



Università degli Studi di Pavia
Facoltà di Ingegneria
Corso di Laurea in Bioingegneria

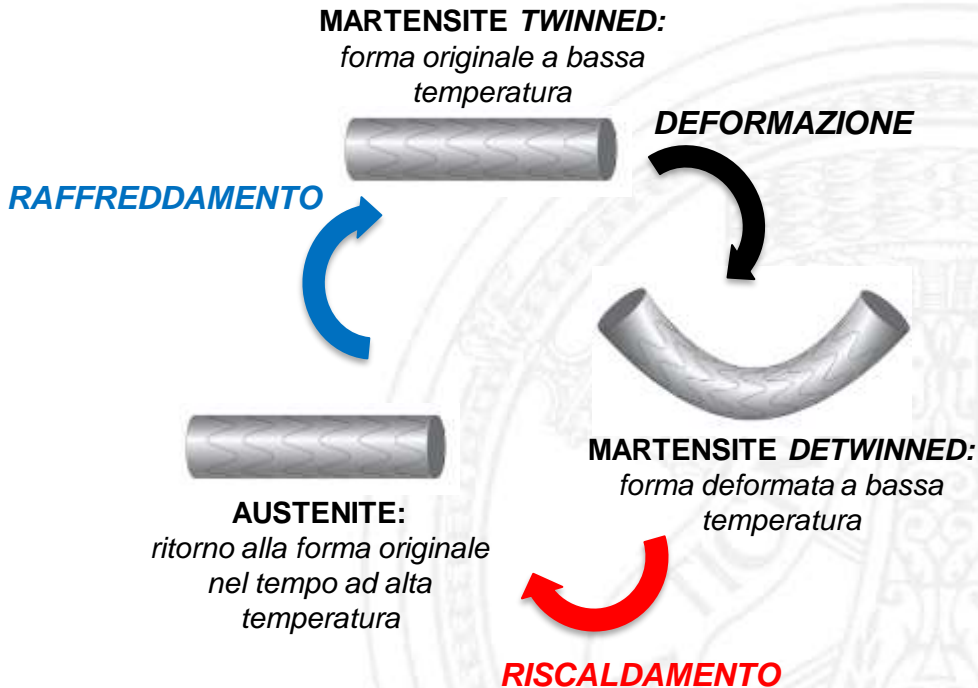
Tesi di Laurea

**Fabbricazione additiva di
leghe a memoria di forma:**
stato dell'arte ed applicazioni in
campo biomedico

Relatore: Prof. Michele Conti
Correlatore: Ing. Giulia Scalet

24 Settembre 2019
Laureando: Giuseppe Mazzone

Anno Accademico: 2018/2019



- Le **leghe a memoria di forma (SMA)** sono particolari materiali metallici con la capacità di ripristinare la loro configurazione iniziale se deformati e/o sottoposti ad appropriato trattamento termico. |

- Tra le proprietà tipiche: |

EFFETTO A MEMORIA DI FORMA (SME):

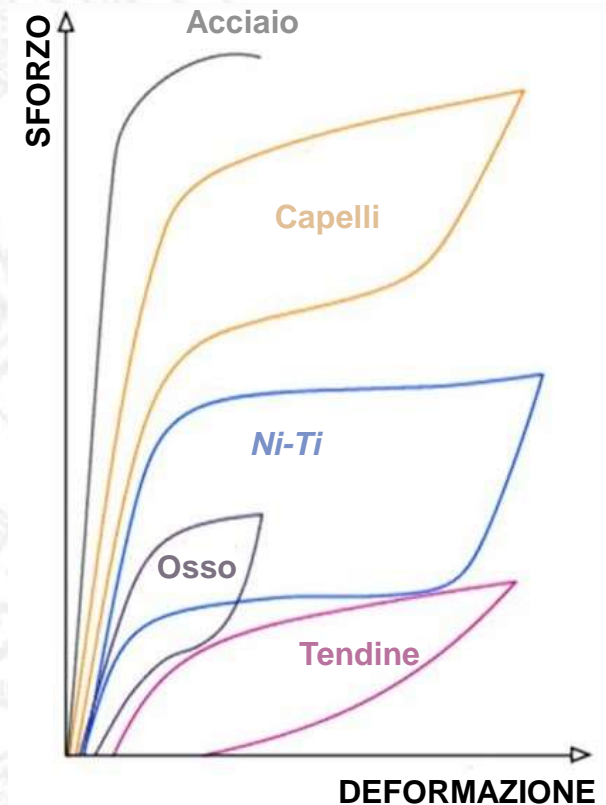
- Capacità di memorizzare e recuperare la forma originale;
- A una via o a due vie.

SUPERELASTICITA':

- Deformazione della lega al di sopra della sua temperatura di trasformazione;
- Ritorno alla sua forma senza deformazioni residue.

Biocompatibilità delle SMA: la lega Ni-Ti

- La **biocompatibilità** è la capacità di un materiale di essere biologicamente innocuo durante il suo periodo funzionale all'interno di un individuo.
- Tra le SMA più utilizzate ritroviamo la lega **Ni-Ti (Nitinol)**.
- Proprietà *Nitinol*:
 - ✓ Ottima biocompatibilità
 - ✓ Granulometria relativamente piccola
 - ✓ elevato rapporto resistenza/peso
 - ✓ resistenza alla corrosione/usura
- In generale, i dispositivi in *Ni-Ti* presentano **uno strato ossidato a base di Ti protettivo** più esterno, che migliora la resistenza alla corrosione e agisce **come una barriera** alla diffusione/rilascio di ioni *Ni*.



La curva d'isteresi mostra qualitativamente come il *Nitinol* sia molto più simile alle componenti biologiche di altri metalli.

Applicazioni in campo biomedico

- Le proprietà uniche delle SMA consentono la possibilità di molteplici **applicazioni** in molti settori. In particolare in campo biomedico:

Applicazioni cardiovascolari



Filtro di Simon

Stent



Occlusore setto atriale



Applicazioni ortopediche



Distanziatori vertebrali

Graffe ortopediche



Piastre ossee



Applicazioni odontoiatriche



Apparecchi ortodontici

Strumentazione chirurgica



Strumentazione laparoscopia

Pompa intra-aortica

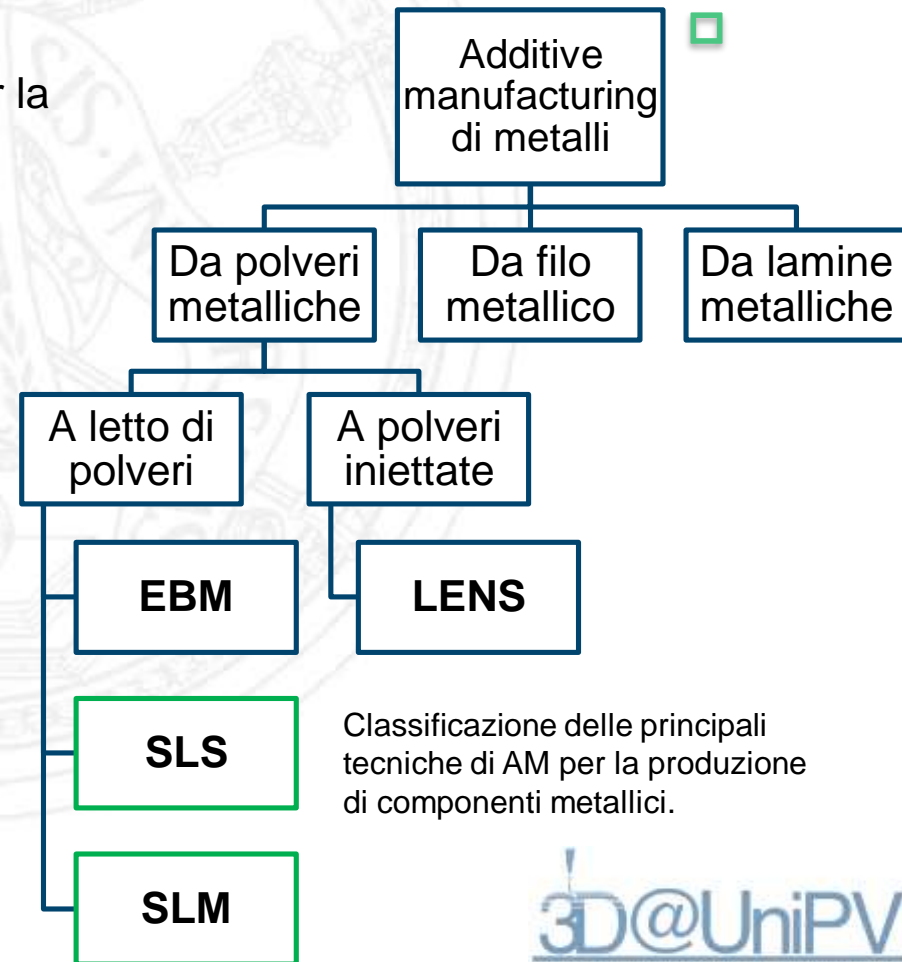


- ✓ Prima che i materiali siano autorizzati per l'impianto, un ente di competenza richiede **tre diversi test** di crescente livello **di controllo**: in vitro, in vivo e studi clinici.

- Si basa sul principio di **produzione a strati**, in cui i materiali sono sovrapposti strato dopo strato.
- Questa tecnologia può essere utilizzata per fabbricare componenti di qualsiasi forma complessa utilizzando la modellazione solida secondo un modello computerizzato: il modello di progettazione (CAD) o tomografia computerizzata (TC) a scansione.

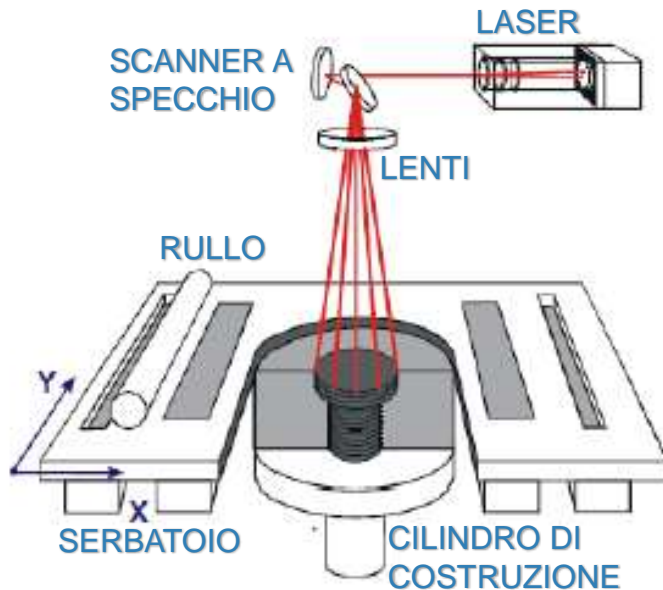
- In ambito medico, **quattro aree d'intervento** per la ricerca di tecnologie di additive manufacturing:

- Produzione di modelli di organi per aiutare la pianificazione preoperatoria e il trattamento chirurgico;
- Fabbricazione di impalcature locali bioattive e biodegradabili;
- Stampa diretta di tessuti ed organi con funzioni vitali complete.
- Produzione personalizzata di impianti permanenti;



Selective Laser Sintering (SLS)

- E' una tecnica che consente la produzione di componenti metallici a partire da polveri con l'utilizzo di **un laser**.



Procedura:

1. Si ha un preriscaldamento delle polveri ad una temperatura costante e uniforme;
2. Viene depositato su un pistone, tramite un rullo, un sottile strato di polvere metallica;
3. Il consolidamento avviene attraverso l'energia termica di un fascio laser guidato da un sistema di specchi che esegue la scansione delle polveri seguendo il modello CAD.

- Particelle metalliche si sinterizzano, mentre un'altra parte compie una funzione di supporto per lo strato successivo (**fusione parziale**):

VANTAGGI:

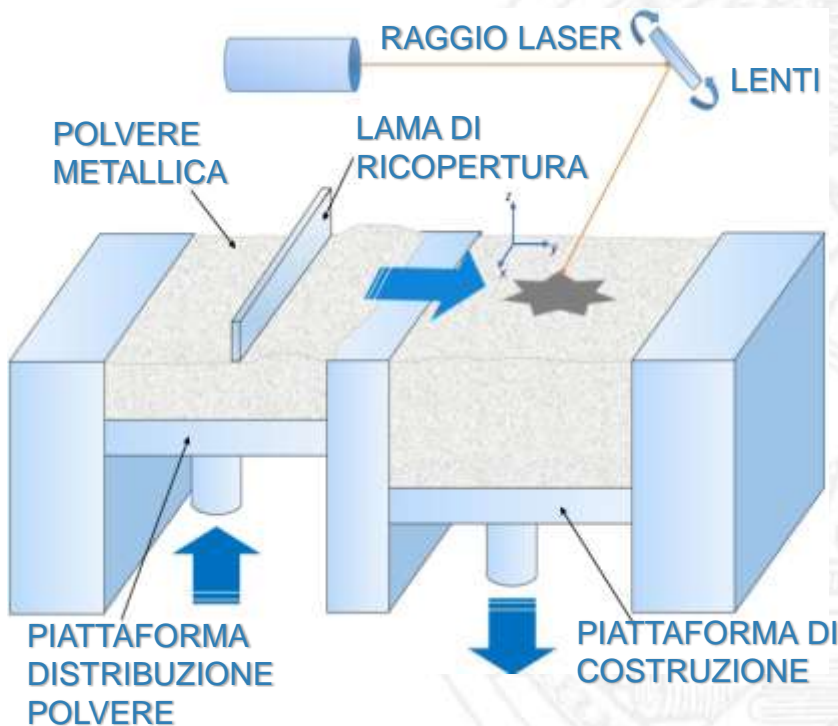
- Consente di ottenere **oggetti molto densi** e con **ottime proprietà meccaniche**;
- Il successivo trattamento di raffreddamento **minimizza** l'instaurarsi di **tensioni residue e deformazioni**.

SVANTAGGI:

- La polvere viene **sinterizzata parzialmente**;
- Possono essere utilizzate **solo alcuni tipi** di polveri ritenute idonee.

Selective Laser Melting (SLM)

- Questo processo differisce dalla tecnica SLS per l'utilizzo di un laser più potente per unità di estensione superficiale: si ha quindi la **fusione totale** delle polveri.



Procedura:

1. Viene utilizzato un laser con potenza media ~ 50 W e con picchi massimi di 3 kW;
2. Processo molto simile a quello di SLS, ma con fusione completa delle polveri metalliche;
3. Come per le altre tecniche, la camera in cui avviene il processo è riempita con gas inerte per evitare fenomeni indesiderati di ossidazione.

VANTAGGI:

- Completa **libertà sulla scelta del materiale**: tutti i metalli tradizionali possono essere lavorati sotto giuste condizioni operative;
- Con la **completa fusione** delle polveri si evitano di aggiungere successivi leganti polimerici.

SVANTAGGI:

- Disponibilità di tutta la polvere necessaria a riempire il volume di lavoro: considerare una quantità di riserva e quindi **costi non trascurabili**;
- **Tempi di lavorazione lunghi** per grandi volumi.

Applicazioni di fabbricazione additiva

- Sono già state realizzate, in ambito medico, molte **applicazioni** tramite le tecniche di **fabbricazione additiva** di leghe a memoria di forma:

EBM



Impianti dentali solidi e reticolati



Impianti levigati per ginocchio



Protesi d'anca forate, scanalate e trabecolari

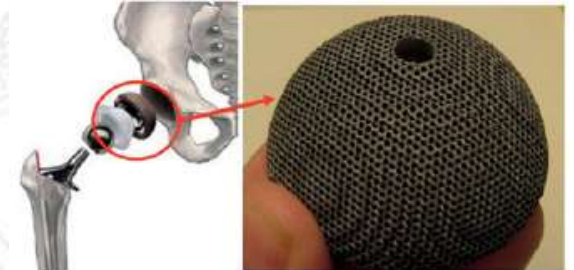
LENS



Strutture a pareti sottili per componenti minuziose

Strutture complesse in Ni-Ti per future applicazioni pseudoelastiche...

SLS / SLM



Impianti per femore in Ni-Ti porosi



Modelli e radici dentali porose in Ni-Ti



20 mm

Rif. Figure:

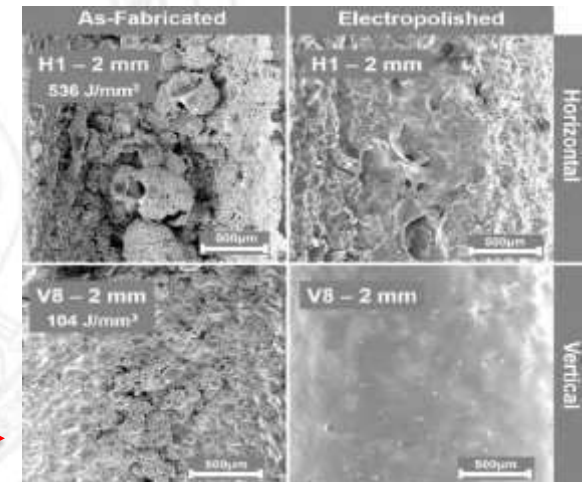
[Mohammad H. Elahinia et al., *Progress in Materials Science*, 2012;] [Sasan Dadbakhsh et al., *Mrs Bulletin*, 2016;]

[Consorzio Innova FVG, Progetto NANOCOAT, 2005;]

- Uno dei problemi legati alle tecniche di fabbricazione additiva è la **rugosità superficiale** degli impianti stampati che potrebbe comprometterne la sicurezza dopo l'impianto.
- Recentemente si è condotto uno studio in Texas, (*A&M University*) sulle leghe a memoria di forma per l'**attuazione**, in particolare **attuatori indossabili per la riabilitazione**.
 - ✓ Si è sviluppato, tramite AM, un attuttore in lega a memoria di forma in *Ni-Ti* con canali incorporati che incrementano la velocità di trasferimento termico.
 - ✓ **Per ottimizzare la rugosità superficiale** dei canali interni:
 - 1) Sono stati variati i **parametri di processo** delle tecniche utilizzate quali: **potenza del laser, velocità di scansione, orientamento del canale...**
 - 2) I canali sono stati poi sottoposti ad un trattamento di **elettro-lucidatura**.



Attuatori indossabili per la riabilitazione.

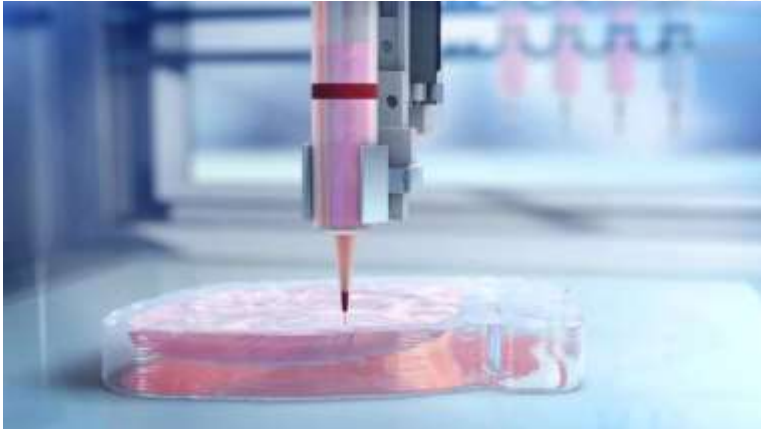


Micrografie dei canali interni prima e dopo il trattamento.

In conclusione, l'orientamento dei canali gioca un ruolo fondamentale nel determinare la rugosità superficiale dei canali interni ed una **minore densità di energia** del laser abbinata ad un **trattamento di elettro-lucidatura** si traduce in una notevole riduzione della rugosità superficiale.

- L'uso della tecnologia di stampa 3D per applicazioni mediche sta ottenendo risultati promettenti.

Tuttavia, ci sono ancora **alcune problematiche** da risolvere:



- Problemi di **nutrizione** e **apporto di ossigeno** alle cellule stampate in 3D;
- Impossibilità nel fornire un **numero sufficiente di cellule** per impalcature più grandi;
- **Sopravvivenza, differenziazione e fusione delle cellule**, da sviluppare ulteriormente.
- **Disallineamento elastico** tra l'impianto e l'osso dovuto all'elevato modulo elastico;
- Non esistono attualmente **standard internazionali per la scelta di materiali medici** per la stampa 3D.

Conclusioni e prospettive future



Sono stati fatti grandi progressi nel campo della stampa 3D orientata al settore medico:

- ✓ **Sviluppo di metodi per migliorare il comportamento meccanico** di impianti biodegradabili personalizzati.
- ✓ **Integrazione dei biomateriali**, come ad esempio le leghe a memoria di forma, **per ottenere funzioni complesse.**

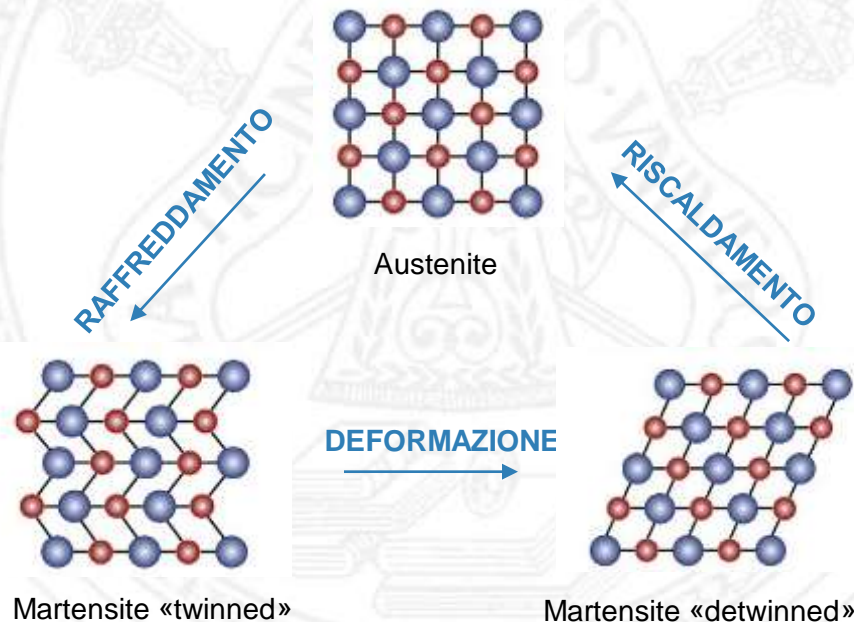
Il lavoro futuro include:

- ❑ Lo sviluppo di nuove attrezzature e lo studio di materiali ad alte prestazioni;
- ❑ La creazione di standard unificati;
- ❑ Il rafforzamento della supervisione di mercato;
- ❑ La creazione di una piattaforma di stampa 3D.

Grazie per l'attenzione.



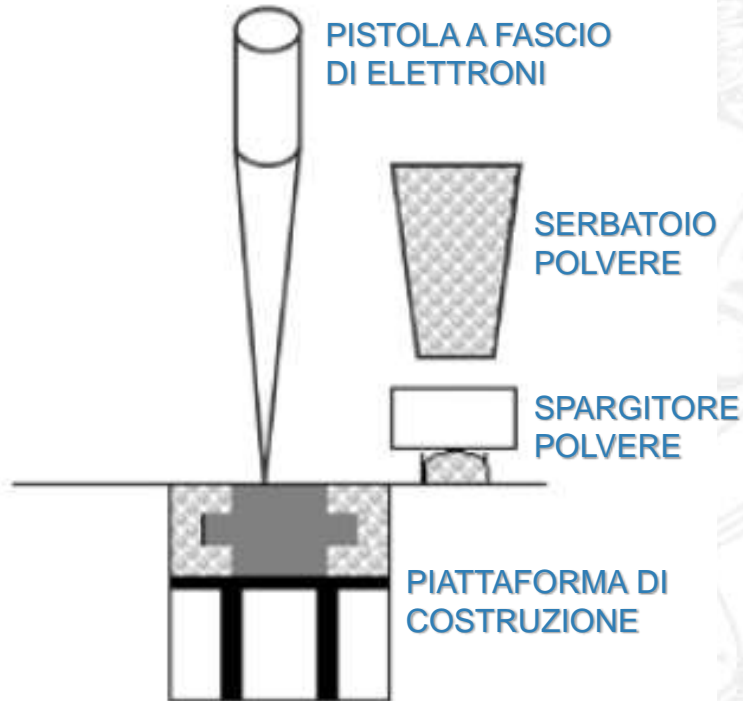
- Le SMA presentano due fasi cristallografiche ben definite: la **martensite** e l'**austenite**.
- **Martensite**: configurazione stabile solo a basse temperature, caratterizzata da una struttura distorta («*twinned*») che in seguito ad ulteriore deformazione si apre («*detwinned*»);
- **Austenite**: configurazione più rigida, stabile solo ad alte temperature, difficilmente deformabile;



- La trasformazione da una configurazione ad un'altra, tramite una deformazione o cambiamento di temperatura è alla base delle principali proprietà di queste leghe.

Electron Beam Melting (EBM)

- Consiste nella produzione del componente finale a partire da polveri metalliche tramite l'utilizzo di un **fascio elettronico**.



Procedura:

1. Uno strato sottile di polvere metallica viene preriscaldato ad una temperatura all'80% di quella di fusione del metallo;
2. Un fascio elettronico viene azionato su differenti porzioni di tutti gli strati della polvere;
3. Con una corrente del fascio a $\sim 30mA$ e con elevata velocità per scannerizzare lo strato di polvere;
4. La polvere metallica si sinterizza.

VANTAGGI:

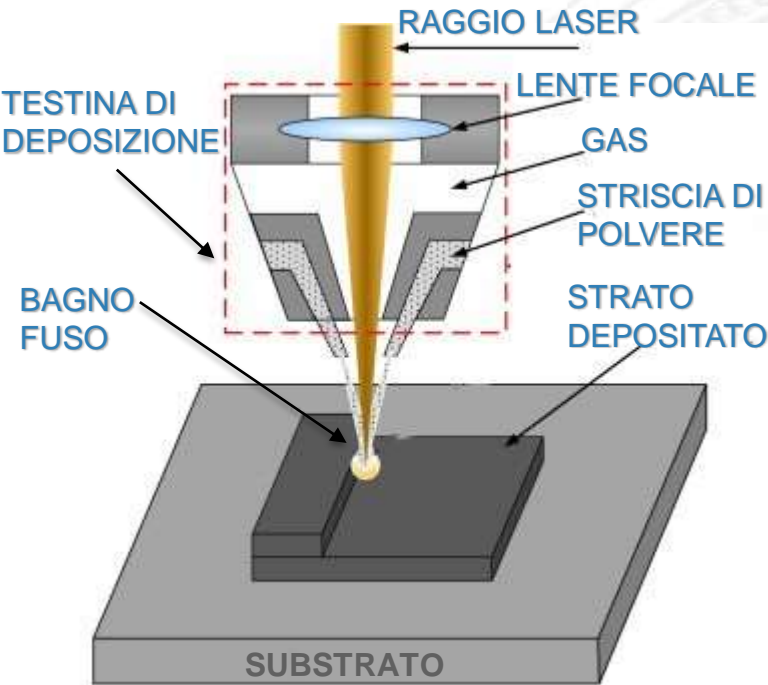
- Si ottiene una **densità pari al 99%** della densità teorica e microstruttura fine;
- Non si formano **porosità**;
- Rimane **in corretta posizione** durante la lavorazione.

SVANTAGGI:

- Non adatta per polveri metalliche **a basso punto di fusione** per la tendenza ad **evaporare**.

Laser Engineered Net Shaping (LENS)

- Questa tecnica permette la **fabbricazione totalmente automatizzata** di componenti metallici geometricamente complessi a partire dal modello CAD.



Procedura:

- Le polveri vengono spruzzate in un substrato per mezzo di ugelli (processo a **polvere iniettata**);
- Si formano i contorni della sezione che vengono poi riempiti creando un piano metallico uniforme;
- Processo molto simile ad una saldatura: un laser fonde localmente il substrato, le polveri vengono iniettate nel bagno fuso così da apportare materiale in quest'area;
- Le polveri fondono completamente, il sistema si raffredda quando il fascio laser si sposta in un'altra zona;

VANTAGGI:

- Formazione di **materiale denso ben aderente** al substrato;
- Particolarmente adatta per fabbricare **componenti con particolari minuziosi**.

SVANTAGGI:

- I pezzi ottenuti presentano una certa **rugosità superficiale** che non può essere del tutto eliminata;
- Necessari quindi **successivi trattamenti** di rettifica o lucidatura.