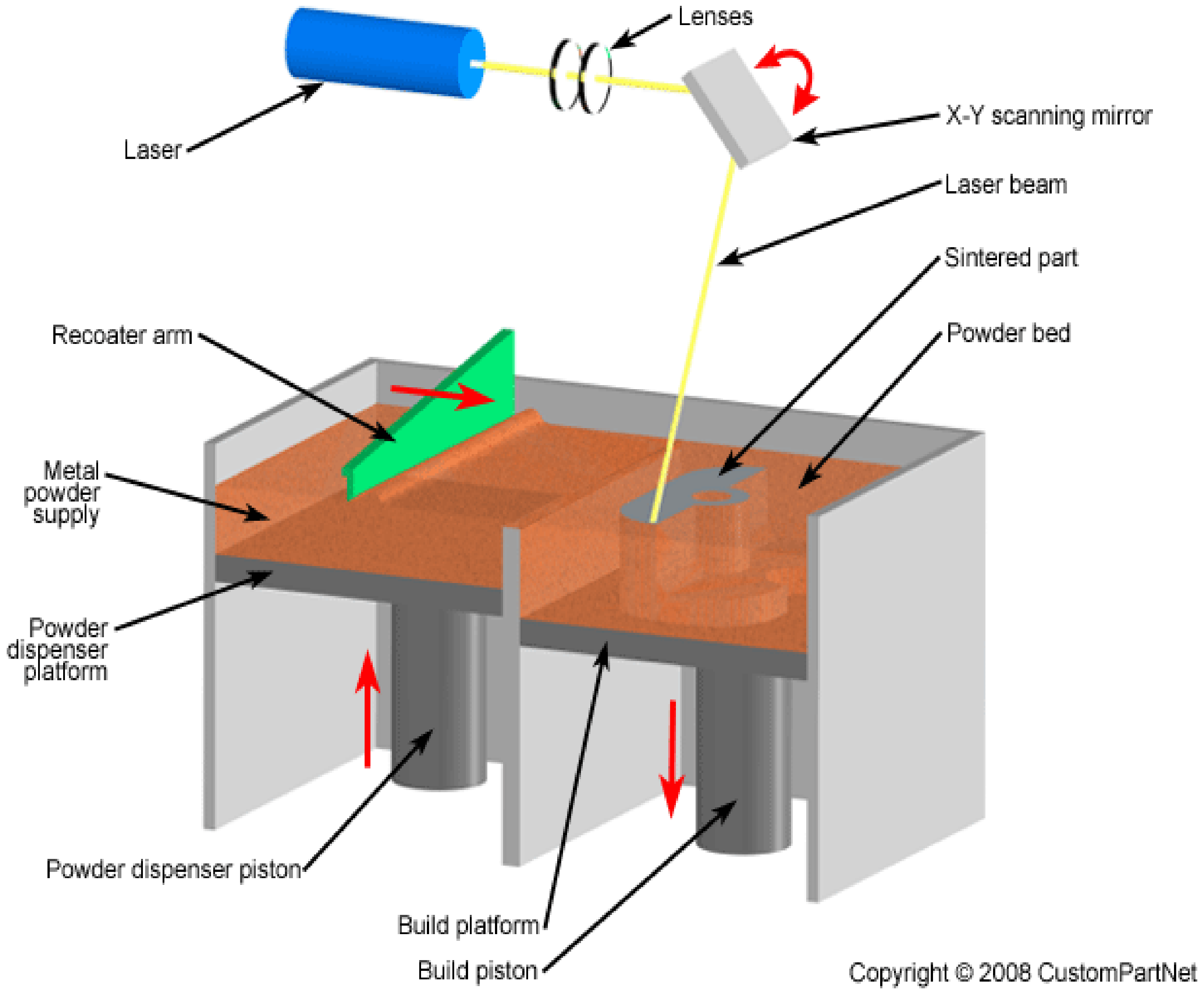
Low power
Cold process
No vacuum

- ❑ Non reflecting material only
- ❑ Close to forgings' microstructure and thermo-mechanical characteristics
- ❑ Complex geometries (1-piece concept)
- ❑ Tolerance capabilities are dependent on geometry (from ± .002" to ± .008")
- ❑ Surface roughness Ra 4 μ
- ❑ No tools required
- ❑ High technology content / low labour content
- ❑ Manufacturing lead time reduction



- ❑ Electrical conductive materials only
- ❑ Good material properties; no typical casting defects
- ❑ No limitations in chemical composition
- ❑ Tolerance capabilities are dependent on geometry (about ± .01")
- ❑ Surface roughness Ra 10 μ
- ❑ Free-form manufacturing, complex geometries
- ❑ No tools required
- ❑ High technology content / low labour content
- ❑ Manufacturing lead time reduction

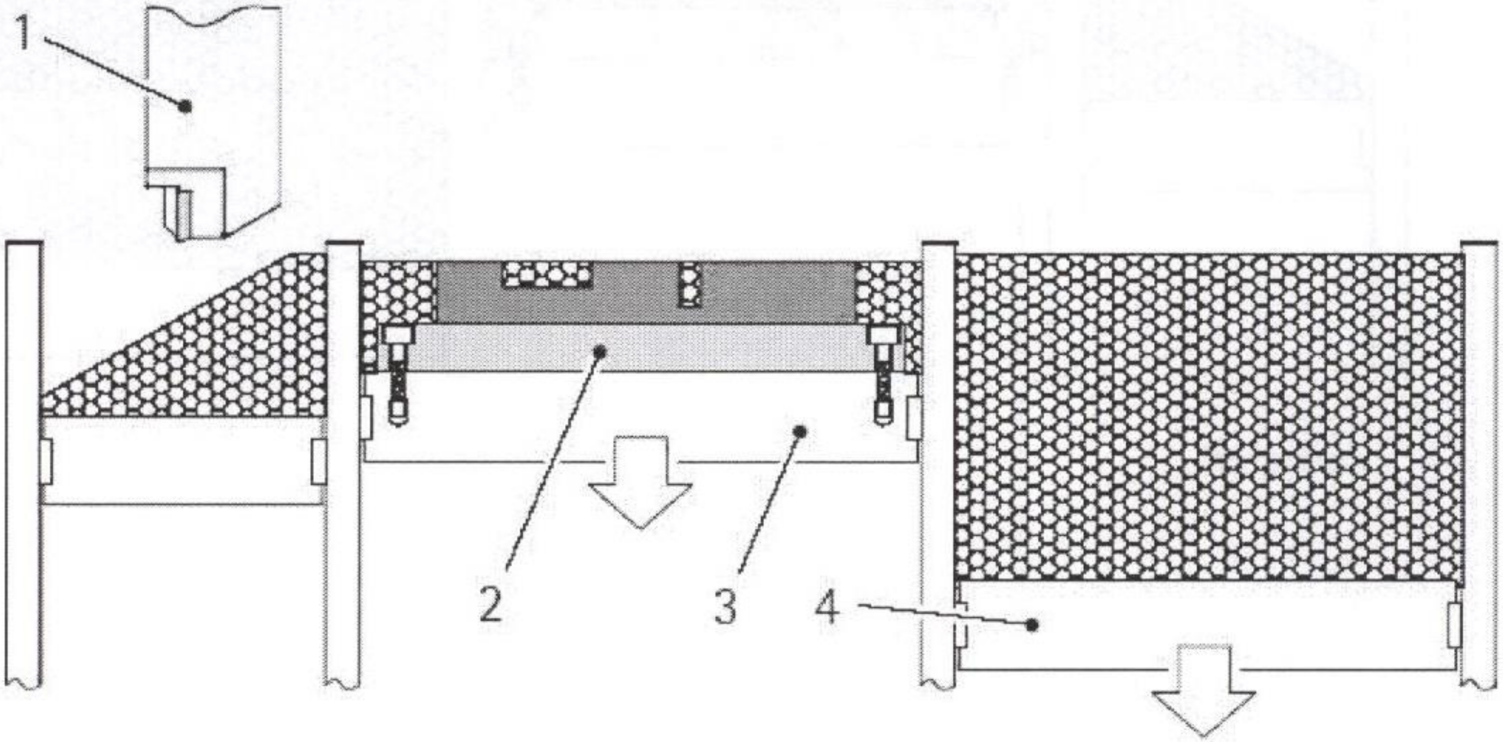
The deposition process



The deposition process DMLS

Lower building platform

The building platform is lowered by one layer thickness for the next exposure.
The dispenser platform is also lowered so that recoater can move to the right end position without collision.



1 Recoater

2 Building platform

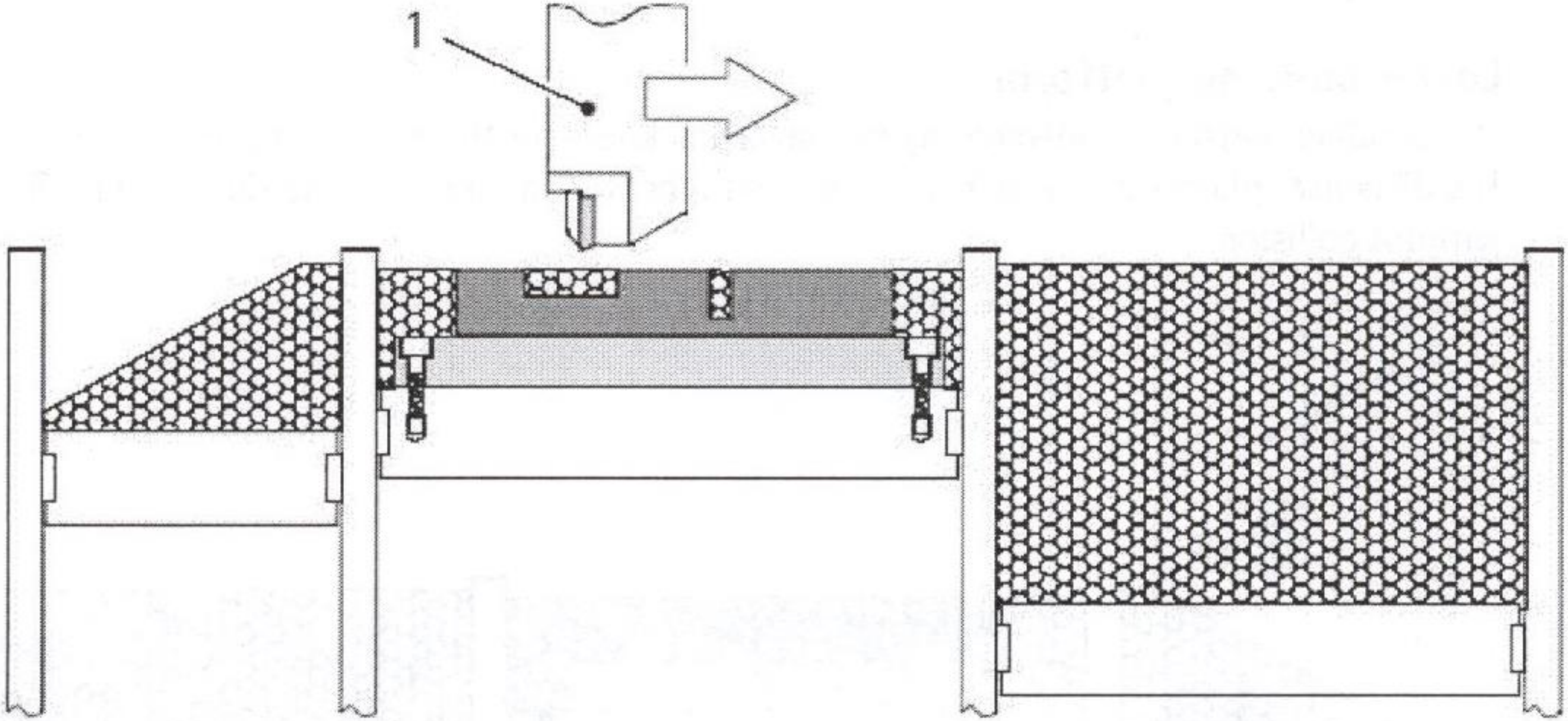
3 Building platform carrier

4 Dispenser platform

The deposition process DMLS

Move recoater

The recoater moves from the left end position to the right end position.

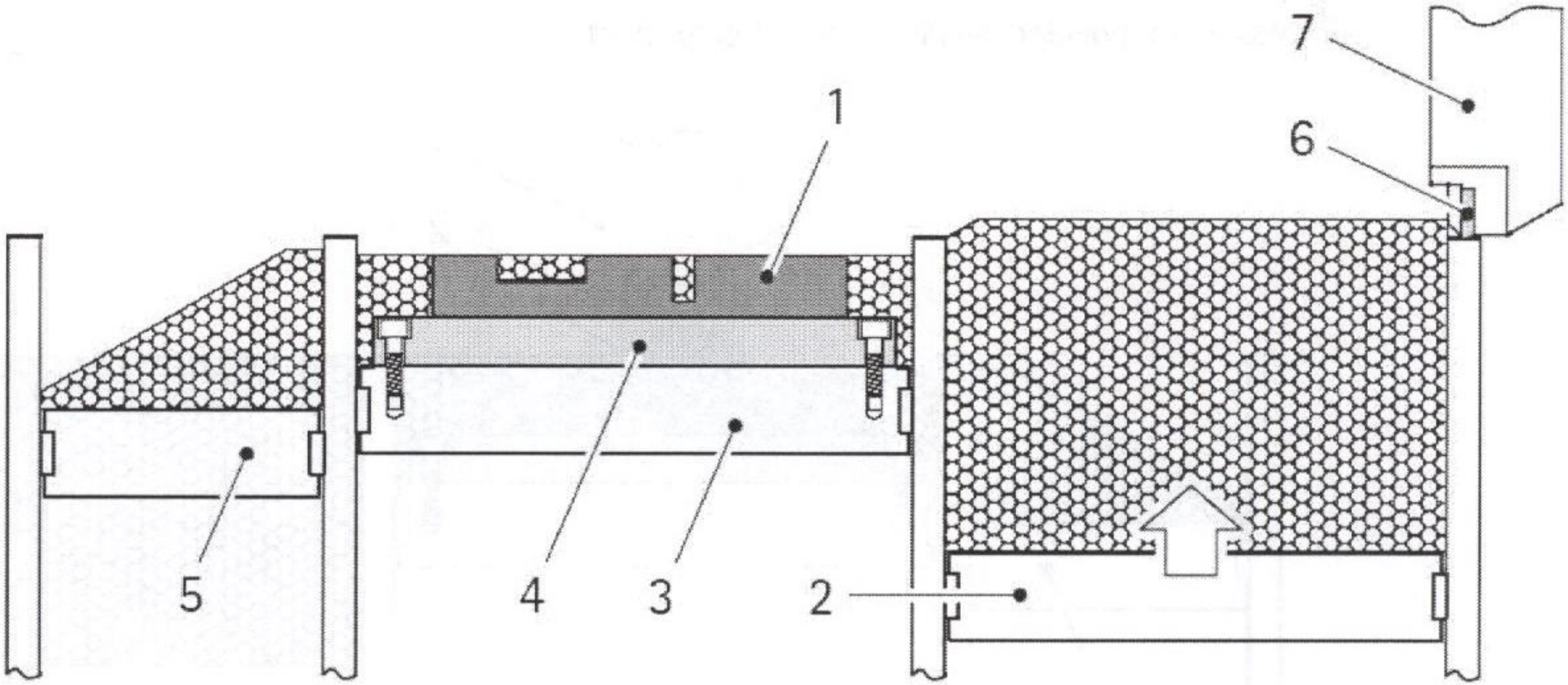


1 Recoater

The deposition process DMLS

Recoating of metal powder

Recoater stands in the right end position. Raising the dispensor platform in order to supply a defined amount of powder for th next layer.

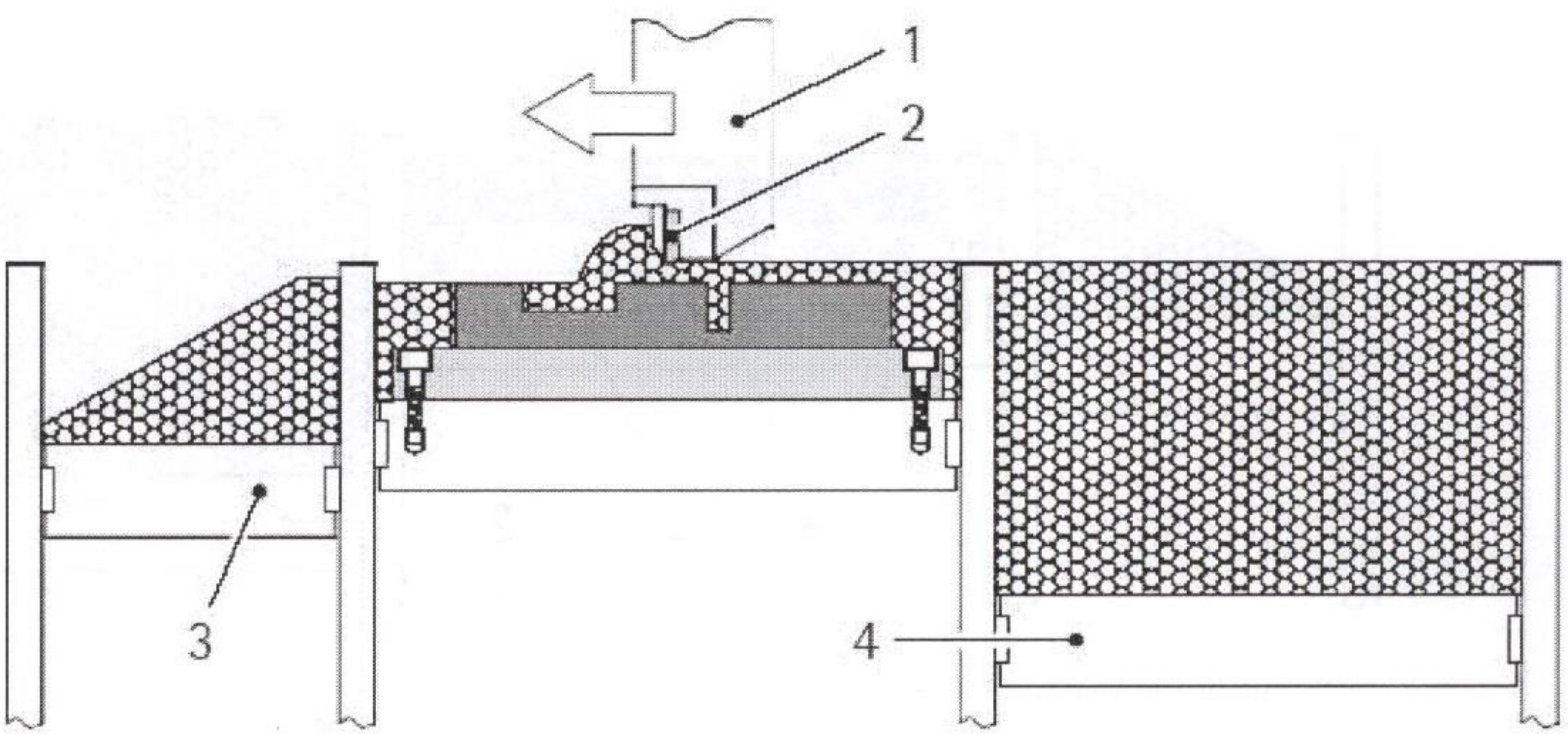


The deposition process DMLS

Avio Aero
A GE Aviation Business

Recoat

The recoater moves to the left end position. During this movement it pushes the metal powder protruding from the dispenser duct over the building area and in this way applies a new, thin layer of loose metal powder.
Excess metal powder falls into the collector duct.



Il processo descritto è tipico delle macchine EOS delle serie M2XX; quali sono i miglioramenti, con riferimento ai tempi, che potete immaginare?

- Il tempo di «recoating» è proporzionale all'aumento dell'area spazzata nel senso del movimento
- Il «recoating» è suddiviso in due fasi: andata (tempo attivo) ritorno (tempo passivo)
- Tutte le fasi inclusi i movimenti delle piattaforme sono sequenziali

Con l'aumentare delle dimensioni X-Y i tempi morti diventano sempre più importanti

The deposition process EBM

Electronic Gun

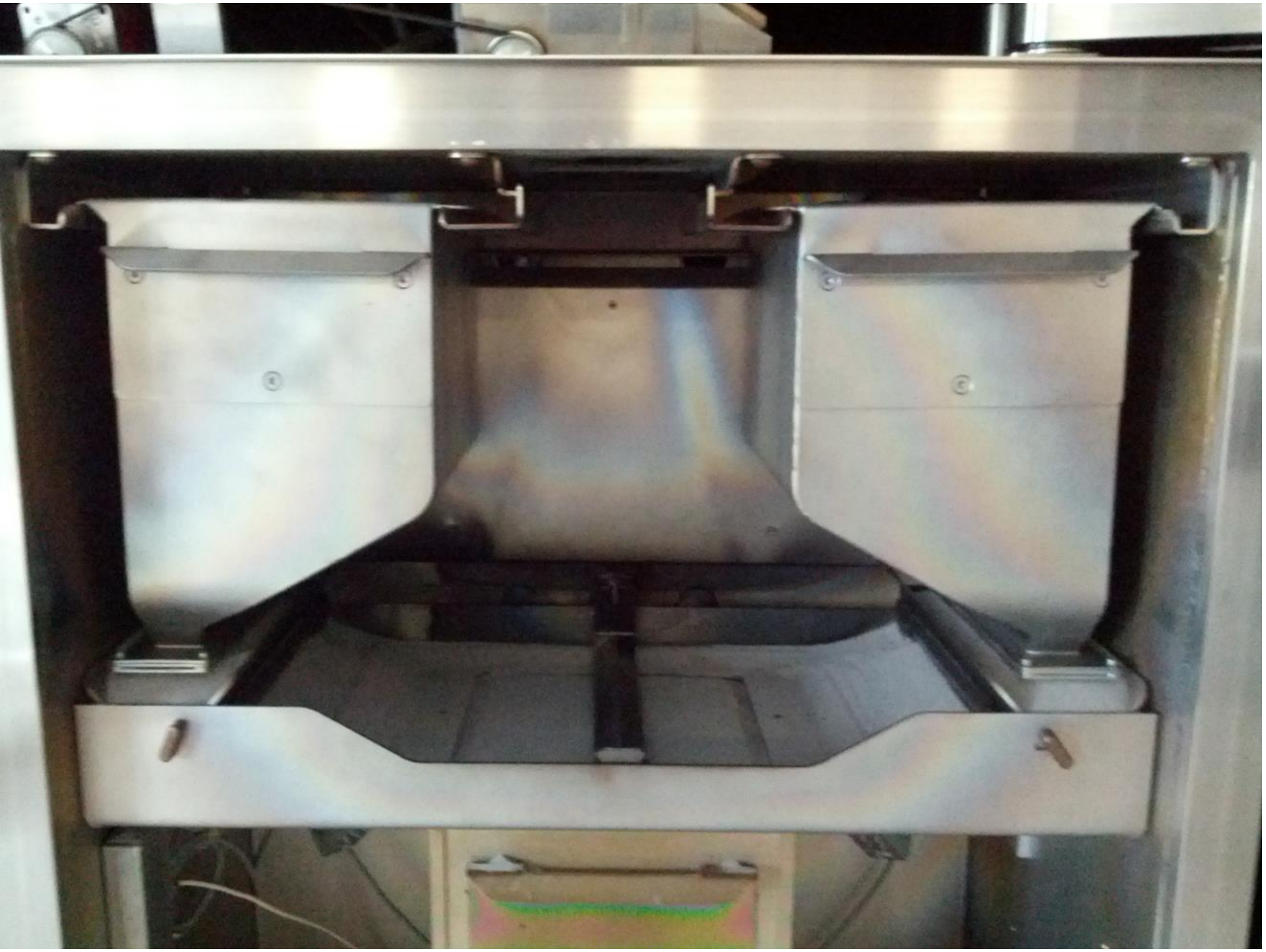
Powder Tanks

Recoater

Excess Powder Sensors

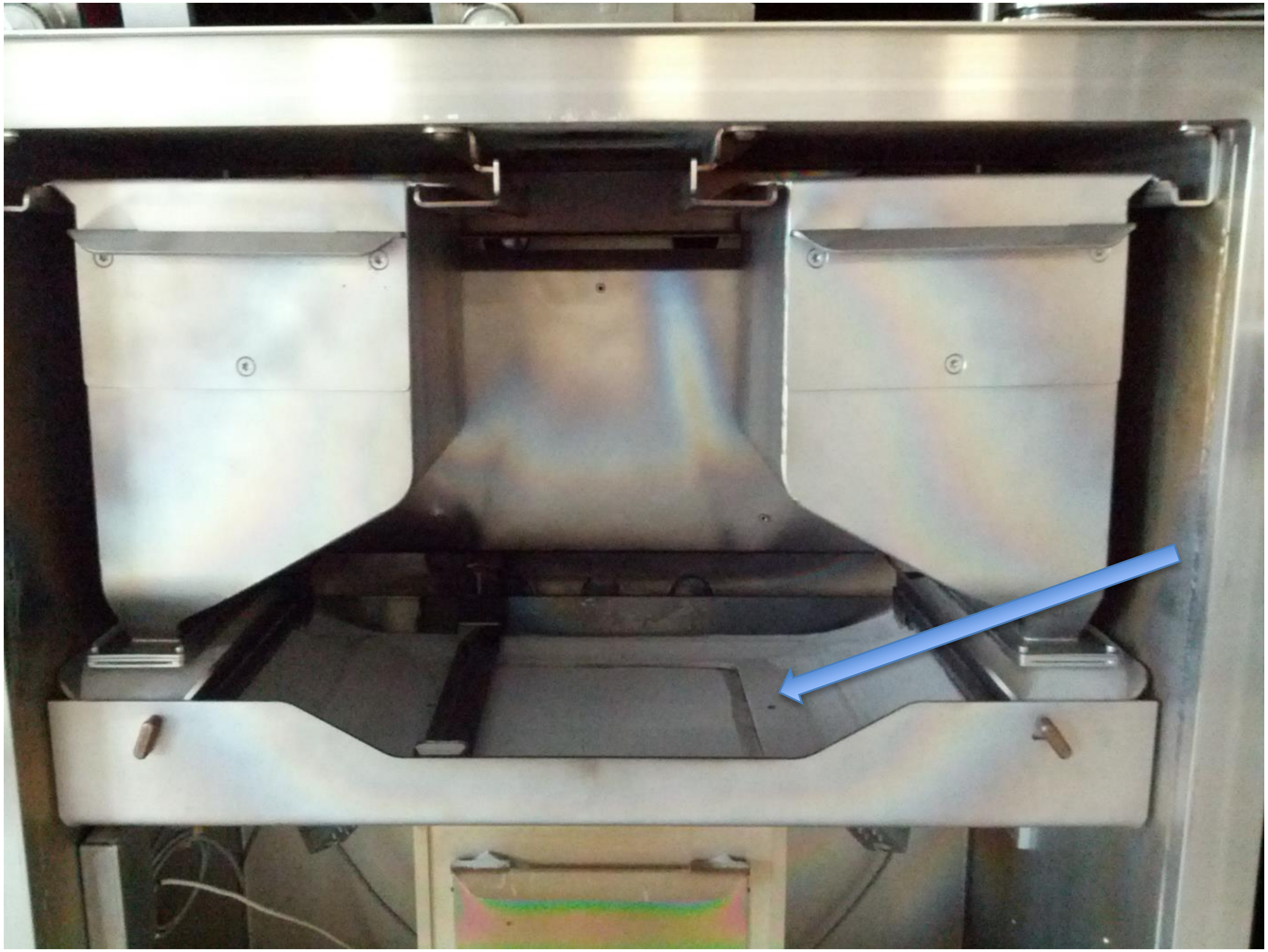
Build Tank

The deposition process EBM



Recoater strokes 3 times:
2 forth and 1 back

The deposition process EBM



Holes capture excess powder

Il processo descritto è tipico delle macchine ARCAM quali sono i miglioramenti, con riferimento ai tempi, che potete immaginare?

- Il tempo di «recoating» è proporzionale all'aumento dell'area spazzata nel senso del movimento
- Il «recoating» è suddiviso in tre fasi: tutte attive ?
- Tutte le fasi inclusi i movimenti delle piattaforme sono sequenziali

Con l'aumentare delle dimensioni X-Y i tempi morti diventano sempre più importanti

The deposition process

Build tank dimensions available:

EOS 270 250x250x270 (with 50mm plate)

EOS 280 250x250x320 (with 50mm plate)

___

A2 210x210x300 or dia 300 x 200

A2X 210x210x400* (plate thickhnes to be adapted for near max. height)

*AA only feature

The deposition process time is directly proportional to the build volume heigth

Build layer thicness usable:

EOS 270 20 or 40 microns (material spec sensitive)

EOS 280 20, 30, 40 50 microns (material and laser power sensitive)

A2 50,70, 90, 120, 180 tested on Ti64

A2X as above plus 90 and 180 for TiAl alloys

The deposition process time is inversely proportional to the layer thickness selected

The deposition process

Avio Aero
A GE Aviation Business

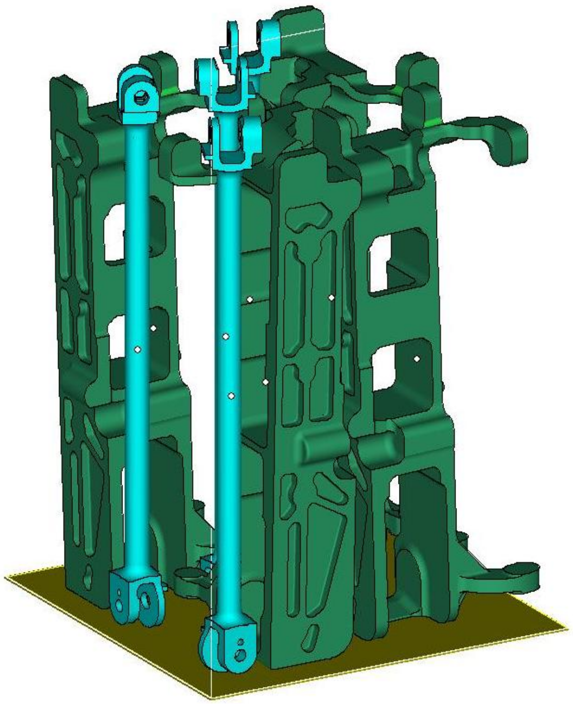
Available combination of materials, layer thickness and laser power

Materiale	20 um + Editor	30 um + Editor	40 um + Editor	50 um + Editor
17-4PH	@200 W		@200 W	
CoCrMo7	@200 W		@ 400 W	@ 400 W
I718	@200 W		@ 400 W	@ 400W
Hastelloy	@200 W		@400 W	
AlSi10Mg		@400 W		
Ti6Al4V		@400 W		

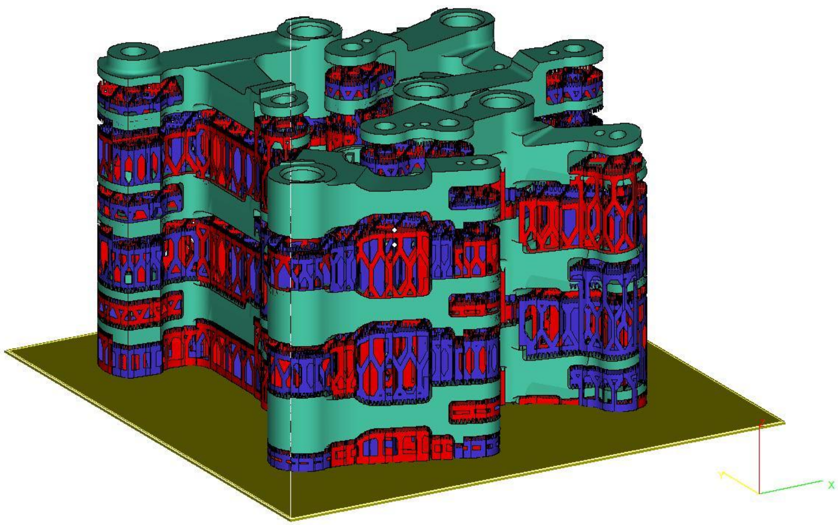
NOTE 1: 400 Watt available on EOS 280 only

The deposition process

- The deposition time must be considered like a machine set up
- Once filled, use the build volume to fill it with the maximun number of pieces
- Different P/N can be used to fill the build volume



Typical DMLS strategy



Typical EBM strategy

The deposition process

- Layer thickness influence the surface roughness
- Process influece the roughness
- Surface roughnes (zoning) is influenced by part attitude within the build envelope

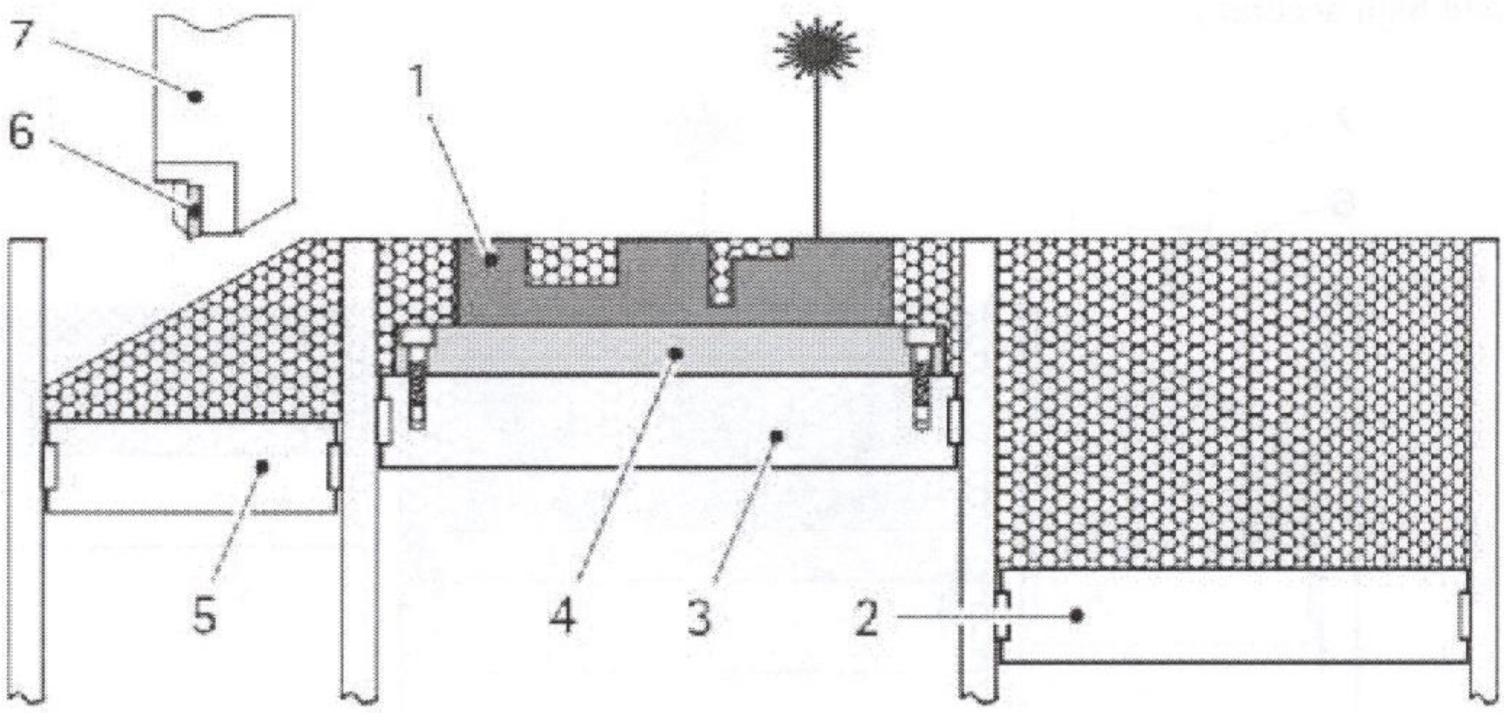
DMLS best roughness value is 4 Ra layer thikness 20 micron on nearly vertical surfaces
EBM best roughness value is 10 Ra layer thikness 50 micron on nearly vertical surfaces
(values meaured after standard cleaning and light blasting)

Balance as cast surface roughness requirements with the build time and cost.
Often a surface post processing is cheaper and more effective than a tight AM process requirement alone.
(consider sand blasting, manual smoothing, tumbling, extrude honing, ECM, …..)

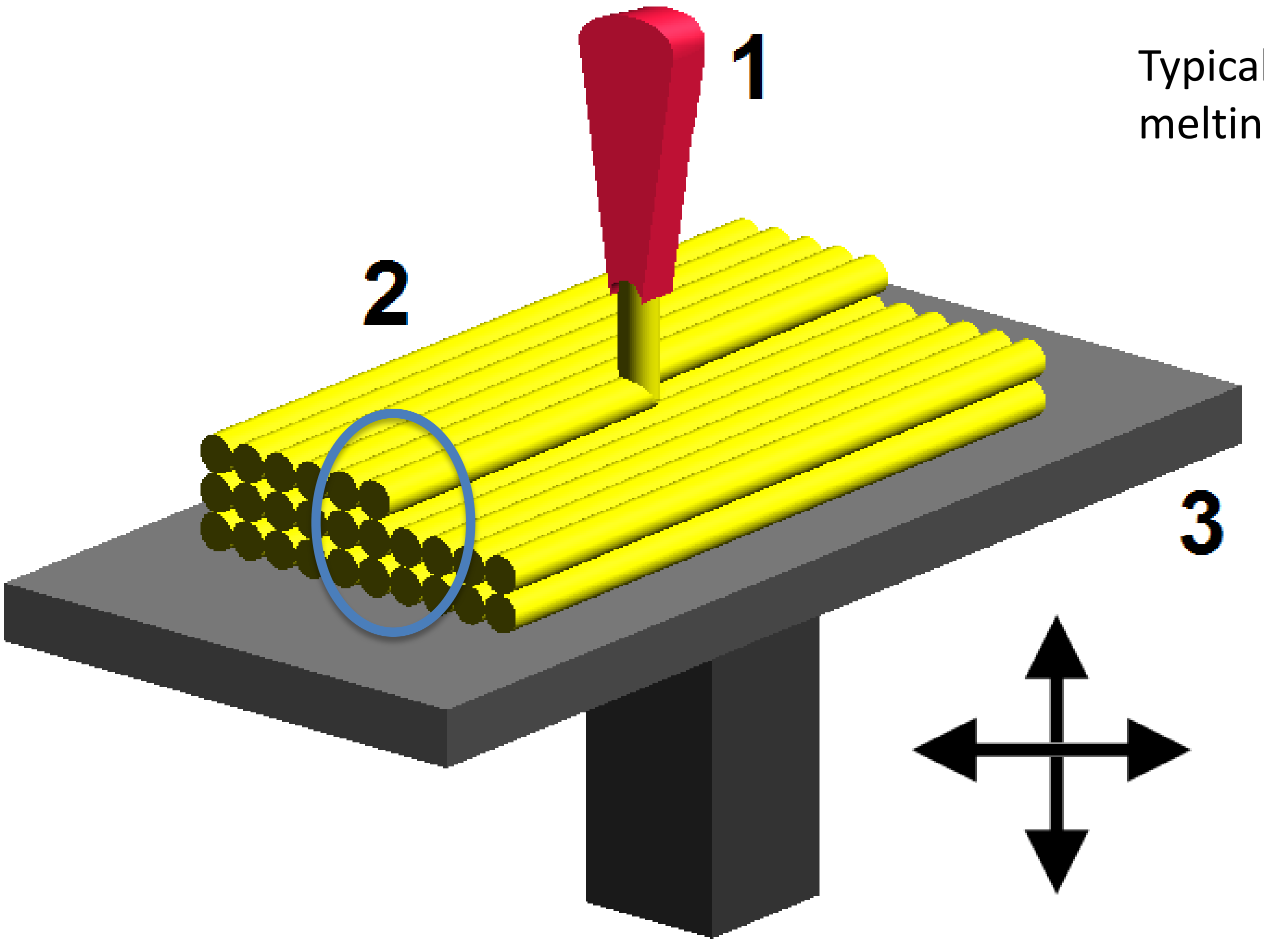
NOTE: not always a faster build volume fill time results in a faster total process time especially with EBM (see the EBM melting process)

Exposure

The Home-In-Scanner move the laser beam on defined tracks during exposure. The laser is switched on and off precisely during exosure of designated building areas.
Wherever the laser expose metal powder, it will cause a local absorption of radioation energy. The former loose powder will be cured and sintered to the already solidified areas below.

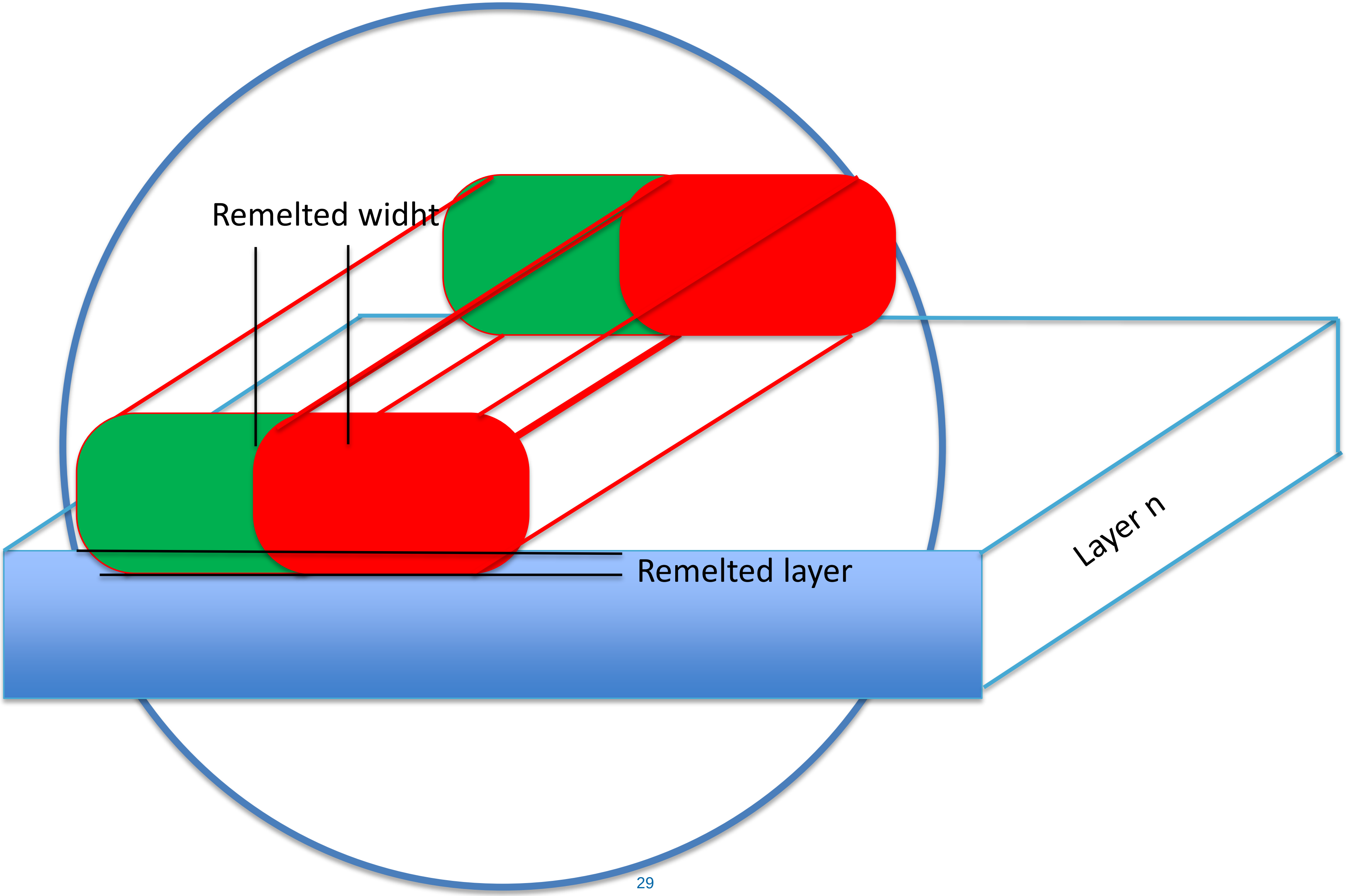


The melting process DMLS

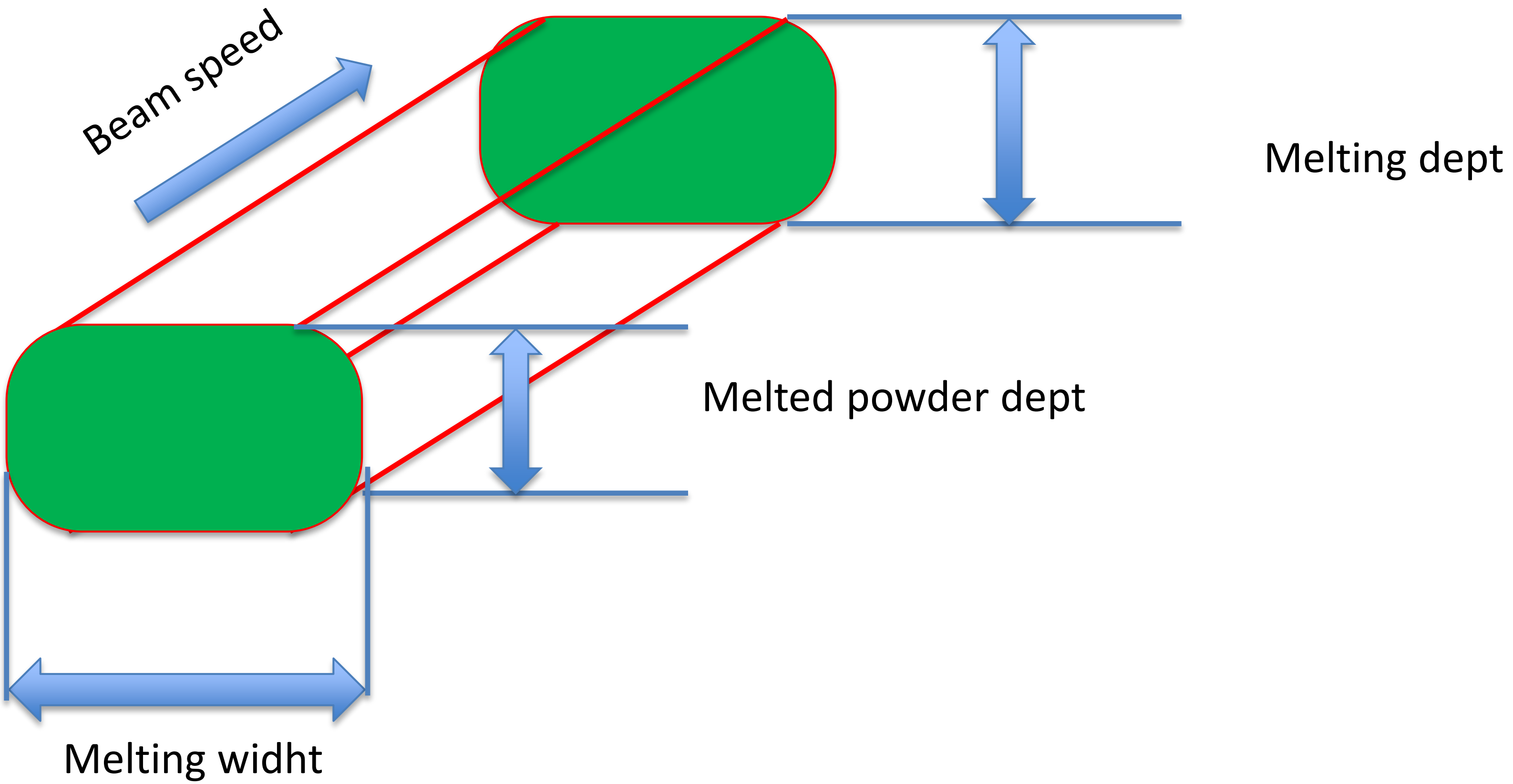


Typical cross hatching melting pattern

The melting process DMLS



The melting process DMLS



The melting process DMLS

Melting widht X Melting depth x beam speed x metal heat capacity

↓

Beam power

(Melting volume – Remelted volume) x beam speed

↓

Build speed

The melting process DMLS

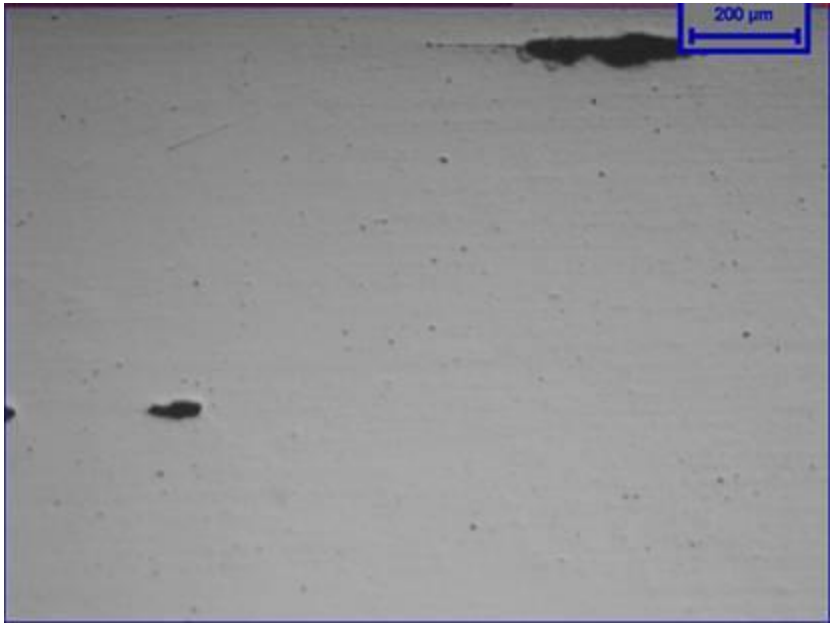
Powder layer Thickness/layer thickness = powder apparent density

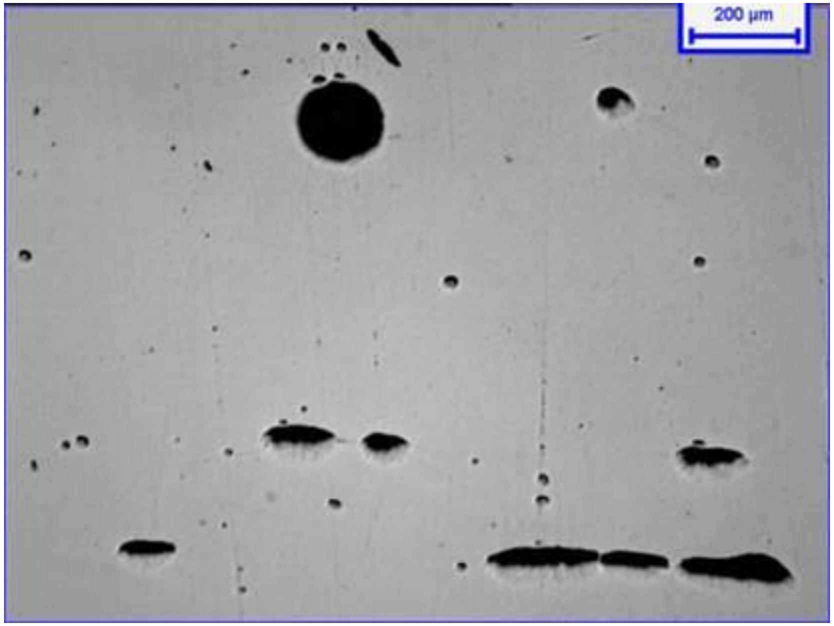
powder density/metal density

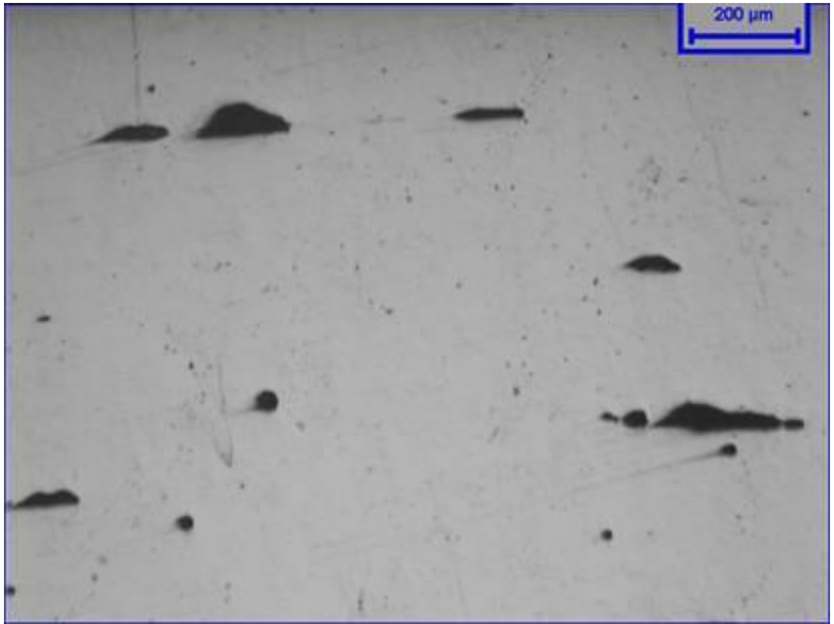
The melting process EBM

Filmato

The melting process







EBM TiAl:
typical defects of a not optimized «theme»

Un processo di AM ottimizzato e congelato fornisce caratteristiche metallurgiche nettamente migliori di una fusione equivalente con imperfezioni nettamente migliori ed in alcuni casi assenti

Difettosità	Fusione	AM laser	AM EBM
Inclusioni (sabbia o ceramica)	presenti	assenti	assenti
Ritiri	compensabili	assenti	assenti
Deformazioni	compensabili	compensabili	assenti
Stabilità dimensionale	variabile	compensabile	eccellente
Spugnosità	presente	assenti	assenti
Giunti freddi	presenti	assenti	assenti
Fusione incompleta	NA	compensabile	compensabile
Porosità localizzata	presente	assente	assente
Microporosità diffusa	presente (alta)	presente (bassa)	presente (bassa)

The growth strategy

Avio Aero
A GE Aviation Business

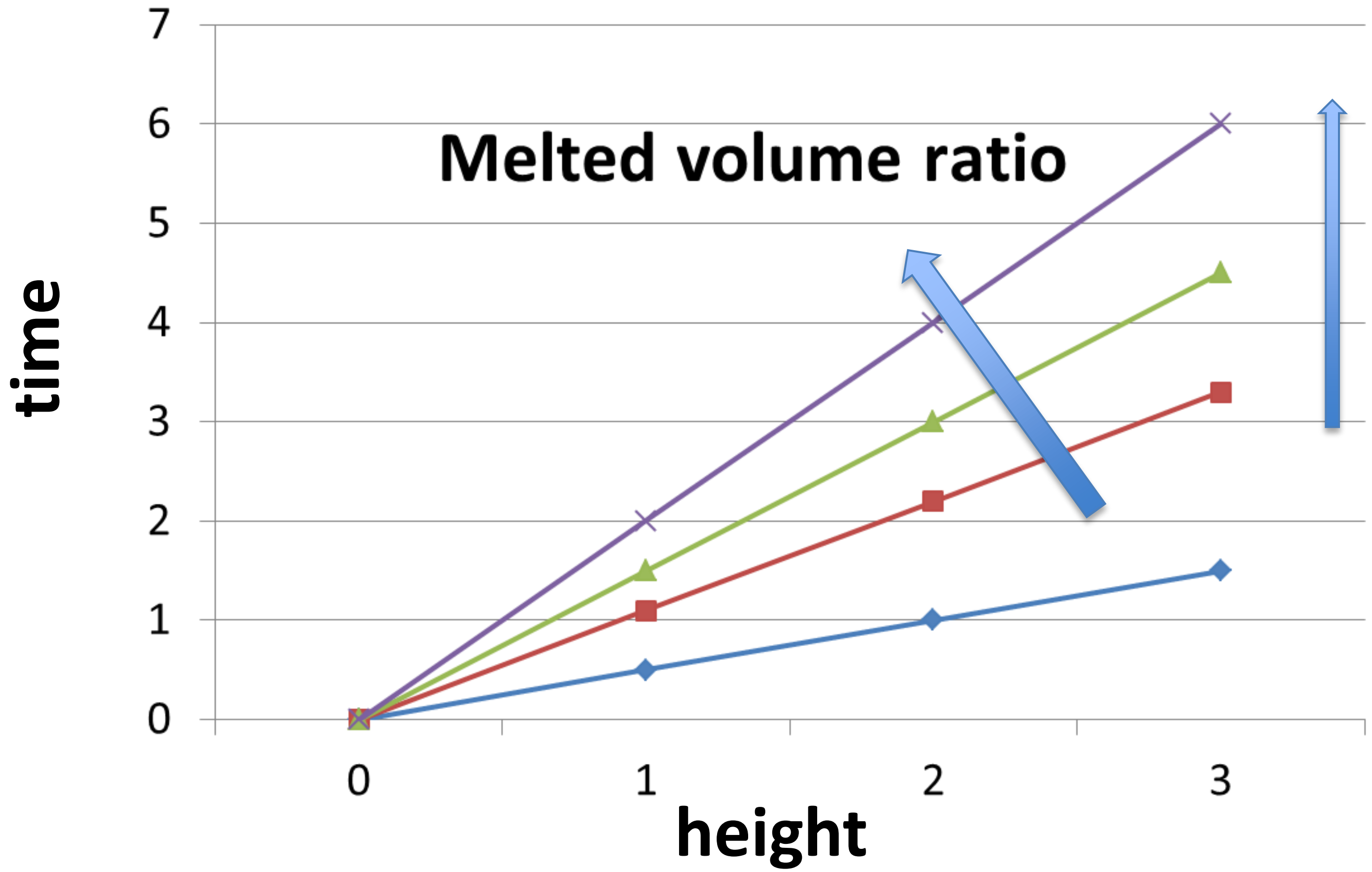
Growth axis is the vertical «z» axis
The growth stategy is chosen:

1. **To optimize the build time and cost**
2. **To minimize supports**
3. **To allow the correct clean up from support and excess powder removal**
4. **To minimize thermal distorsions (DMLM, maily)**
5. **To fill the build volume as much as one can (job saturation)**
6. **To accomodate oversized components**

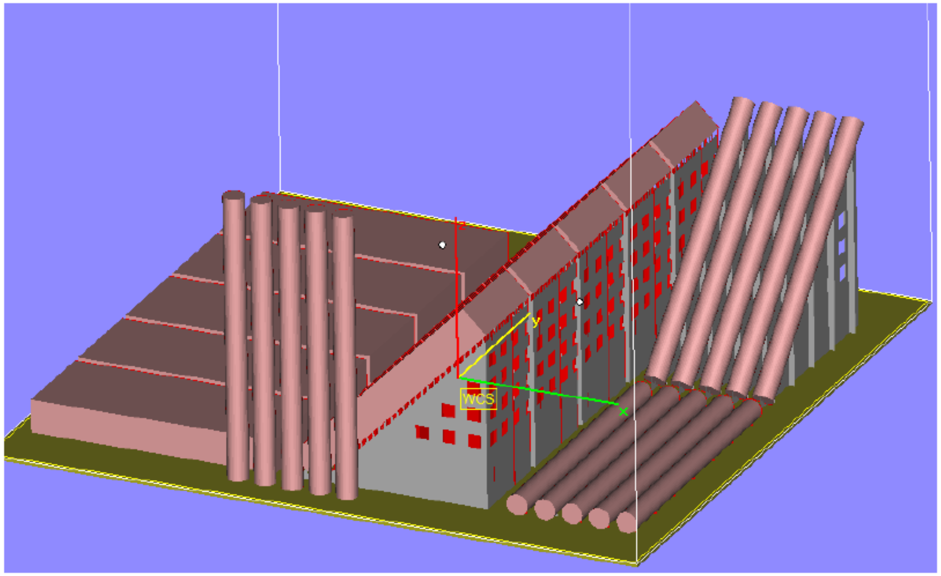
The compromise is heavily geometry dependant and is the rule

Avio Aero
A GE Aviation Business

Fill time is directly proportional to the height
Build time is proportional to melted volume
(Melted volume ratio influence is strongly not linear)



Horizontal arrangement is cheaper than vertical



BUT

X-Y contraction and dilatation are more severe for deformation and cracks

38

SO

Build a forest instead of a woodpile

The Thermal Balance (EBM)

Avio Aero
A GE Aviation Business

$$T''(x,y,z,t) = T_{swf} + \sum_{j=1}^{j=M} T_{0_j} + \sum_{j=1}^{j=M} \frac{1}{(4\pi D(t-t_j))^{3/2}} \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{0} \left(\exp\left(-\frac{(z-z')^2}{4D(t-t_j)}\right) + \exp\left(-\frac{(z+z')^2}{4D(t-t_j)}\right)\right)$$

$$\exp\left(-\frac{(y-y')^2}{4D(t-t_j)}\right)\exp\left(-\frac{(x-x')^2}{4D(t-t_j)}\right)\sum_{k_j=1}^{k_j=K_j}\sum_{i=1}^{i=N^j_{k_j}} A_i^j \exp\left(-\left(d_{x_i}^{k_j}\right)^2/\sigma_{x_i}^j\right)\exp\left(-\left(d_{y_i}^{k_j}\right)^2/\sigma_{y_i}^j\right)$$

$$\exp\left(-z'^2/\sigma_{z_i}^j\right)dz'\,dy'\,dx' - T_{0_j} = T_{swf} + \sum_{j=1}^{j=M}\frac{1}{(4\pi D(t-t_j))^{3/2}}\sum_{k_j=1}^{k_j=K_j}\sum_{i=1}^{i=N^j_k} A_i^j I_z^{ij} I_x^{ij} I_y^{ij}$$

Very simple is'nt it?

Note the 4's that indicate the influence of losses of heat for radiation
In DMLS these terms are neglected since small, but replaced by convection….

40

Applicable Materials

Avio Aero
A GE Aviation Business

Electron Beam Melting - EBM
(max dimensions 200x200x350 mm in z)
(alternatively Diam. 300 mm x 200 mm in z)
Electrical conductive materials only

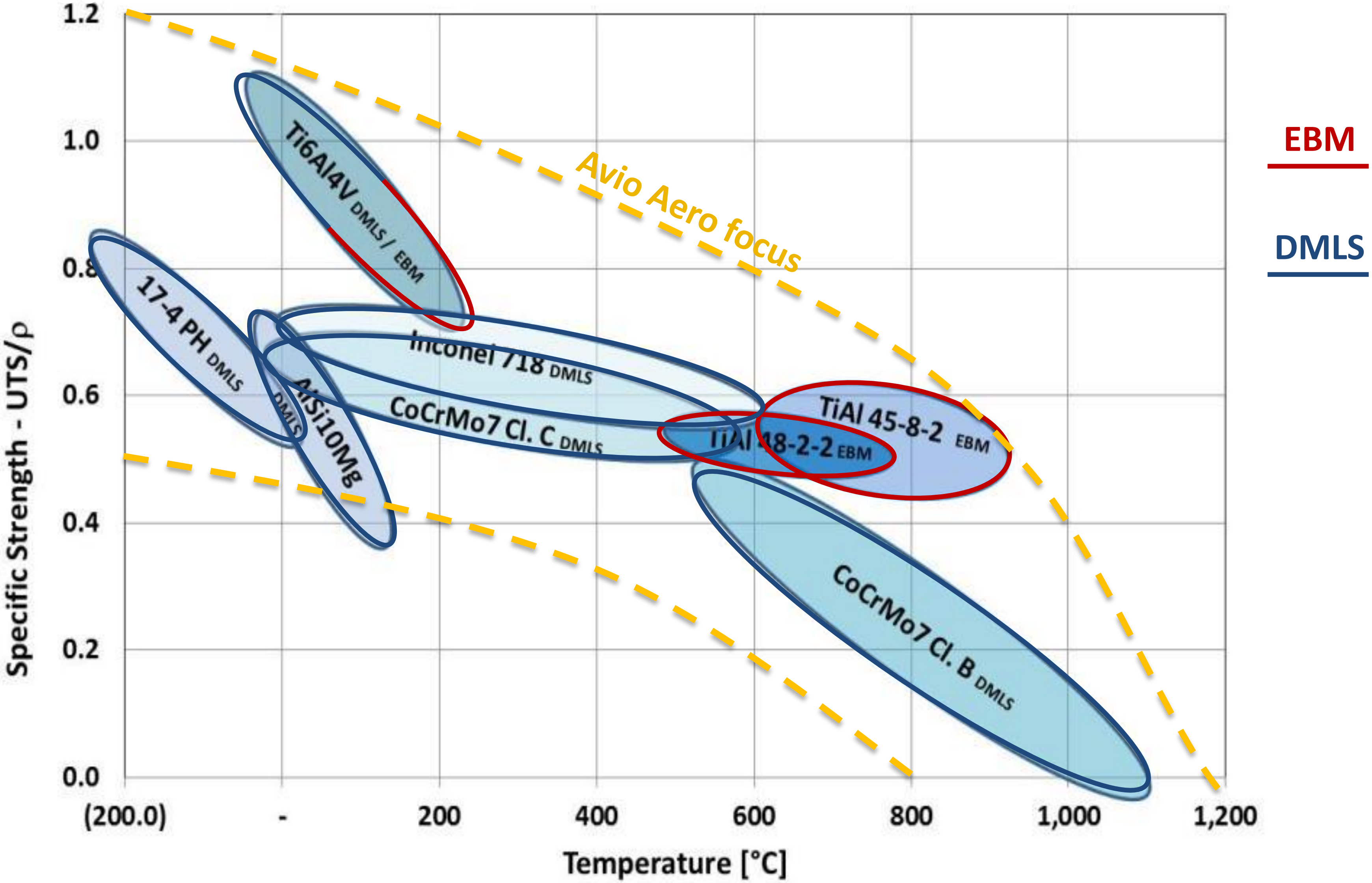
- **Ti6Al4V**
- **TiAl 48-2-2**
- **TiAl high Nb**
- **TNM**
- **CoCrMo7**
- **Rene 80**
- **INCO 718**

Direct Metal Laser Sintering - DMLS
(max dimensions 250x250x320 mm in z)
Not reflecting materials only

- **17-4PH**
- **CoCrMo7**
- **Ti6Al4V**
- **IN718**
- **IN625**
- **Hastelloy X**
- **AlSi10Mg**
- **A357**

Avio Aero masters a number of different materials leveraging the two technologies

Avio Aero
A GE Aviation Business



ESEMPI

43

Pale per LPT in TiAl

Experience on EBM

Complex geometries

Conventional Manufacturing

This geometry cannot be produced by conventional manufacturing processes (e.g. investment casting)

Additive Manufacturing

Flight Tests successfully completed

2/3 application already in production

Product: Deoiler

Technology: EBM

Material: Ti-6Al-4V

Lead Time & cost reduction

CFR components (fire issue)

Conventional Manufacturing (sheet metal)

5 months LT

Product: Air ducts

Technology: EBM

Material: Ti-6Al-4V

Additive Manufacturing

5 days LT

Replaces CFR components (fire issue)

Thin wall (1mm)

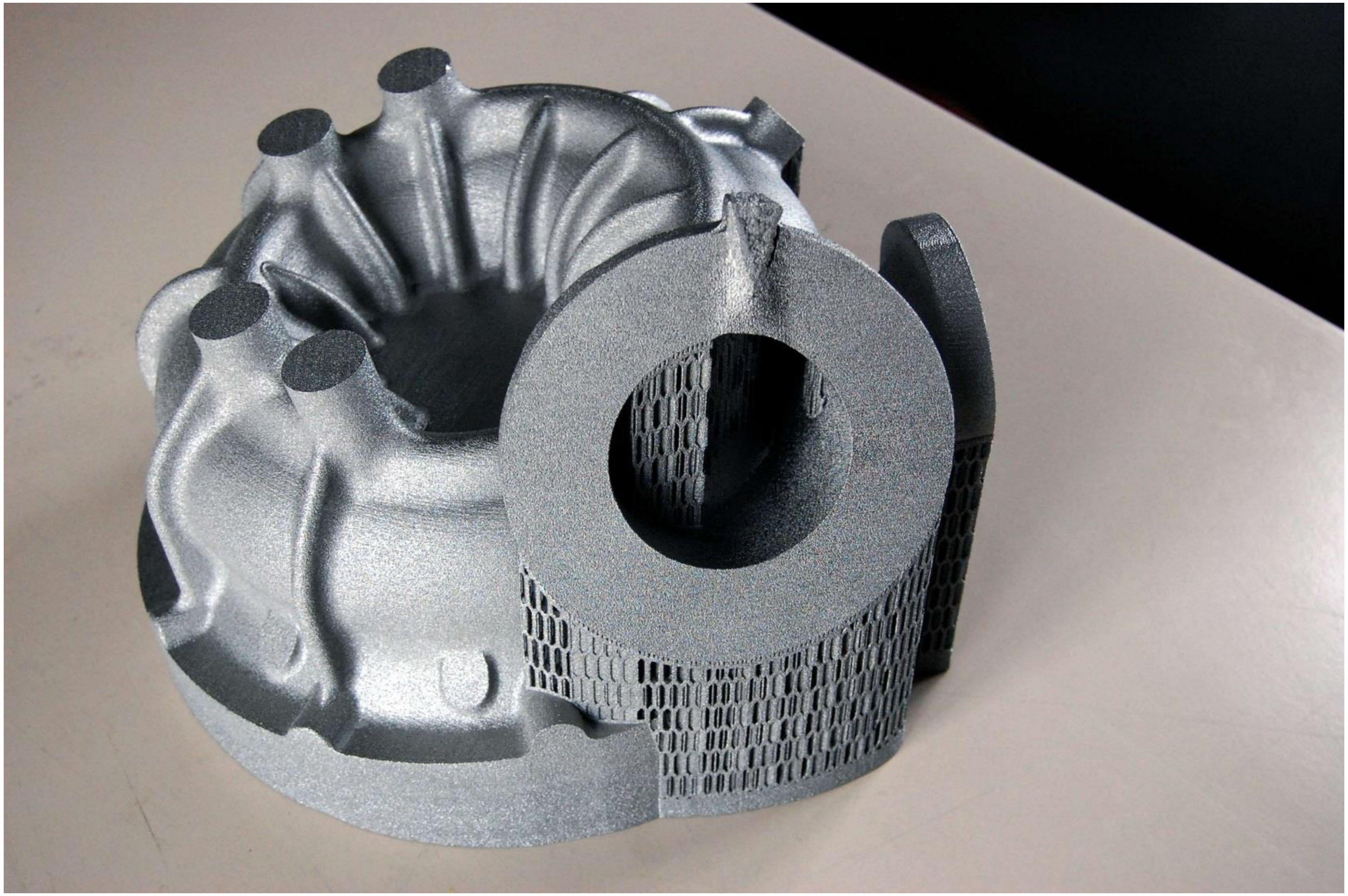
1 kit/job

Cost competitive, full production today

40 kits/year

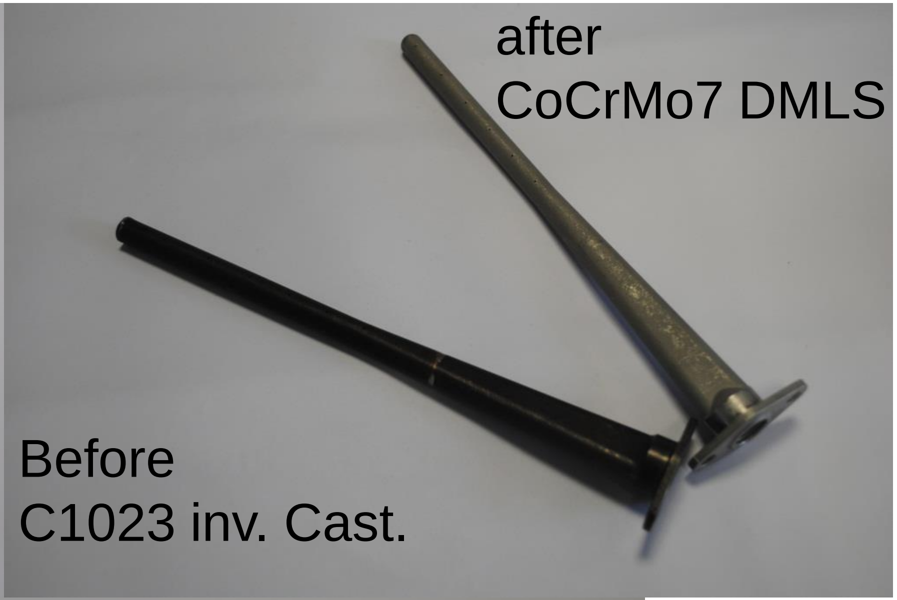
TOM Vinci demo, Ti6Al4V

Avio Aero
A GE Aviation Business

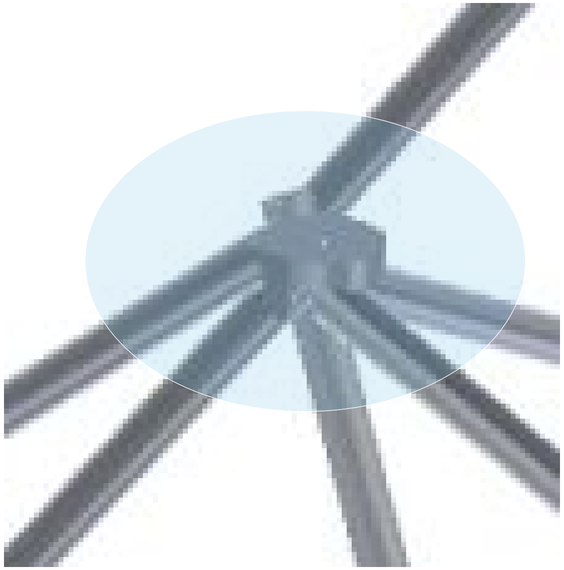


FLPP, impeller DMLS INCO 718

Componenti Combustore



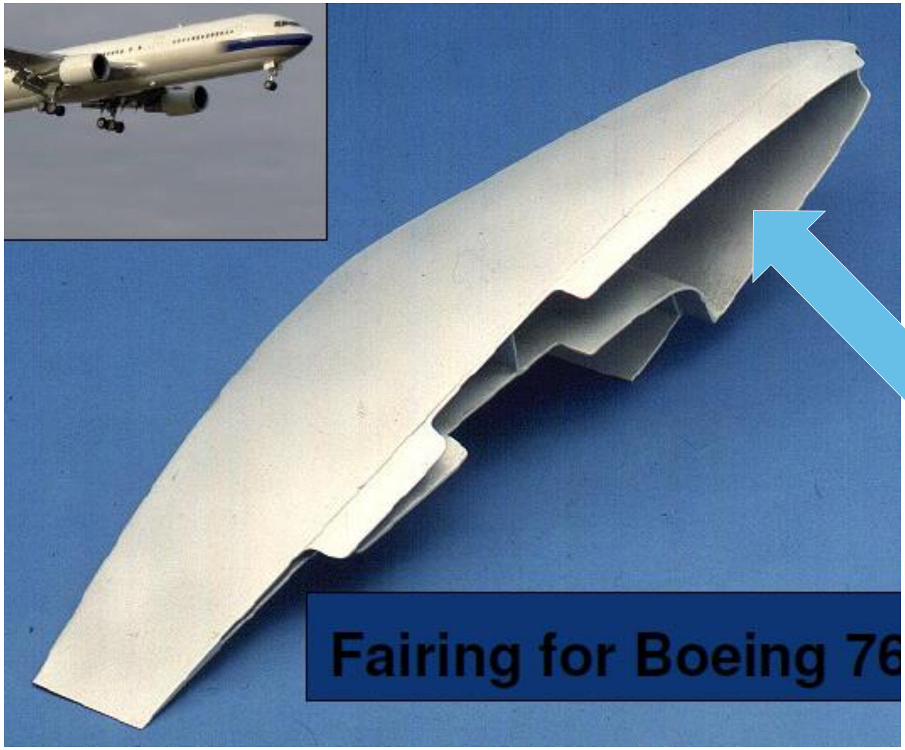
Possibili applicazioni:
Stutture di Sostegno Motore



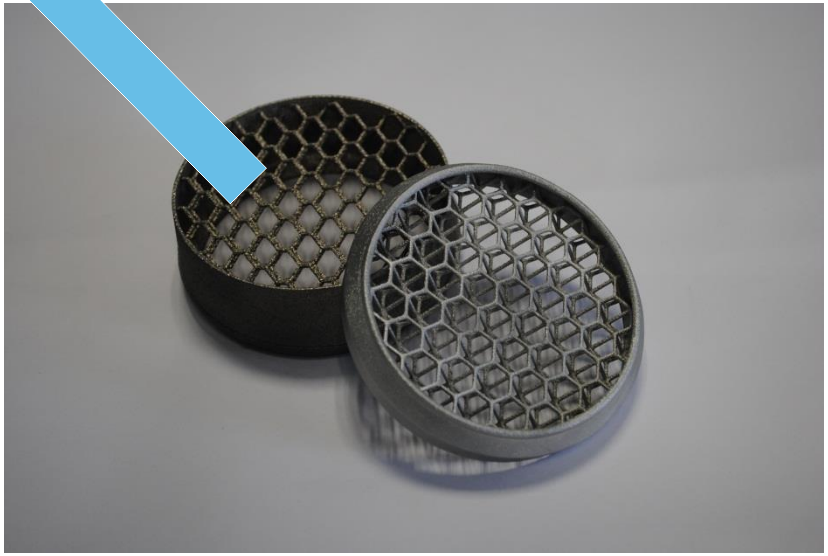
Produrre giunzioni complesse con AM (Ti64)

- **Nessuna saldatura in aree delicate soggette a sforzi**
- **Saldature con elementi strutturali convenzionali (tubi, aste, travi) lontano dalle zone critiche ed in aree più accessibili**
- **Modifiche più facili per evoluzioni di installazione**

Prese d'aria/forme aerodinamiche



Le carenature possono essere irrigidite con strutture trabecolari interne similmente a quanto fatto con i pannelli a nido d'ape



Considerazioni finali.

Per i progettisti: abbandonare gli schemi preconcetti, scatenare l'inventiva ma rispettare i concetti base: es. scienza delle costruzioni

Per La Supply Chain: opportunità per ridurre il WIP dei grezzi, per le lavorazioni……………. invece no.

Per ACQ: i fornitori di piccole microfusioni saranno le prime vittime di questa tecnologia, evitiamo di fare accordi di medio periodo. Il mercato delle polveri esploderà.

Per HR: AM è una tecnologia capital intensive, meno personale ma più qualificato, saltano i paradigmi dell'ora/uomo e del rapporto indiretti/diretti

Per Qualità: alcuni paradigmi di ispezione dovranno essere rivisti (es. Rx e FPI), sovrano il controllo di processo.

Considerazioni finali

Avio Aero
A GE Aviation Business

Per Tecnologie:

- **Le nuove macchine saranno il tema del prossimo futuro (maggior dimensione e maggiore produttività) .**
- **Il grezzo diventa «make» e non più «buy», e le lavorazioni associate…..?**
- **Per le riparazioni il «powder bed» non è idoneo, occorre sviluppare il «laser cladding»**

MA

- **Per riprodurre parti di ricambio obsolete AM è una opportunità senza pari**

Grazie per la vostra pazienza!

Domande?