

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale
Corso di Laurea in Ingegneria Aerospaziale

***Relazione per la prova finale
«Superleghe a base di nichel per
applicazioni avanzate»***

Tutor universitario:
Prof.ssa Roberta Bertani

Laureando: *Samuele Peltrin*
Matricola: 2072633

Padova, 22/07/2026

REQUISITI ESTREMI

Alta Temperatura

Resistenza all'ossidazione e agli effetti corrosivi dei gas di scarico.

Creep (Scorrimento viscoso)

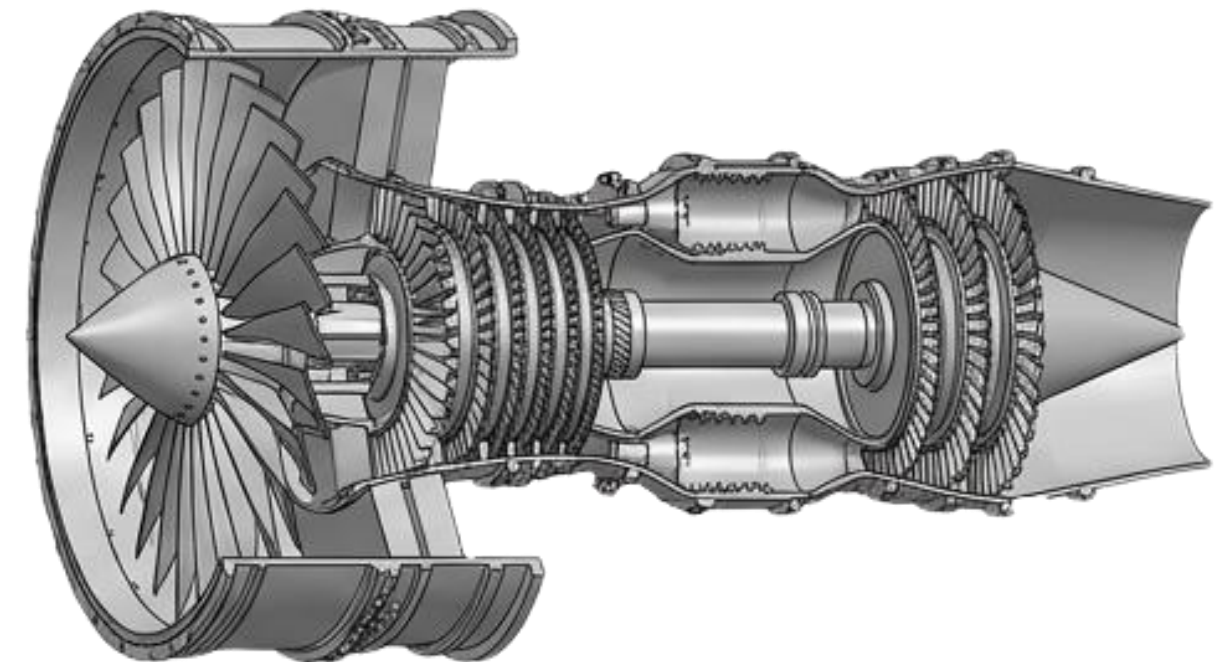
Resistenza alla deformazione plastica sotto carico costante prolungato.

Fatica Termomeccanica

Tolleranza ai severi transitori termici e gradienti (avviamento/spegnimento).

Affidabilità

Materiali in grado di garantire eccellenti prestazioni e grande sicurezza.



Queste necessità non interessano solo il campo aerospaziale ma svariati settori industriali

LE SUPERLEGHE

STORIA

Processo di creazione e sviluppo

CARATTERISTICHE E PROPRIETÀ'

Analisi della composizione, della struttura e delle proprietà meccaniche e fisiche

METODI PRODUTTIVI E TRATTAMENTI

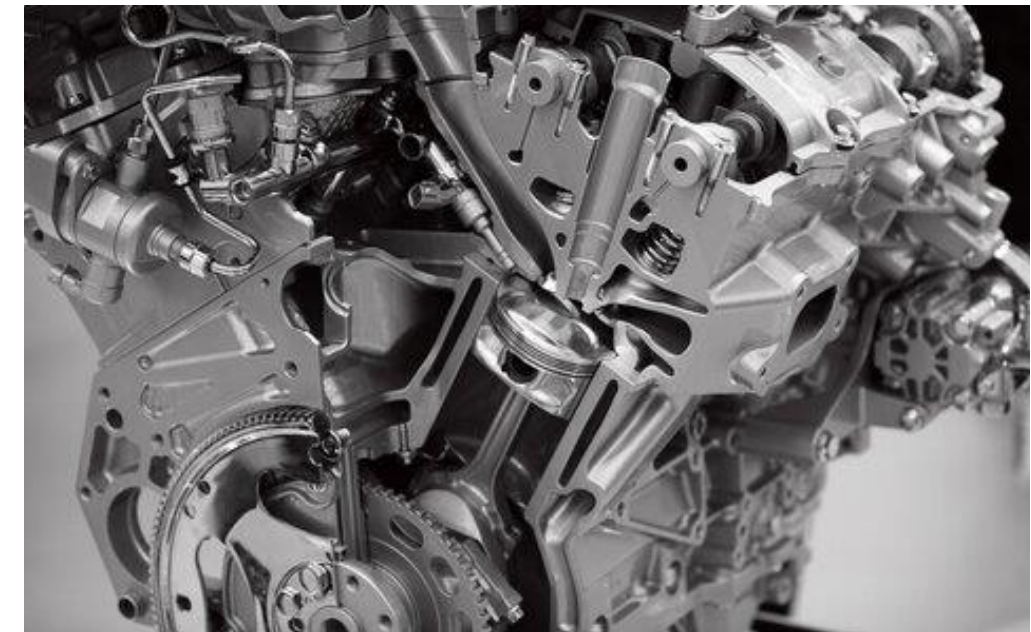
Approfondimento dei metodi di produzione tradizionali ed avanzati e dei trattamenti di post-produzione

APPLICAZIONI

Breve trattazione dei principali ambiti applicativi

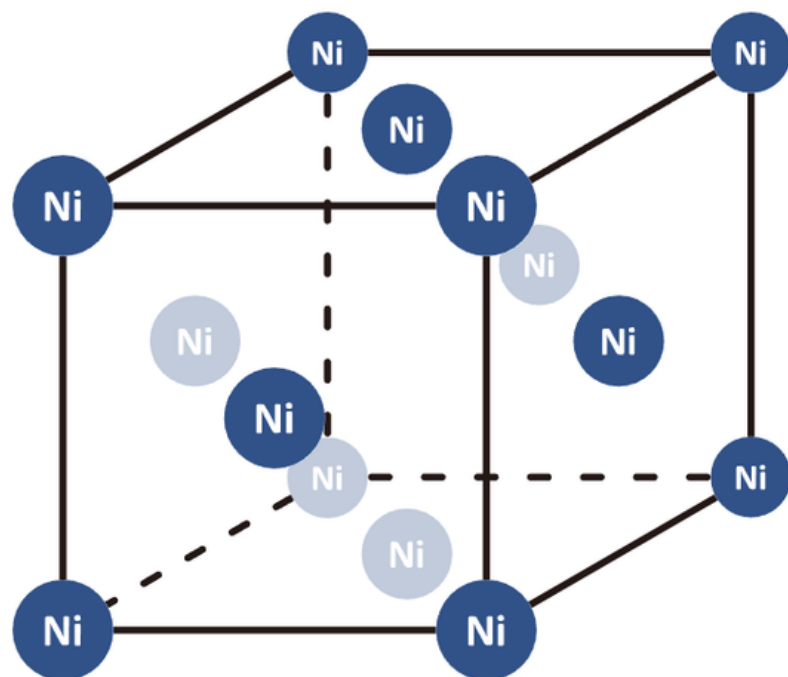
SVILUPPI FUTURI

Possibili scenari per il futuro sviluppo delle superleghe.



Le superleghe sono una classe di materiali adatta a rispondere ai requisiti estremi in vari ambiti applicativi.

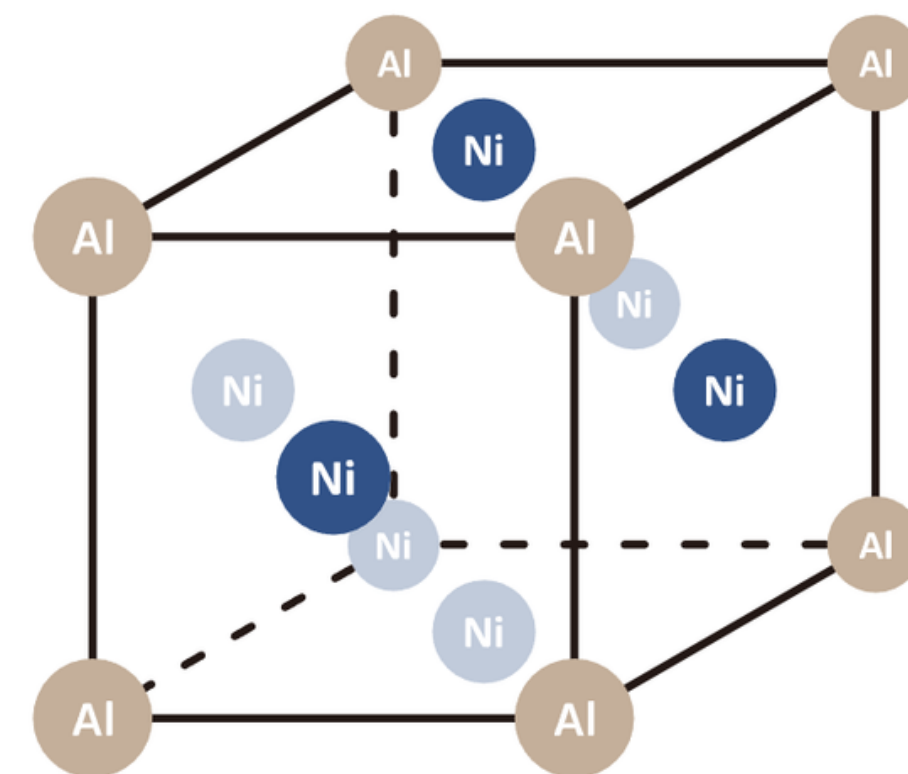
Matrice γ



- Base delle superleghe
- Struttura FCC
- Composta da nichel ma è in grado di solubilizzare una grandissima varietà di elementi di lega
- Rafforzamento per soluzione solida

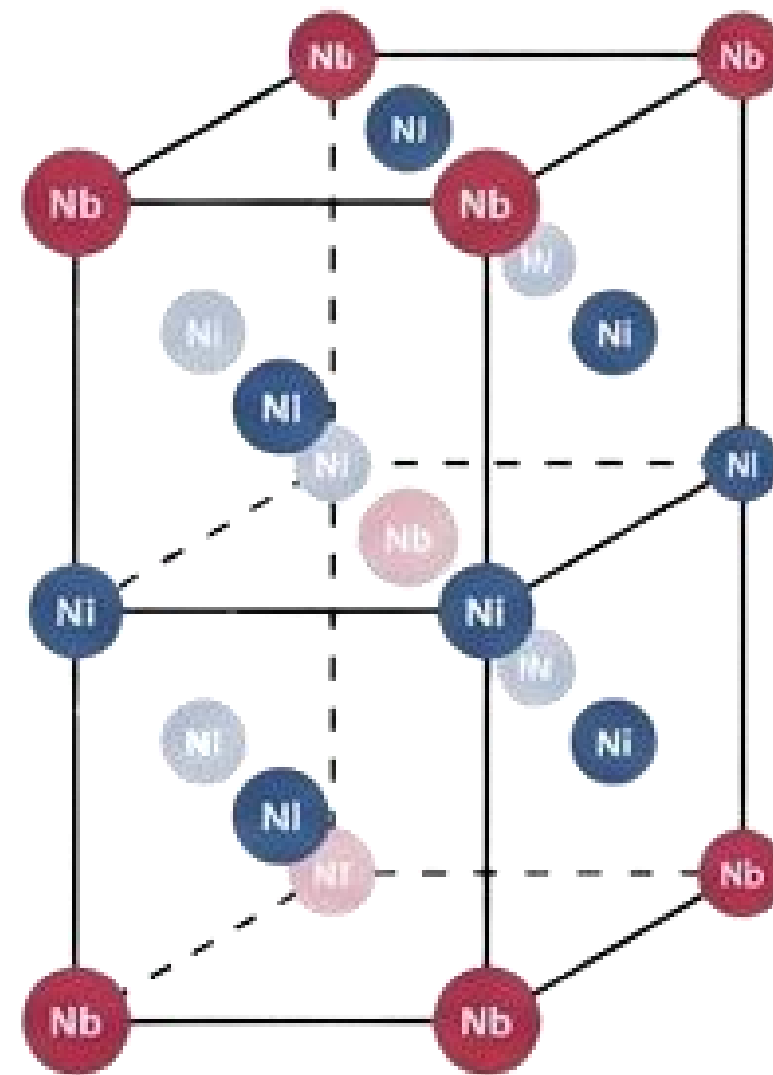
- Principale fase rafforzante per superleghe a base di nichel
- $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$
- Struttura FCC coerente con la fase gamma
- Prodotta attraverso aging treatment (invecchiamento)
- Grande resistenza ad alte temperature

Precipitato γ'



Precipitato γ''

- Fase metastabile ottenuta mediante invecchiamento.
- Struttura tetragonale (BCT).
- Maggiore effetto indurente della γ' .
- Stabile solo a temperature intermedie; ad alte temperature si trasforma nella fase δ , perdendo l'effetto rinforzante.



Fase β

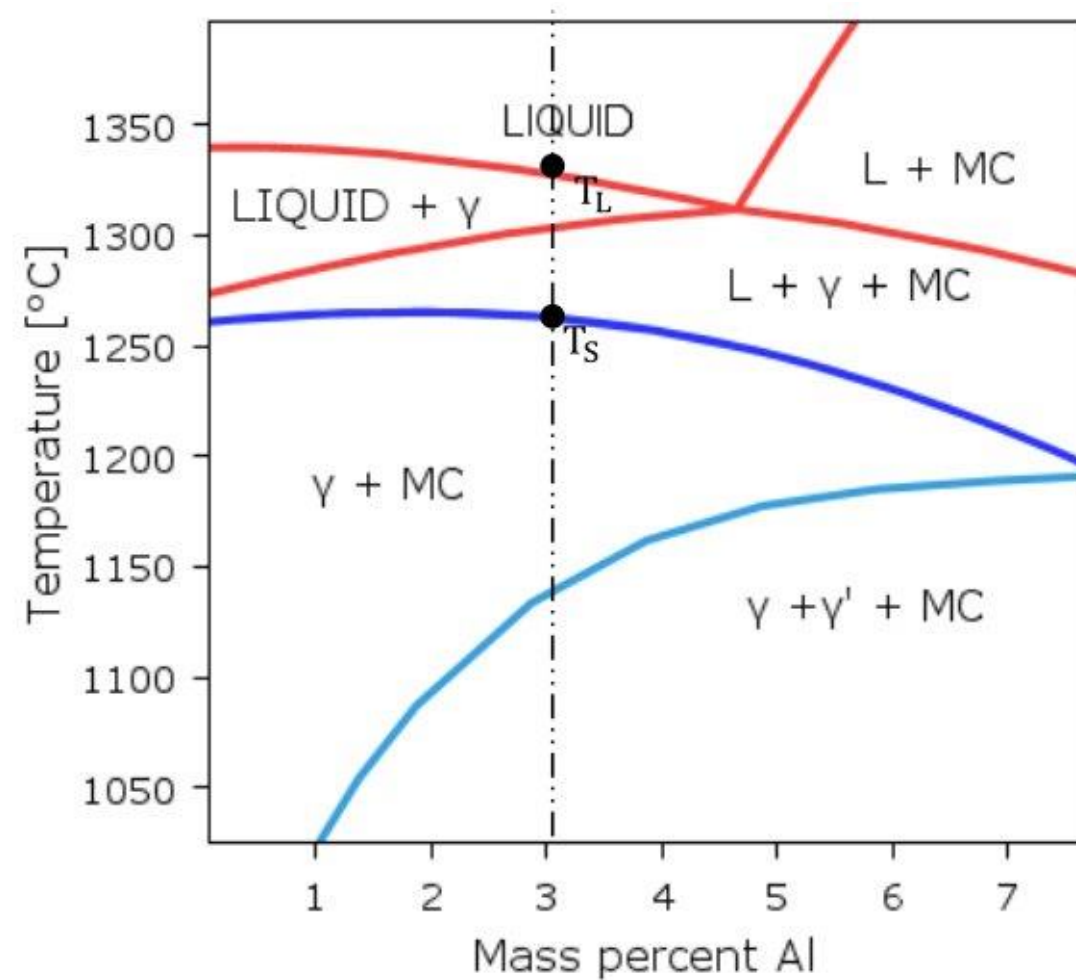
- Struttura cubica a corpo centrato (BCC).
- Precipita in presenza di elevati contenuti di Al.
- Favorisce la formazione di cricche e riduce plasticità e resistenza meccanica.

Fase η

- Struttura esagonale compatta (HCP).
- Si forma con eccesso di Ti rispetto ad Al.
- Generalmente riduce duttilità, resistenza a trazione e fatica.
- In alcune leghe piccole quantità favoriscono l'affinamento del grano.

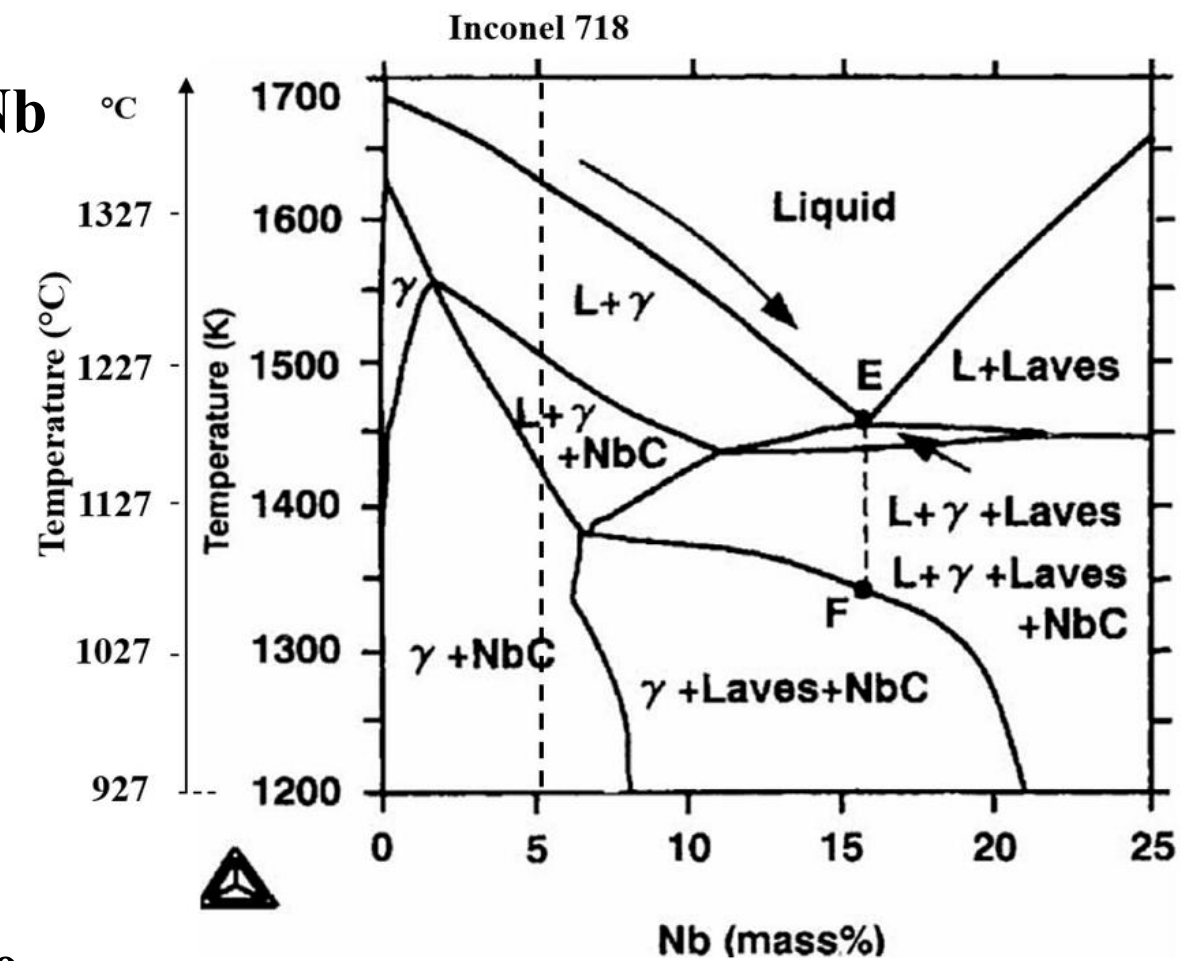
Fase di Laves

- Struttura esagonale compatta (HCP).
- Fase intermetallica fragile ricca di Nb, Mo e Si.
- Si forma per segregazione durante la solidificazione.
- Riduce tenacità, duttilità e resistenza a fatica; può favorire l'innescio di cricche.

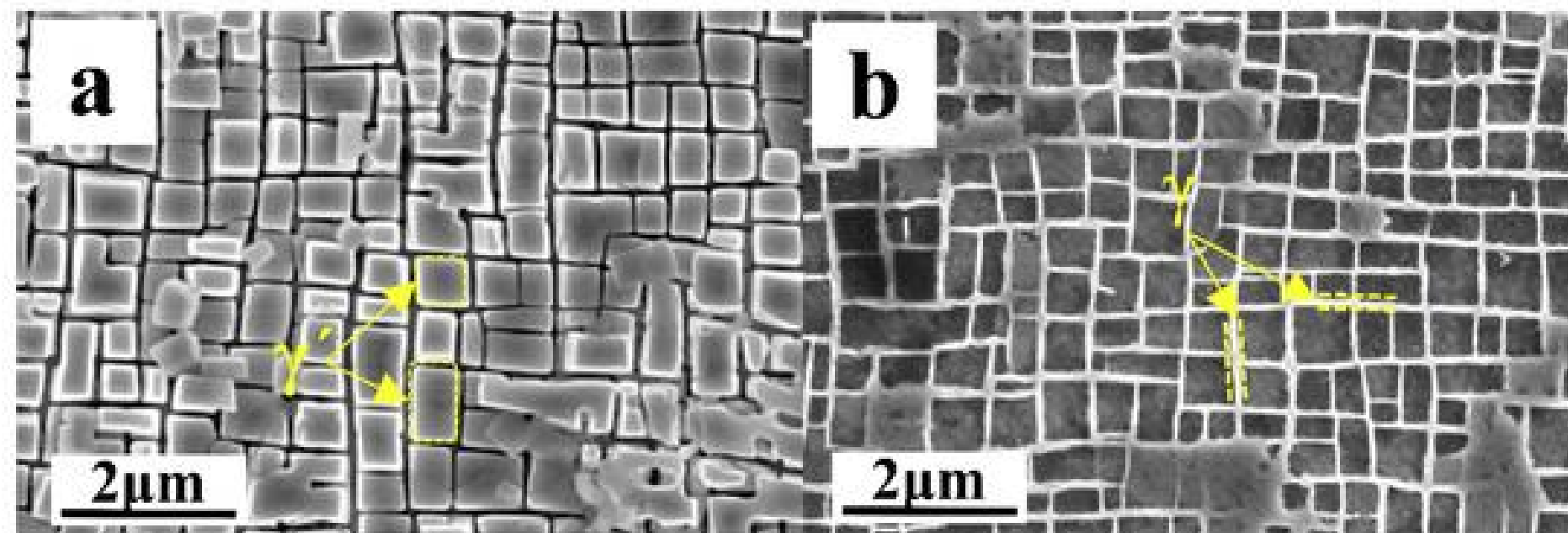


**Diagramma di fase Ni-Al
per lega René 80**

**Diagramma di fase Ni-Nb
per lega IN718**



Matrice gamma e precipitati gamma-prime



Cr	Cromo (Cr)	→	<i>aumenta la resistenza all'ossidazione e alla corrosione a caldo; contribuisce all'indurimento per soluzione solida.</i>
Al	Alluminio (Al)	→	<i>favorisce la formazione della fase γ' e dell'allumina (Al_2O_3), migliorando resistenza meccanica e ossidazione.</i>
Co	Cobalto (Co)	→	<i>incrementa la stabilità alle alte temperature e la frazione di fase γ'.</i>
Ti	Titanio (Ti)	→	<i>aumenta la quantità di fase γ' e forma carburi MX, migliorando la resistenza a creep.</i>
Ta Nb	Tantalio (Ta) e Niobio (Nb)	→	<i>rafforzano la fase γ'; il Nb rappresenta un'alternativa più economica e leggera al Ta</i>
W Mo	Tungsteno (W) e Molibdeno (Mo)	→	<i>potenti indurenti per soluzione solida; aumentano la resistenza al creep, ma in eccesso possono favorire la formazione di fasi deleterie</i>
C B Zr Hf	Elementi minori: C, B, Zr, Hf	→	<i>migliorano la resistenza dei bordi di grano, la stabilità microstrutturale e la resistenza a creep; concentrazioni elevate possono ridurre saldabilità e temperatura di fusione.</i>



La combinazione bilanciata degli elementi di lega permette di ottimizzare resistenza meccanica, stabilità microstrutturale, resistenza al creep e resistenza all'ossidazione, rendendo le superleghe a base di nichel ideali per applicazioni ad alta temperatura.

σ_{ps} (44%) - Precipitazione

L'ostacolo fisico posto dalla fase γ' richiede un'elevata energia per essere attraversato dalle dislocazioni. E' il meccanismo più efficace.

σ_{ss} (22%) -

Soluzione Solida

Distorsione del reticolo atomico che garantisce elevata coesione e riduce la diffusione al alte temperature.

$$\sigma_{YS} = \sigma_0 + \sigma_{gb} + \sigma_{ps} + \sigma_{ss} + \sigma_d$$

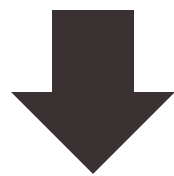
σ_{gb} (13%) - Bordi di Grano

Barriera al moto delle dislocazioni, la cui efficacia è proporzionale al numero di grani.

Policristallino



Fitta rete di bordi di grano trasversali.



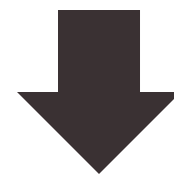
Processo semplice ed economico.

Limitata resistenza a creep e alle alte temperature.

Solidificazione Direzionale (DS/DWDS)



Pochi grani colonnari allineati all'asse di sforzo.

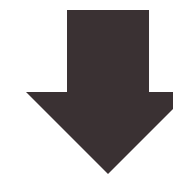


Eliminazione dei bordi di grano trasversali.
Maggiore resistenza a creep e a fatica termica.

Monocristallo



Assenza totale di bordi di grano.



Migliori prestazioni meccaniche e maggiore temperatura di esercizio.

Difetti della colata

- Porosità residue e inclusioni.
- Ingrossamento del grano e difetti di solidificazione (es. freckles).
- Deformazione dei core ceramici e variazioni degli spessori interni.
- Riduzione delle proprietà meccaniche e della resa produttiva.

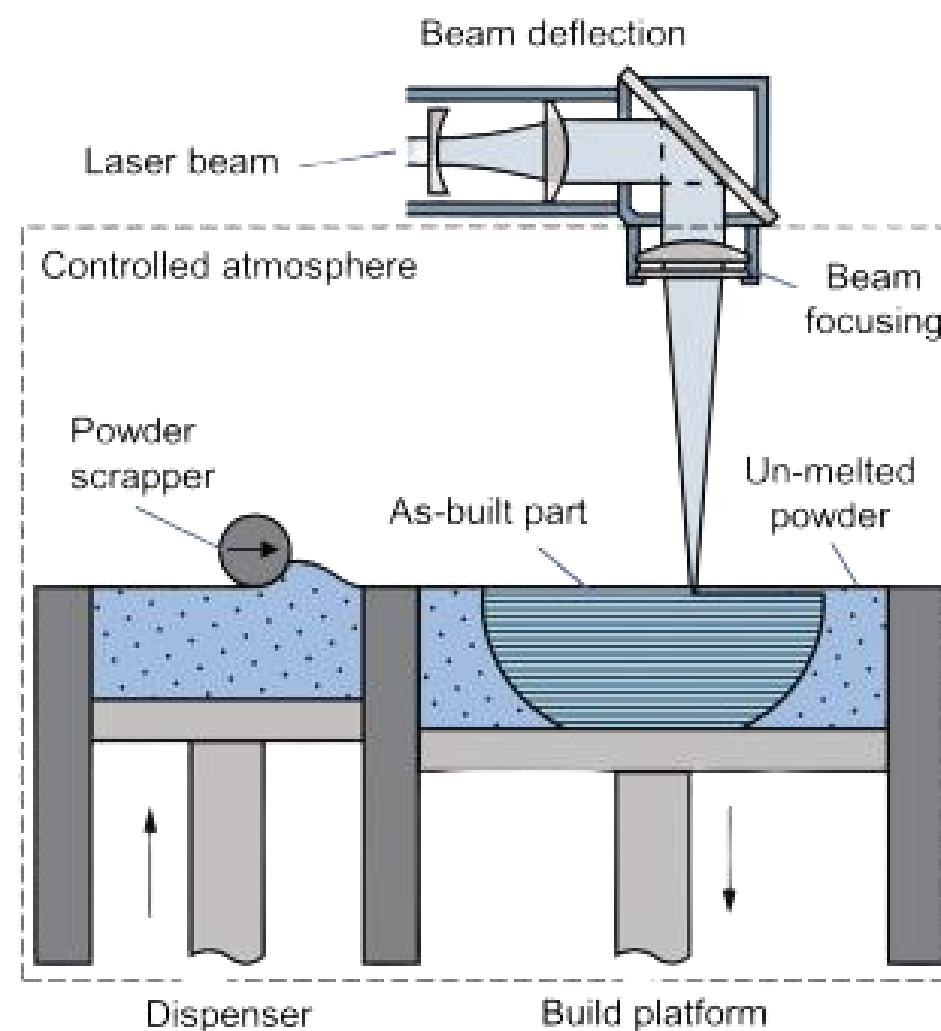
Obiettivi dei trattamenti

- Eliminare le tensioni residue.
- Omogeneizzare la microstruttura.
- Controllare precipitazione e dissoluzione delle fasi rinforzanti.
- Migliorare resistenza meccanica, creep e durata in esercizio.

PRINCIPALI TRATTAMENTI	
	Sabbiatura / Pallinatura: introduce tensioni di compressione superficiali, riduce la rugosità e aumenta la resistenza a fatica.
	Stress Relief: rilassa le tensioni residue senza modificare significativamente la microstruttura.
	Solubilizzazione (<i>Solution Annealing</i>): dissolve le fasi secondarie e prepara il materiale al successivo invecchiamento.
	Invecchiamento (<i>Aging</i>): controlla la precipitazione delle fasi γ'/γ'' e dei carburi, massimizzando durezza e resistenza.
	Ricottura completa (<i>Full Annealing</i>): omogeneizza la struttura e aumenta la duttilità (principalmente nelle leghe lavorate).

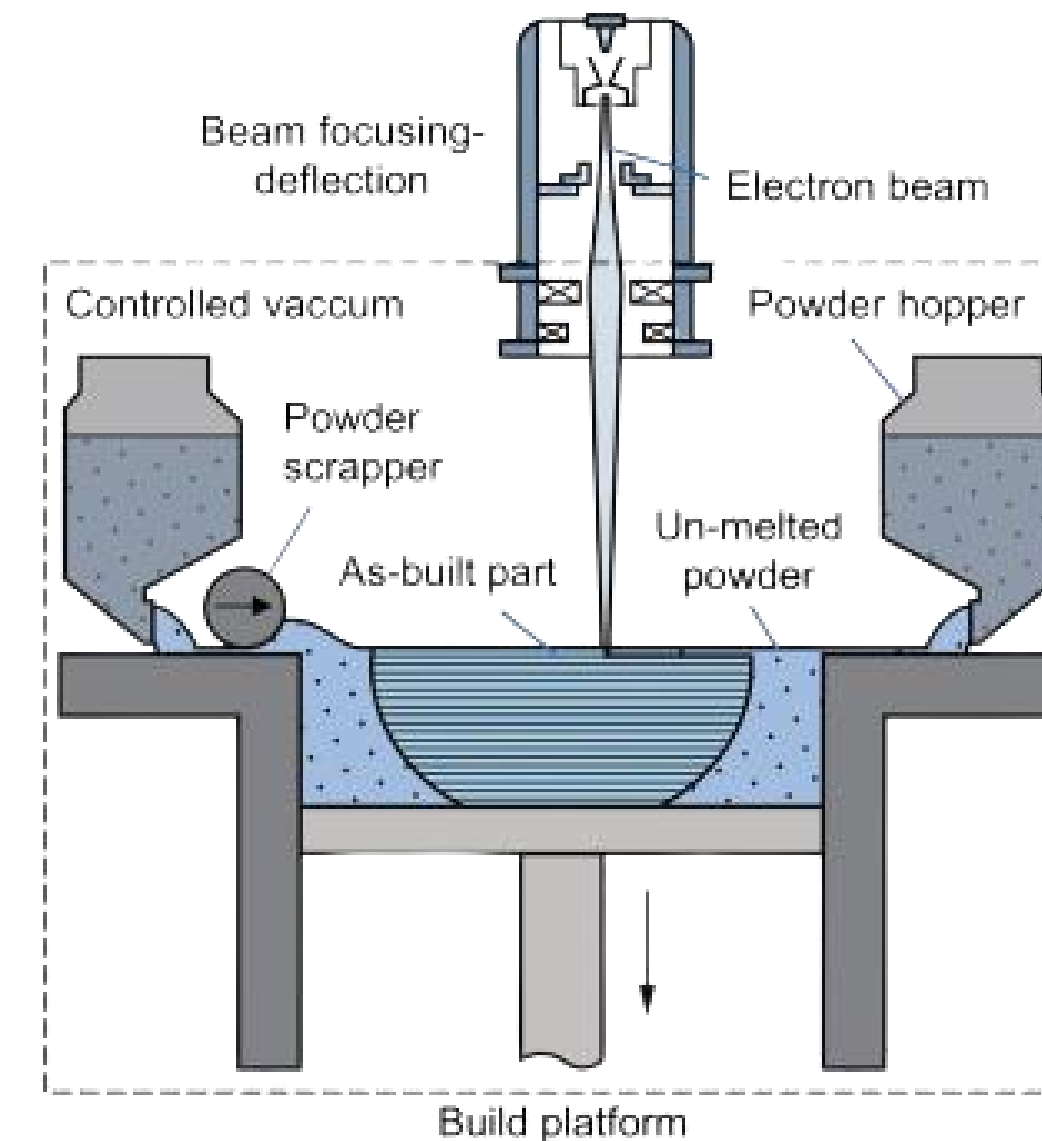
Le velocità di riscaldamento e raffreddamento sono fondamentali perché influenzano la dissoluzione delle fasi, la crescita del grano e la morfologia dei precipitati, determinando le proprietà finali della superlega.

L-PBF (Laser Powder Bed Fusion)



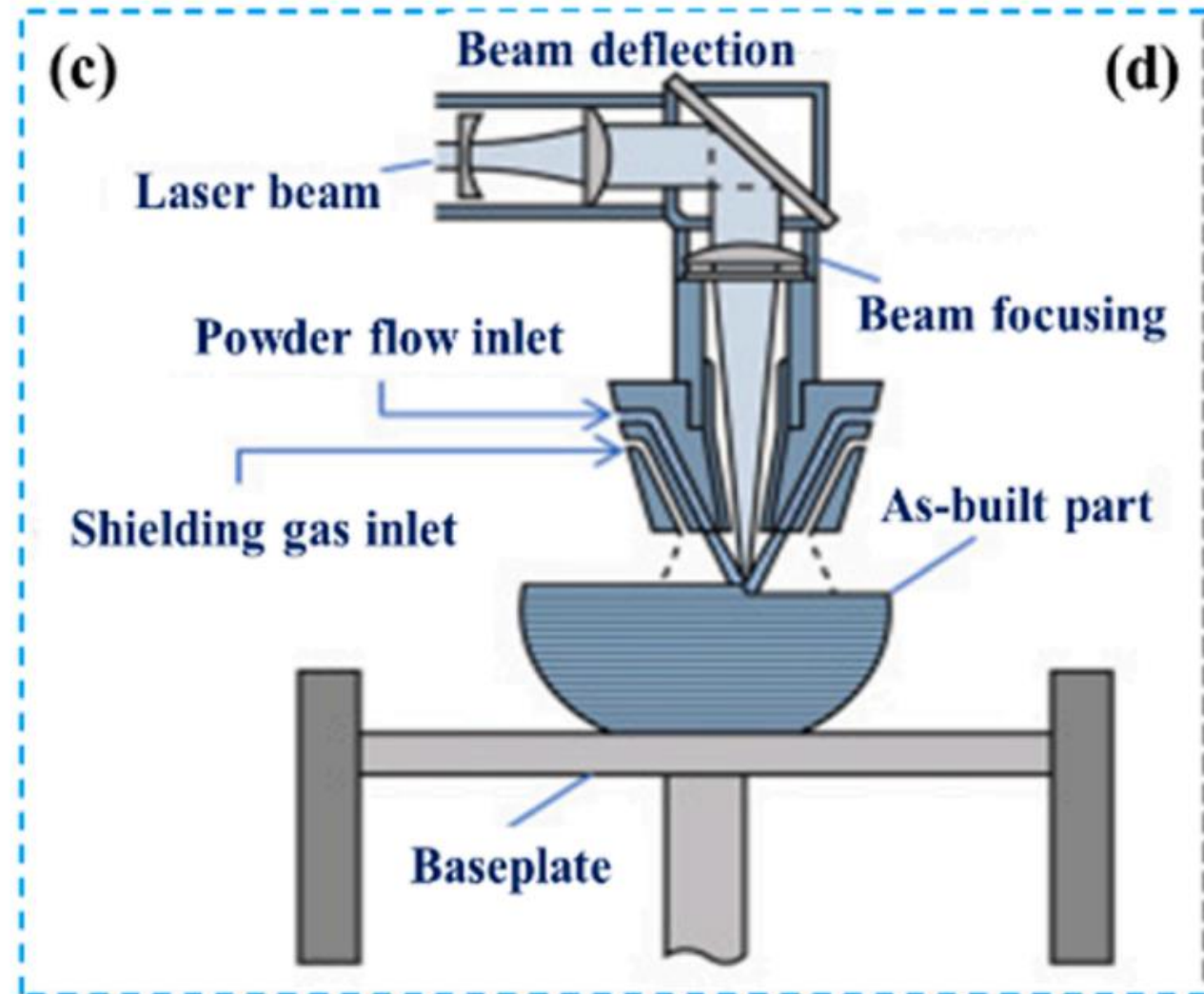
Alta precisione dimensionale, ideale per geometrie interne intricate e canali di raffreddamento complessi.

EBM (Electron Beam Melting)



Alta densità di energia in ambiente sottovuoto, ideale per elevati tassi di deposizione ed eccellente purezza chimica.

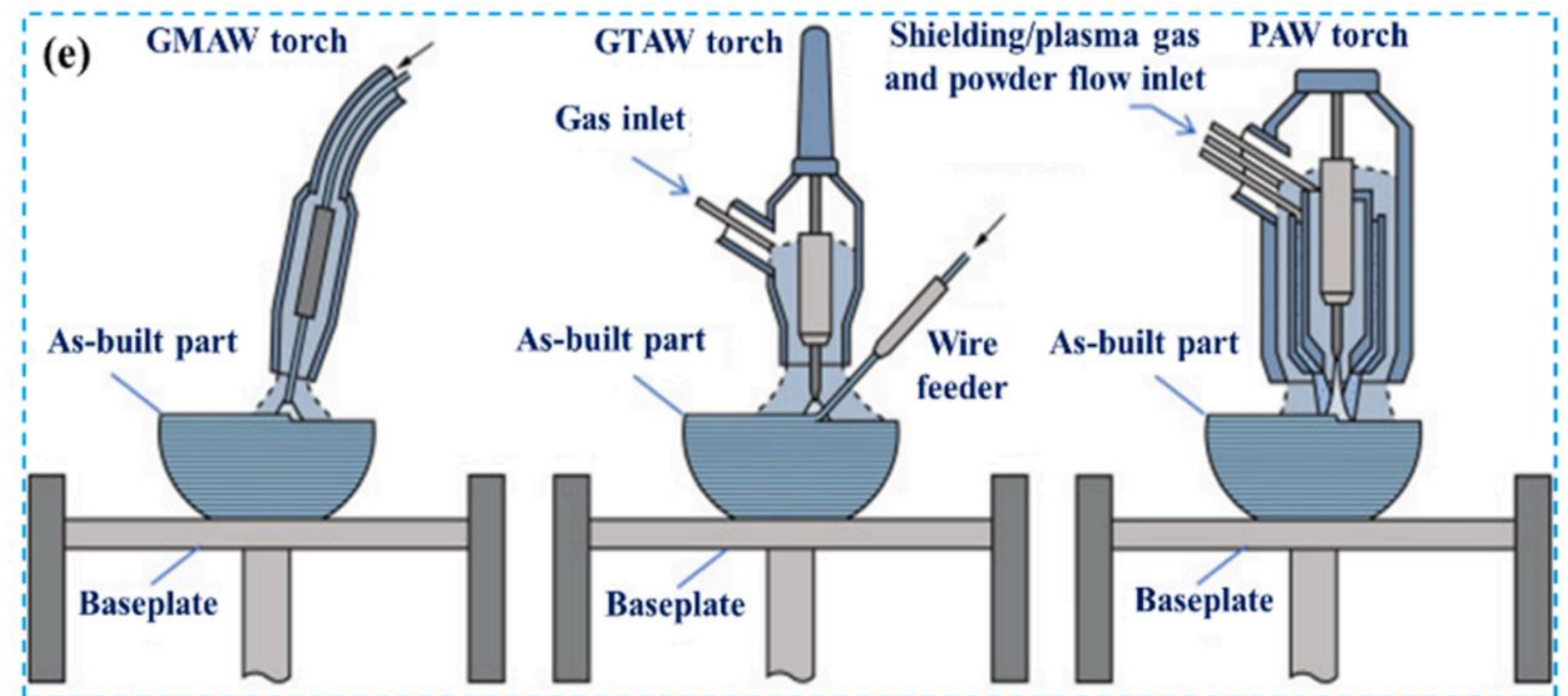
DED (Direct Energy Deposition)



Elevata precisione e possibilità di riparare componenti esistenti.

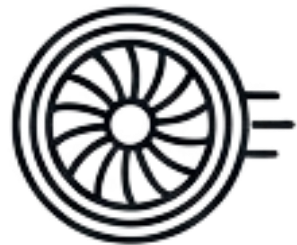
Adatto alla realizzazione di geometrie complesse e componenti di grandi dimensioni.

WAAM (Welding Arc Additive Manufacturing)



Variante del DED che utilizza un filo metallico fuso mediante arco elettrico.

Richiede generalmente lavorazioni meccaniche finali per raggiungere le tolleranze dimensionali.

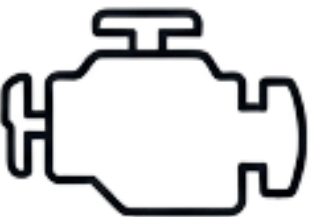
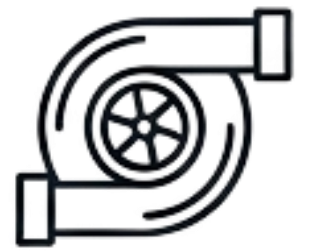


Aerospace e Difesa

Palette turbina e disco motore (40-50% del peso totale del propulsore). Il focus ingegneristico assoluto è la resistenza al creep e alla fatica termomeccanica.

Automotive

Turbocompressori ad alte prestazioni esposti a gas di scarico corrosivi ed estreme vibrazioni ad altissime temperature.



Nucleare

Generatori di vapore (es. Inconel 690 anti-PWSCC) e materiali d'elezione (Hastelloy N) per i futuri reattori a sali fusi di IV generazione.

Oil e Gas

Strumentazioni di profondità in ambienti operativi estremi (alte pressioni, gas acidi). Richiesta tolleranza assoluta alla tensocorrosione (SCC).



Ottimizzazione Additive Manufacturing

Sviluppo di nuovi cicli di trattamenti termici post-processo per eliminare le fasi intermetalliche deleterie (Laves) e massimizzare la vita a creep dei componenti stampati in 3D.

Design di Nuove Leghe

Ingegnerizzazione di nuove composizioni chimiche per resistere ad ambienti operativi sempre più estremi, ottimizzare la precipitazione delle fasi e massimizzare le proprietà meccaniche dei componenti.

Le superleghe di Nichel non sono solo uno standard industriale consolidato, ma un orizzonte di ricerca metallurgica in cuntinua ed essenziale espansione.

- [1] *Aeether. What is alloy phase? introducing common superalloy phases*, 2024.
- [2] *Dheeraj Shankarrao Bhiogade. Ultra supercritical thermal power plant material advancements: A review. Journal of Alloys and Metallurgical Systems*, 3:100024, 2023.
- [3] *Charlotte Boig. The application of additive manufacturing to nickel-base superalloys for turbocharger applications. PhD thesis, University of Sheffield*, 2019.
- [4] *William D Callister Jr and David G Rethwisch. Materials science and engineering: an introduction. John wiley & sons*, 2020.
- [5] *Schlumberger Reservoir Completions Center, Anthony Collins, and Seth Silverman. Use of alloy 718 and 725 in oil and gas industry*.
- [6] *Matthew J Donachie and Stephen J Donachie. Selection of superalloys for design. Materials and Mechanical Design*, page 287, 2006.
- [7] *FAA. Propellers*, 2026.
- [8] *Dongyu Han, Weiguo Jiang, Jiuhan Xiao, Kaiwen Li, Yuzhang Lu, and Langhong Lou. Investigating the evolution of freckles into sliver defects in ni-based single-crystal superalloy castings. Materials Today Communications*, 27:102350, 2021.
- [9] *MT Jovanovic, Z Mi ' skovi ' c, and B Luki ' c. Microstructure and stress-rupture life of polycrystal, ' directionally solidified, and single crystal castings of nickel-based in 939 superalloy. Materials characterization*, 40(4-5):261–268, 1998.
- [10] *Keith J Leonard, Maxim N Gussev, Jacqueline N Stevens, and Jeremy T Busby. Analysis of stress corrosion cracking in alloy 718 following commercial reactor exposure. Journal of Nuclear Materials*, 466:443–459, 2015.
- [11] *Michael V Nathal. Nasa and superalloys: A customer, a participant, and a referee. In 11th International Symposium (Superalloys 2008), number NASA/TM-2008-215205*, 2008.
- [12] *Tresa M Pollock and Sammy Tin. Nickel-based superalloys for advanced turbine engines: chemistry, microstructure and properties. Journal of propulsion and power*, 22(2):361–374, 2006.
- [13] *Roger C Reed. The superalloys: fundamentals and applications. Cambridge university press*, 2008.

- [14] Bassiouny Saleh, Reham Fathi, and Ligu Zhao. *Additive manufacturing of nickel superalloys: A critical review of recent advances and future perspectives*. *Applied Materials Today*, 48:103051, 2026.
- [15] John J Schirra, Robert H Caless, and Robert W Hatala. *The effect of laves phase on the mechanical properties*. *The Minerals, Metals & Materials Society*, pages 375–388, 1991.
- [16] Senthil Kumaran Selvaraj, G Sundaramali, S Jithin Dev, R Srii Swathish, Rahul Karthikeyan, KE Vijay Vishaal, and Velmurugan Paramasivam. *Recent advancements in the field of ni-based superalloys*. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2021(1):9723450, 2021.
- [17] Chester T Sims. *A history of superalloy metallurgy for superalloy metallurgists*. *Superalloys*, 1984:399–419, 1984. 29
- [18] Harminder Singh, TS Sidhu, and SBS Kalsi. *Behavior of ni-based superalloys in an actual waste incinerator plant under cyclic conditions for 1,000 h at 900 c*. *Corrosion*, 70(12):1249–1263, 2014.
- [19] Saikrishna Suresh Kumar. *Characterisation of IN718 Nickel Superalloy-Powder Bed Fusion Laser Additive Manufacturing*. PhD thesis, Politecnico di Torino, 2025.
- [20] Ilaria Titonel. *Ottimizzazione del trattamento di solubilizzazione e successiva applicazione dell'HIPquench su campioni in superlega di Nickel prodotti tramite LPBF= Thermal solution treatment optimization and subsequent application of HIP-quench on Nickel superalloy samples produced by LPBF*. PhD thesis, Politecnico di Torino, 2022.
- [21] F Wang, DX Ma, J Zhang, S Bogner, and A Bührig-Polaczek. *A high thermal gradient directional solidification method for growing superalloy single crystals*. *Journal of Materials Processing Technology*, 214(12):3112–3121, 2014.
- [22] Bao-ping Wu, Lin-han Li, Jian-tao Wu, Zhen Wang, Yan-bin Wang, Xing-fu Chen, Jian-xin Dong, and Jun-tao Li. *Microstructure and stress rupture properties of polycrystal and directionally solidified castings of nickel-based superalloys*. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 21(1):58–64, 2014.

GRAZIE PER L'ATTENZIONE