



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI
DI PERUGIA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA

Progettazione di leghe metalliche per manifattura additiva: approcci e metodologie

A. Di Schino

Dipartimento di Ingegneria, Università degli Studi di Perugia

Terni, 13 Gennaio 2020





UNIVERSITÀ DEGLI STUDI
DI PERUGIA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA

Introduzione





Introduzione



"....it will allow for things to be made economically in much smaller numbers, more flexibly and with much lower input of labour"
(The Economist, 2012) .



Introduzione



"....it will allow for things to be made economically in much smaller numbers, more flexibly and with much lower input of labour"
(The Economist, 2012) .

"Additive Manufacturing will become the most important, most strategic, and most used manufacturing technology ever."
Wohlers 2012

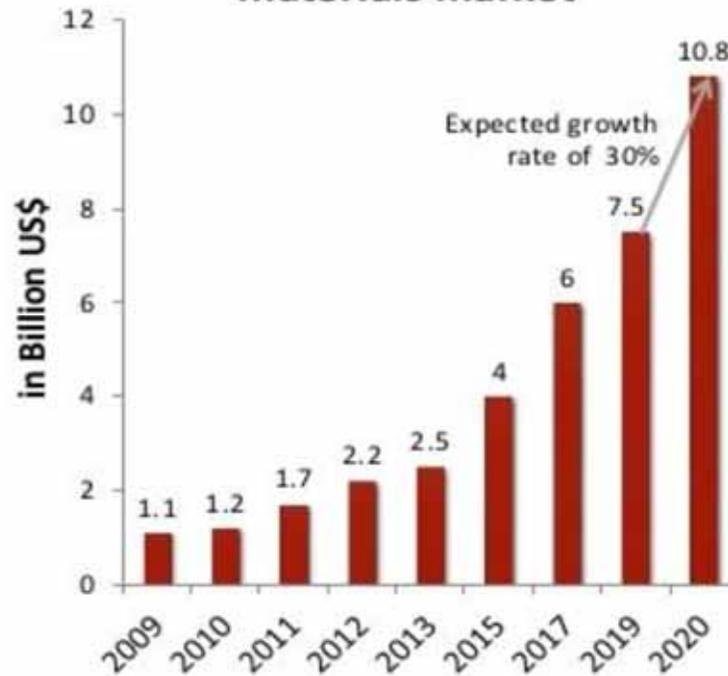
Faster. Cheaper. Better!

- Increased Complexity
- Less Material Scrap
- Shorter Design Cycle
- Reduced Part Count

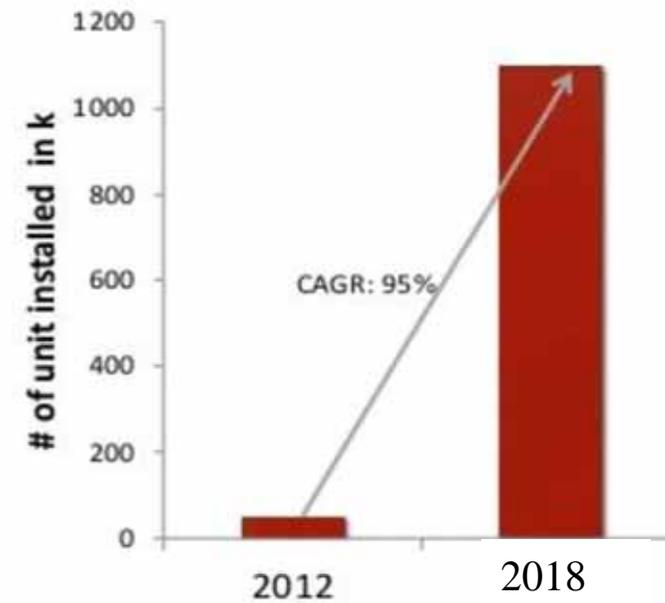


Introduzione

3D service, products and materials market



3D Printer installed





Additive Manufacturing

- **Additive Manufacturing: tecnologia** per fabbricare componenti di geometria complessa
- **Tecnologia** attraverso la quale è' possibile fabbricare pezzi «*customizzati*»
- In questi anni lo sviluppo ha riguardato essenzialmente i processi





..... o Additive Metallurgy?

- Additive Manufacturing: **tecnologia** per fabbricare componenti di geometria complessa
- **Tecnologia** attraverso la quale è' possibile fabbricare pezzi «*customizzati*»
- In questi anni lo sviluppo ha riguardato essenzialmente i processi

Attualmente solo un numero limitato di leghe metalliche sono processabili!





Leghe per AM

	Material	DIN
Aluminium Alloys	AlSi10Mg	3.2381
	AlSi7Mg	3.2371
	AlSi12	3.3581
Cobalt Based Alloys	ASTM F75	2.4723
	CoCrWC	
Tool Steels	AISI 420	1.2083
	Marage 300	1.2709
	H13	1.2344
	AISI D2	1.2379
	AISI A2	1.2363
	AISI S7	1.2357

	Material	DIN
Nickel Based Alloys	Inconel 718	2.4668
	Inconel 625	2.4856
	Inconel 713	2.4670
	Inconel 738	
	Hastelloy X	2.4665
Stainless Steels	SS 304	1.4301
	SS 316 L	1.4404
	SS 410	1.4006
	SS 440	1.4110
	15-5 PH	1.4540
	17-4 PH	1.4542



	Material	DIN
Titanium Alloys	Titanium Grade 2	3.7035
	Ti6Al4V	3.7165
	Ti6Al4V ELI	3.7165 ELI
	TiAl6Nb7	
Precious Metal Alloys	Jewellery Gold	18 Carat
	Silver	930 Sterling
Copper Alloys	CC 480 K	2.1050

TiAl (titanium aluminides)
Ti6242 (Ti6Al2Sn4Zr2Mo)



Leghe per AM



	Material	DIN
Aluminium Alloys	AISI10Mg	3.2381
	AISI7Mg	3.2371
	AISI12	3.3581
Cobalt Based Alloys	ASTM F75	2.4723
	CoCrWC	
Tool Steels	AISI 420	1.2083
	Marage 300	1.2709
	H13	1.2344
	AISI D2	1.2379
	AISI A2	1.2363
	AISI S7	1.2357

	Material	DIN
Nickel Based Alloys	Inconel 718	2.4668
	Inconel 625	2.4856
	Inconel 713	2.4670
	Inconel 738	
	Hastelloy X	2.4665
Stainless Steels	SS 304	1.4301
	SS 316 L	1.4404
	SS 410	1.4006
	SS 440	1.4110
	15-5 PH	1.4540
	17-4 PH	1.4542

	Material	DIN
Titanium Alloys	Titanium Grade 2	3.7035
	Ti6Al4V	3.7165
	Ti6Al4V ELI	3.7165 ELI
	TiAl6Nb7	
Precious Metal Alloys	Jewellery Gold	18 Carat
	Silver	930 Sterling
Copper Alloys	CC 480 K	2.1050

TiAl (titanium aluminides)
Ti6242 (Ti6Al2Sn4Zr2Mo)



aReview

Laser Powder Bed Fusion of Stainless Steel Grades: A Review

Chiara Zitelli ¹, Paolo Folgarait ¹ and Andrea Di Schino ^{1*}

¹ Seamthesis Srl, Via IV Novembre 156, 29122 Piacenza, Italy; chiara.zitelli@seamthesis.com (C.Z.); paolo.folgarait@seamthesis.com (P.F.)

² Dipartimento di Ingegneria, Università degli Studi di Perugia, Via G. Duranti 93, 06125 Perugia, Italy

* Correspondence: andrea.dischino@unipg.it

Received: 11 May 2019; Accepted: 25 June 2019; Published: 28 June 2019



Leghe per AM

	Material	DIN
Aluminium Alloys	AlSi10Mg	3.2381
	AlSi7Mg	3.2371
	AlSi12	3.3581
Cobalt Based Alloys	ASTM F75	2.4723
	CoCrWC	
Tool Steels	AISI 420	1.2083
	Marage 300	1.2709
	H13	1.2344
	AISI D2	1.2379
	AISI A2	1.2363
	AISI S7	1.2357

	Material	DIN
Nickel Based Alloys	Inconel 718	2.4668
	Inconel 625	2.4856
	Inconel 713	2.4670
	Inconel 738	
	Hastelloy X	2.4665
Stainless Steels	SS 304	1.4301
	SS 316 L	1.4404
	SS 410	1.4006
	SS 440	1.4110
	15-5 PH	1.4540
	17-4 PH	1.4542



	Material	DIN
Titanium Alloys	Titanium Grade 2	3.7035
	Ti6Al4V	3.7165
	Ti6Al4V ELI	3.7165 ELI
	TiAl6Nb7	
Precious Metal Alloys	Jewellery Gold	18 Carat
	Silver	930 Sterling
Copper Alloys	CC 480 K	2.1050



Article

Austenitic Stainless Steel Powders with Increased Nitrogen Content for Laser Additive Manufacturing

Chengsong Cui ^{1,*}, Volker Uhlenwinkel ^{1,2}, Alwin Schulz ¹ and Hans-Werner Zoch ^{1,2}

¹ Leibniz Institute for Materials Engineering-IWT, Badgasteiner Straße 3, D-28359 Bremen, Germany; uhl@iwt.uni-bremen.de (V.U.); aschulz@iwt-bremen.de (A.S.); zoch@iwt-bremen.de (H.-W.Z.)

² Faculty of Production Engineering, University of Bremen, Badgasteiner Straße 3, D-28359 Bremen, Germany

* Correspondence: cscui@iwt-bremen.de

Received: 8 November 2019; Accepted: 23 December 2019; Published: 30 December 2019



TiAl (titanium aluminides)
Ti6242 (Ti6Al2Sn4Zr2Mo)



Leghe per AM



	Material	DIN
Aluminium Alloys	AlSi10Mg	3.2381
	AlSi7Mg	3.2371
	AlSi12	3.3581
Cobalt Based Alloys	ASTM F75	2.4723
	CoCrWC	
Tool Steels	AISI 420	1.2083
	Marage 300	1.2709
	H13	1.2344
	AISI D2	1.2379
	AISI A2	1.2363
	AISI S7	1.2357

	Material	DIN
Nickel Based Alloys	Inconel 718	2.4668
	Inconel 625	2.4856
	Inconel 713	2.4670
	Inconel 738	
	Hastelloy X	2.4665
Stainless Steels	SS 304	1.4301
	SS 316 L	1.4404
	SS 410	1.4006
	SS 440	1.4110
	15-5 PH	1.4540
	17-4 PH	1.4542

Titanium Alloys	Titanium Grade 2	3.7035
	Ti6Al4V	3.7165
	Ti6Al4V ELI	3.7165 ELI
	TiAl6Nb7	
Precious Metal Alloys	Jewellery Gold	18 Carat
	Silver	930 Sterling
Copper Alloys	CC 480 K	2.1050

TiAl (titanium aluminides)
Ti6242 (Ti6Al2Sn4Zr2Mo)

Additive Manufacturing 27 (2019) 428–439

Contents lists available at ScienceDirect

Additive Manufacturing

journal homepage: www.elsevier.com/locate/addma




Full Length Article

Additive manufacturing of soft magnetic materials and components

D. Goll^a, D. Schuller^a, G. Martinek^a, T. Kunert^a, J. Schurr^a, C. Sinz^a, T. Schubert^a, T. Bernthaler^a, H. Riegel^b, G. Schneider^b

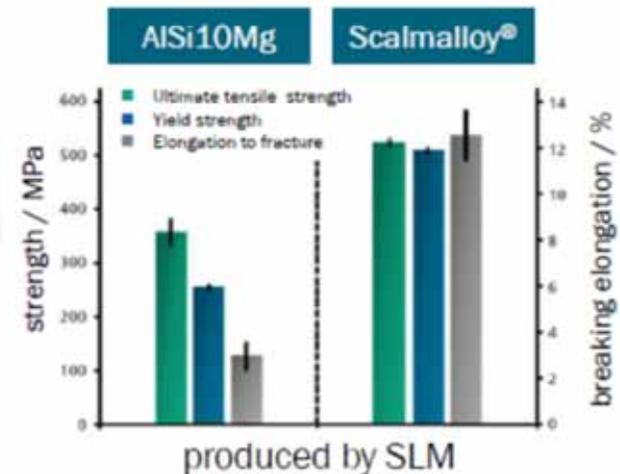
^aAalen University, Materials Research Institute, Bachstrasse 9/1, 73430 Aalen, Germany
^bAalen University, Laser Application Center, Bachstrasse 1, 73430 Aalen, Germany



Leghe per AM

Esempio alloy design per Additive Manufacturing:
Scalmalloy®: AlMgScZr sviluppata da Airbus: lega Al rinforzata con precipitazione di $Al_3(Sc,Zr)$

- ΔT solidificazione stretto
- Processo con raffreddamento rapido permette di ottenere una soluzione solida supersatura
- Nel successive trattamento termico si ottiene una precipitazione nanometrica di $Al_3(Sc,Zr)$ con aumento di resistenza.
- La distribuzione nanometrica di precipitati non deprime la duttilità al contrario di quanto avviene nella lega di riferimento AlSi10Mg.





Parametri che influenzano le proprietà dei materiali prodotti mediante processi additivi

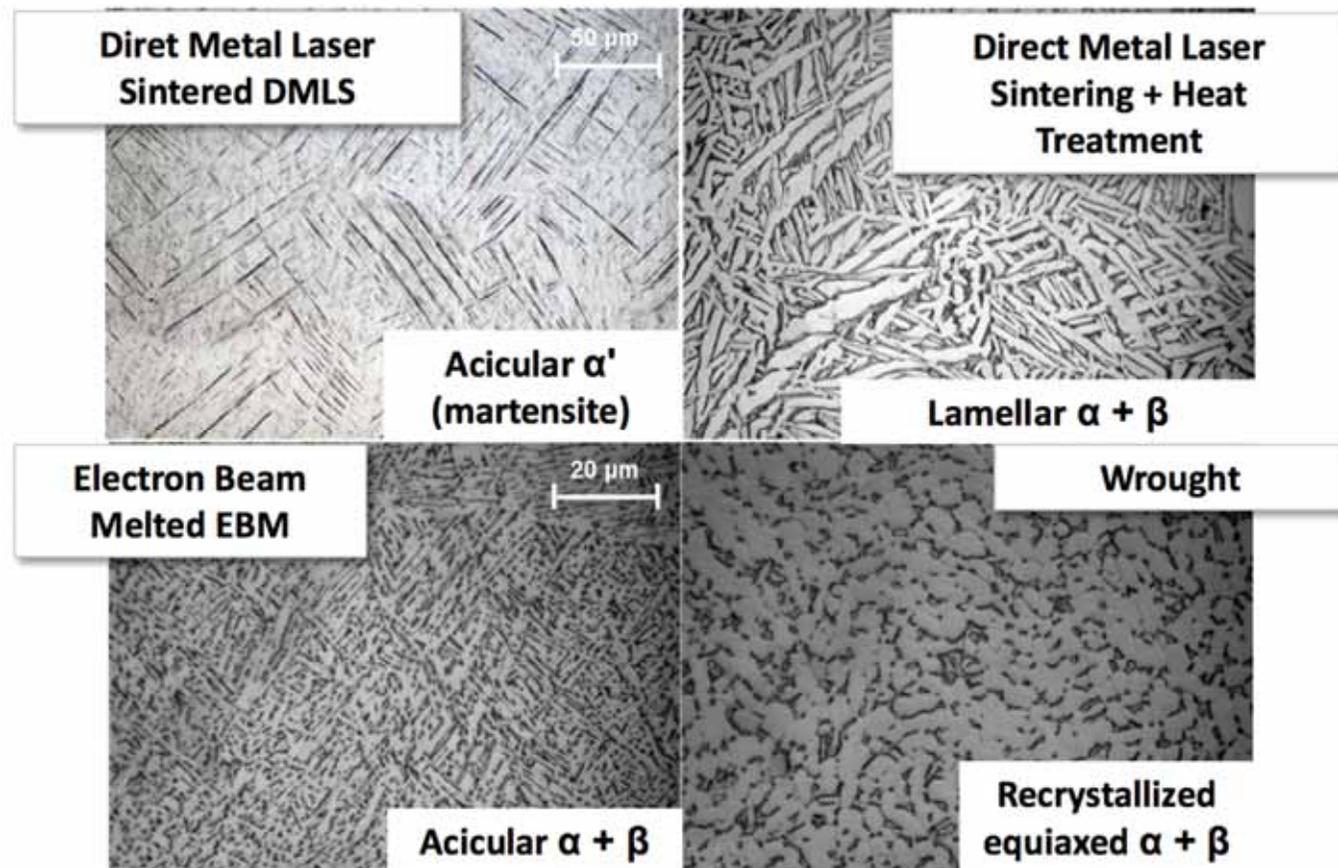
- La qualità e le proprietà di componenti AM sono fortemente dipendenti da:
 - ✓ AM processing technology (powder bed, powder feed, wire feed)
 - ✓ Energy transfer (laser, e-beam)
 - ✓ Beam shape
 - ✓ AM processing conditions (shielding gas, vacuum)
 - ✓ Scanning strategy – machine type
 - ✓ Scanning parameters (Plas, vlas, hatch distance, layer thickness)
 - ✓ Alloy powder shape, grain size & size distribution
 - ✓ Powder impurities
 - ✓ Pre-heating



Approfondire le correlazioni tra i differenti parametri e le proprietà del materiale

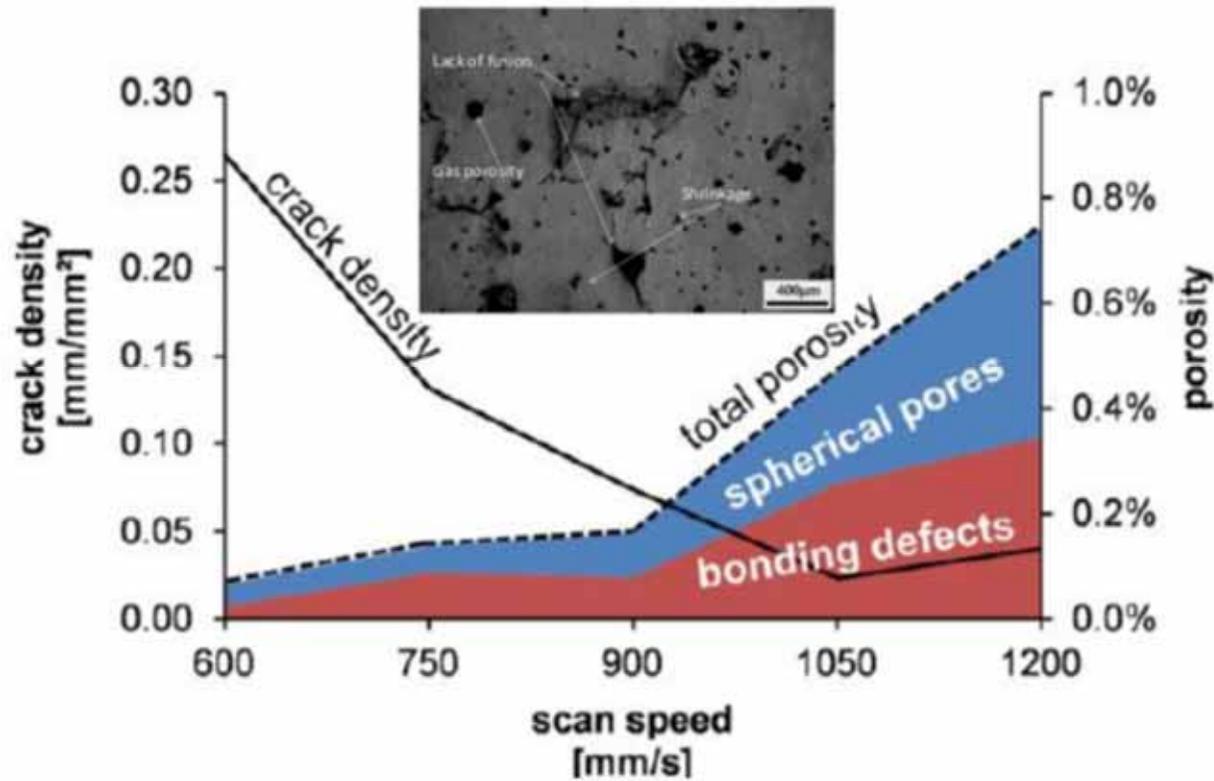


Parametri che influenzano le proprietà dei materiali prodotti mediante processi additivi





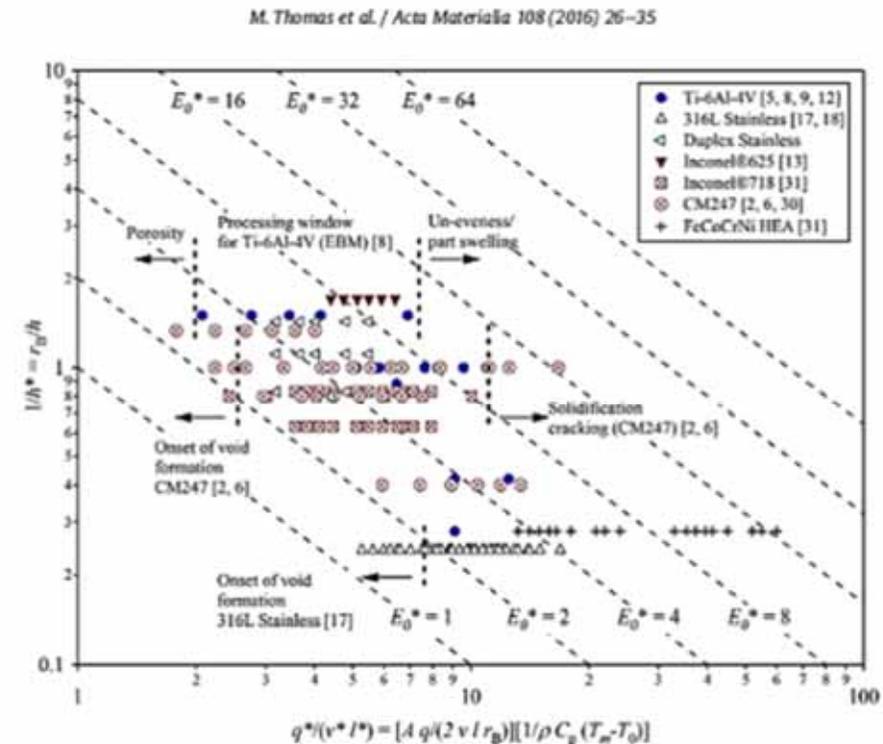
Parametri che influenzano le proprietà dei materiali prodotti mediante processi additivi





Parametri che influenzano le proprietà dei materiali prodotti mediante processi additivi

- ✓ Diagramma di processo AM un range di leghe (normalizzato) costruito basandosi su un gruppo di parametri adimensionali e dati estratti dalla letteratura.
- ✓ Sono mostrate le condizioni limite di processo tali per cui si evita il cracking durante solidificazione o l'onset di formazione dei vuoti.
- ✓ Permette di individuare le condizioni «safe» per la specifica lega.





Parametri che influenzano le proprietà dei materiali prodotti mediante processi additivi

Sfortunatamente non per tutte le leghe si riesce ad individuare una finestra di condizioni di processo che permetta di ottenere un prodotto di qualità accettabile.

Si individuano due strade

- Controllare la composizione per migliorare la fabbricabilità, eventualmente anche riducendo le prestazioni della lega

Modifica della
composizione
chimica

- Definire una nuova composizione con una chimica adatta al processo, assicurando anche le proprietà richieste

Sviluppo di una
nuova lega

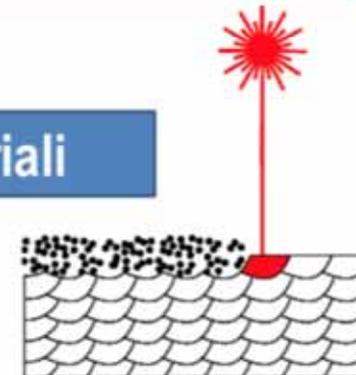


Sviluppo di materiali per processi additivi

SFIDA e OPPORTUNITA'

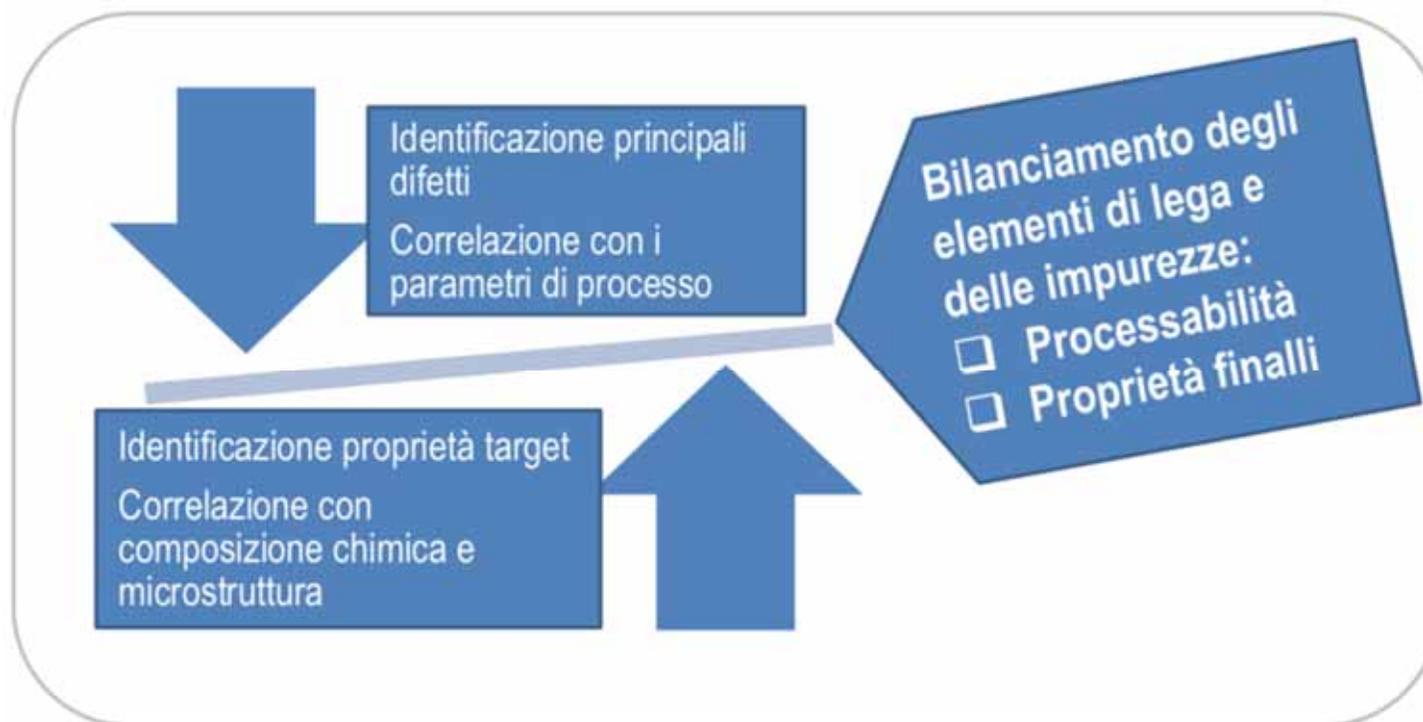
- L'ottimizzazione di leghe commerciali e/o lo sviluppo di leghe "tailored" sono aspetti ad oggi affrontati in modo molto marginale.
- Le leghe attualmente utilizzate, sviluppate per la fabbricazione mediante processi convenzionali, non permettono di cogliere tutte le potenzialità dei processi AM in termini di proprietà.

Il ruolo strategico dei materiali





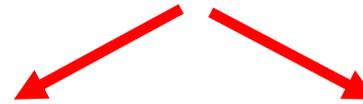
Sviluppo di materiali per processi additivi





Alloy design

Proprietà target componente/prodotto



- **Approccio empirico:**
 - definizione di una matrice **ampia** di composizioni sulla base di criteri metallurgici
 - Sperimentazione su scala di laboratorio
 - Trial & error fino alla definizione della chimica ottimizzata

- **Approccio modellistico**
 - definizione di una matrice **limitata** di composizioni con l'ausilio di tool modellistici
 - Selezione di finestre di processo e trattamento termico
 - Sperimentazione su scala di laboratorio
 - Fine tuning per ottimizzare la composizione della chimica.



Modellistica per la progettazione di leghe metalliche

Approccio modellistico

Supporto alla progettazione di composizioni innovative per AM, mediante l'utilizzo di codici di calcolo per:

- valutare l'effetto combinato degli elementi sulla distribuzione di fasi mediante codici di calcolo termodinamico e cinetico;
- valutare l'effetto delle condizioni di processo sulla microstruttura e sulla qualità del materiale.
- Valutare l'effetto della composizione chimica e della microstruttura sulle proprietà del materiale



Modellistica per la progettazione di leghe metalliche

Modelli termodinamici

- Calcolano la frazione delle fasi ***all'equilibrio*** e la loro composizione a partire da:
 - composizione chimica del sistema
 - temperatura e pressione.
 - Si basano sul metodo CALPHAD: descrizione delle fasi in termini di curve di energia libera e minimizzazione dell'energia libera totale del sistema con algoritmi di ottimizzazione.
 - Richiedono un database specifico per ogni sistema (p.es. acciaio, leghe a base Ni, leghe a base di Al, etc.).
 - L'accuratezza del database è fondamentale per la qualità del risultato finale.
- ✓ **Software commerciali: ThermoCalc, JMatPro, MatCalc...**



Modellistica per la progettazione di leghe metalliche

Modelli cinetici

I processi reali avvengono in condizioni diverse da quelle di equilibrio, generando una distribuzione di fasi nella lega metallica diversa da quella predetta dal diagramma di fase all'equilibrio.

Quanto più veloci sono le cinetiche realizzate nei processi, tanto più il sistema finale potrà differire da quello realizzato in condizioni di equilibrio.

I modelli cinetici permettono di valutare:

- cinetiche di trasformazione di fase
- cinetiche di precipitazione
- diagrammi CCT/TTT/TTP
- dimensione di precipitati

- ❑ **JMat Pro:** CCT, TTT, proprietà termofisiche, stima di proprietà meccaniche
- ❑ **MatCalc:** cinetiche di precipitazione/trasformazione di fase



Alloy design di leghe AM

Principali problematiche metallurgiche di materiali AM

La progettazione di leghe per AM deve tenere conto degli specifici problemi legati al processo.

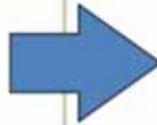
Ogni layer è sottoposto a **cicli ripetuti di riscaldamento e raffreddamento con estrazione del calore direzionale**:

- **solidificazione rapida**
 - ❖ fasi metastabili, eutettici
 - ❖ hot cracking
- **trasformazioni di fase multiple che producono microstrutture complesse**
 - ❖ alcune trasformazioni di fase possono essere sopresse, producendo fasi sovrasature;
 - ❖ formazione di fasi metastabili
- **strutture con elevato grado di tessitura e quindi proprietà anisotropiche**
- **elevati gradienti termici che generano stress residui.**



Alloy design di leghe AM

• **Formazione di cricche in raffreddamento**



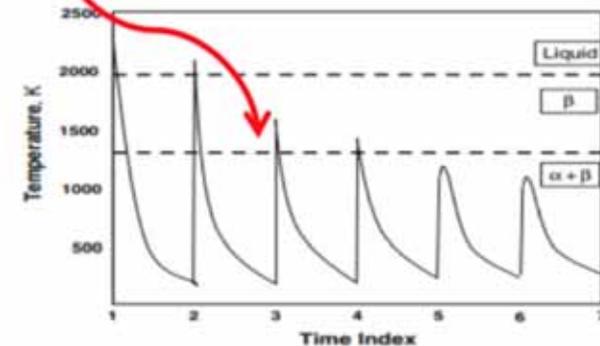
- Valutazione della formazione di fasi critiche
- Modelli termodinamici: temperature di formazione all'equilibrio
- Modelli cinetici: CCT e TTP cinetiche di precipitazione

3. Strain-age cracking (SAC)

- ✓ Si può attivare durante la deposizione di strati successivi di polveri. In fase di raffreddamento si può avere un incremento di proprietà meccaniche dovuto alla formazione di fase indurenti .
- ✓ Strati adiacenti raffreddati in modo diverso hanno differenti microstrutture /frazioni di fasi.
- ✓ Si generano stress meccanici che possono causare la formazione di cricche

4. Ductility-dip cracking

Formazione di difetti associata a buche di duttilità





Conclusioni

- Le tecnologie AM hanno enormi potenzialità.
- L'utilizzo di modellistica per la progettazione di leghe specializzate per questi processi può sicuramente offrire un supporto importante.
- Perché la modellistica di alloy design possa avere successo è necessario partire da una profonda conoscenza delle modalità con cui le microstrutture si sviluppano e dei meccanismi che portano alla formazione dei vari tipi di difetti.
- L'alloy design può essere più efficace se integrato con modelli di simulazione del processo per valutare i cicli termici, lo sviluppo di tensioni, ecc...
- La modellistica deve comunque essere intesa come strumento di supporto allo sviluppo di materiali, che non prescinde dalla necessità di verifica mediante opportune prove sperimentali.
- La progettazione mediante modellistica permette, però, di ridurre in modo significativo la matrice di prove sperimentali.



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI
DI PERUGIA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA

Grazie per l'attenzione!

