

# La strada verso la qualificazione delle tecnologie di manifattura additiva nel campo della corrosione: un caso studio della lega 625

S. Lorenzi, M. Cabrini, A. Carrozza, T. Persico, T. Pastore

Le tecnologie di manifattura additiva (additive manufacturing - AM) stanno costantemente guadagnando popolarità in diversi settori industriali strategici come quelli dell'Oil&Gas, aerospaziale e chimico. Questa famiglia di tecnologie, alcune con principi molto diversi tra loro, genera componenti caratterizzati talvolta da microstrutture non in equilibrio termodinamico capaci di conferire al materiale proprietà uniche. Tuttavia, risulta sempre più forte l'esigenza di approfondire la relazione tra la microstruttura e le proprietà dei materiali, non solo dal punto di vista meccanico ma anche rispetto alla corrosione che, in settori fortemente normati come l'Oil&Gas, è forse l'elemento più rilevante. Questo lavoro affronta lo studio del comportamento a corrosione di una superlega di nichel, nota come lega 625, al fine di definire la relazione tra la tecnologia produttiva e il comportamento in ambiente aggressivo. Tutte le valutazioni effettuate hanno permesso di stabilire una connessione tra le diverse tecnologie AM adottate, la microstruttura e il comportamento a corrosione del materiale. Il lavoro pone le basi per ulteriori studi, volti a stabilire quale tecnologia AM possa essere più adatta per applicazioni specifiche.

**PAROLE CHIAVE:** MANIFATTURA ADDITIVA, CORROSIONE, SUPERLEGA DI NICHEL, MICROSTRUTTURA

## INTRODUZIONE

La lega 625 (UNS N06625), nota comunemente come Inconel 625, è una superlega di nichel molto diffusa in settori industriali come l'aerospaziale, Oil&Gas, chimico e nucleare. I punti di forza di questa lega sono ottime caratteristiche meccaniche, saldabilità, buona resistenza al creep e ottima resistenza a corrosione [1], [2]. Gli alliganti principali sono Cr, Mo e Nb che aumentano la resistenza a corrosione per pitting e crevice in ambienti ossidanti e con cloruri, aumentando il pitting resistance equivalent number (PREN) [3]. Inoltre, il niobio contrasta l'effetto deleterio dei precipitati di Mo e Cr a bordo grano sulla resistenza a corrosione intergranulare [4]. Solitamente questa lega viene prodotta con lavorazioni tradizionali, che portano a un'eccessiva usura dell'utensile e ad elevati tassi di asportazione di materiale. Inoltre, la complessità della forma da ottenere grava sull'efficienza dell'uso del materiale e sul costo del pezzo prodotto [5], [6].

Le tecnologie di Additive Manufacturing (AM) non presentano queste limitazioni, poiché si raggiungono elevate efficienze di utilizzo di materiale e non si hanno utensili che lavorano meccanicamente il materiale [7], [8]. Le tec-

S. Lorenzi, M. Cabrini, A. Carrozza,  
T. Persico, T. Pastore

Università degli studi di Bergamo

...nologie AM  
...ttilizzando  
...stampa con  
...un manufat  
...duzione ad  
...la tipologia  
...assenza di  
...tecnologie  
...le è sicura  
...prevede la  
...lica grazie a  
...tecnologia  
...mico di rat  
...struttura a  
...caratteristic

### Analisi metallografica

Tutti i campioni sono stati preparati metallograficamente utilizzando carte al carburo di silicio con una grana progressivamente più fine, la fase di lucidatura è stata completata utilizzando un lubrificante a base d'acqua e una pasta diamantata da 1  $\mu\text{m}$ . I campioni sono stati osservati tramite microscopio ottico Keyence VHX-7100 e un microscopio elettronico a scansione Zeiss EVO 50. Per lo studio della microstruttura è stato utilizzato il reagente Kalling No.2.

### Studio del comportamento a corrosione intergranulare

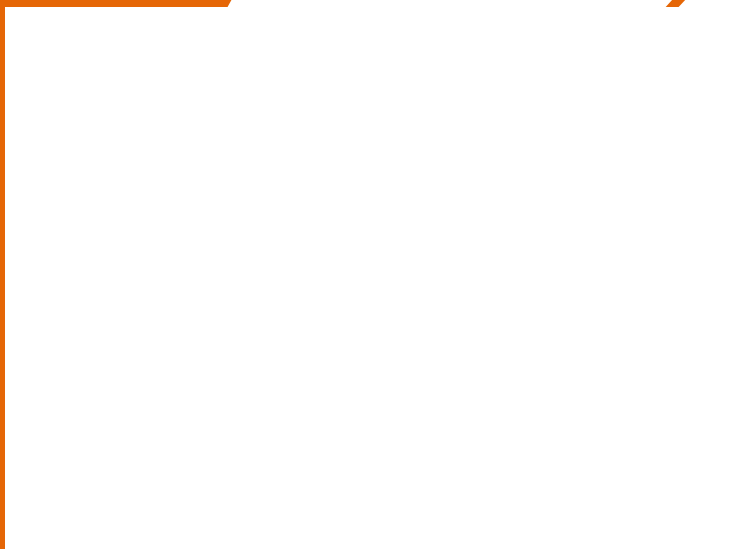
La suscettibilità alla corrosione selettiva intergranulare è stata valutata immergendo i provini in una soluzione bollente di solfato ferrico in acido solforico al 50% per 120 ore, in linea con la normativa ASTM G28-A. I campioni sono stati preparati lucidando ogni superficie con delle carte abrasive di SiC fino a una grana di 1200 grit. Inoltre, per le osservazioni al microscopio, due superfici ortogonali dei provini cubici sono state lucidate fino alla pasta diamantata da 1  $\mu\text{m}$ . Per i campioni cilindrici è stata lucidata una base. Prima dell'immersione, i provini sono stati risciacquati con ac-

qua, puliti in un bagno ad ultrasuoni di acetone, asciugati e pesati, utilizzando una bilancia analitica.

## RISULTATI E DISCUSSIONE

### Analisi metallografica

I provini prodotti con LPBF mostrano una tipica microstruttura a pozza fusa con dei grani colonnari sviluppati lungo la direzione di crescita. Le osservazioni al SEM hanno evidenziato una microstruttura dendritica cellulare con segregazioni di Nb e Mo nelle zone interdendritiche. La lega 625 ottenuta grazie DED presenta una microstruttura composta da ampie regioni dendritiche dove sono presenti dei precipitati ricchi di Mo nelle regioni interdendritiche. Le microstrutture osservate per i provini prodotti tramite LPBF e DED, visibili in Fig. 1 A-B, sono coerenti con la letteratura [18], [19]. I campioni prodotti tramite MEX presentano una microstruttura a grani equiassici ricca di precipitati visibile in Fig. 1 C. La barra laminata a caldo ha la microstruttura caratterizzata da grani equiassici di Ni con geminati visibile in Fig. 1 D.



**Fig.1** - Microstrutture al microscopio ottico dei provini prodotti con LPBF(A), DED(B), MEX(C) e HW(D) / Optical microscope microstructures of specimens processed by LPBF(A), DED(B), MEX(C) and HW(D)

Non è stata trovata presenza di carburi nei provini prodotti per LPBF e DED. Tuttavia, Marchese et al. [20] hanno dimostrato la presenza di carburi MC ricchi di Nb delle dimensioni minori di 100 nm in una lega 625 ottenuta per LPBF grazie all'utilizzo di un microscopio elettronico a trasmissione. Nei provini ottenuti per MEX sono presenti carburi in tutta la microstruttura: sia a bordo grano che all'interno. Inoltre, è stata osservata la presenza di inclusioni di ossidi ricchi di Al, Si e Cr. Questi ossidi sono circondati da secon-

de fasi, caratteristica attribuibile alla concentrazione delle impurità durante le fasi di deceraggio e sinterizzazione. In aggiunta è presente una seconda fase uniformemente distribuita ricca di Mo, Nb e Si. I carburi nella barra laminata a caldo sono allungati e formano catene semicontinue lungo i bordi di grano.

I campioni prodotti tramite LPBF e DED presentano basse porosità in linea con le recenti pubblicazioni, confermando come queste tecnologie siano state consolidate nel



## BIBLIOGRAFIA

- [1] M. Karmuhilan and S. Kumanan, "A Review on Additive Manufacturing Processes of Inconel 625," *J Mater Eng Perform*, vol. 31, no. 4, pp. 2583–2592, Apr. 2022, doi: 10.1007/S11665-021-06427-3/TABLES/5.
- [2] V. Shankar, K. Bhanu Sankara Rao, and S. L. Mannan, "Microstructure and mechanical properties of Inconel 625 superalloy," *Journal of Nuclear Materials*, vol. 288, no. 2–3, pp. 222–232, Feb. 2001, doi: 10.1016/S0022-3115(00)00723-6.
- [3] E. L. Hibner, "CORROSION/86," *NACE International*, vol. paper no. 181, 1986.
- [4] G.D. E. NC. Smith, "The effect of niobium on the corrosion resistance of nickel-base alloys," *Proc Int Symp Niobium High Temp Appl*, 2004.
- [5] Y. L. Hu, X. Lin, X. B. Yu, J. J. Xu, M. Lei, and W. D. Hu2]

[1] Y. The  
manu  
[2] A. C  
Defec  
MATI  
[17] F. Car  
Metal  
[18] Z. Tia  
10, no  
[19] M. Re  
prop  
[20] G. Ma  
laser  
[21] J. R. P  
625 w  
[22] H. We  
Trials  
doi: 1  
[23] A. Sc  
fabric  
[24] G. V.  
2022

## of

Additive m  
such as Oil  
principles,  
properties  
microstruc  
viour that i  
study of the  
logy and th  
AM techno  
for more st

**KEYWORDS:** ADDITIVE MANUFACTURING, CORROSION, NICKEL SUPERALLOY, MICROSTRUCTURE

[TORNA ALL'INDICE >](#)