UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Effetti della variazione composizionale dell'acciaio 316L processato tramite Laser Powder Bed Fusion

Effects of the compositional variation of 316L steel processed via Laser Powder Bed Fusion

Relatore:

Prof.ssa **Eleonora Santecchia**

Correlatore:

Prof.ssa **Maria Laura Gatto**

Dott. **Alberto Santoni**

Tesi di Laurea di:

Benedetta Amaolo

A.A. 2023/2024

A te, mamma,

mi hai insegnato a credere nei sogni e non mollare mai.

Sarai sempre ad un passo da me.

INDICE

INTRODUZIONE 1

1. Additive Manufacturing 2

1.1 Storia 2

1.2 Generalità 3

1.3 Laser Powder Bed Fusion (LPBF) 5

1.3.1 Principio di funzionamento 6

1.3.2. Parametri di processo 7

1.3.3 Difetti comuni 9

2. Acciaio 316L 10

2.1 Acciaio inossidabile 316L: caratteristiche generali 10

2.2 Acciaio inossidabile 316L con aggiunta di Rame 11

2.2.1 Produzione 316L-Cu con LPBF 12

3. Procedure Sperimentali 14

3.1 Preparazione metallografica 14

3.1.1 Assottigliamento meccanico 14

3.1.2 Attacco chimico 16

3.2 Analisi microstrutturale 16

3.2.1 Microscopia ottica 16

3.2.2 Microscopia elettronica 19

3.3 Prove microdurezza 22

4. Risultati Sperimentali 25

4.1 Risultati analisi microstrutturale 25

4.2 Risultati prove microdurezza Vickers 29

4.3 Confronto con i campioni 5 e 8 32

5. Conclusioni 34

BIBLIOGRAFIA 35

Indice delle figure

Figura 1: Macchina per stereolitografia 2
Figura 2: Esempio di ottimizzazione topologica.....4
Figura 3: Funzionamento di una macchina LPBF.....6
Figura 4: Processo di trasferimento di calore durante fusione e solidificazione.7
Figura 5: Schemi di diverse strategia di scansione 8
Figura 6 : Polveri di alluminio utilizzate in processo LPBF.....9
Figura 7: Barre cilindriche e piastre rettangolari realizzate tramite LPBF 11
Figura 8: Immagini acciaio 316L (a) e 316L-Cu 12
Figura 9: Immagine BSE SEM della polvere miscelata (2,5% Cu in peso) 12
Figura 10: Lappatrice 15
Figura 11: Esempio di microscopio ottico invertito.....18
Figura 12: Metallografia campione 4 piano XY con presenza di cricche.....19
Figura 13: Schema del sistema SEM 20
Figura 14: Micrografia elettronica campione 4 YZ, con rame.....22
Figura 16: Impronta del penetratore a forma di piramide quadrata. 23
Figura 17: Impronte effettuate durante la prova di microdurezza Vickers 24
Figura 18: Micrografie campione 4 YZ acquisite con MO, a) 20x1, b)50x1 ...25
Figura 20: Micrografia elettronica campione 4 YZ 27
Figura 21: Micrografia elettronica campione 6 YZ 27
Figura 22: EDS MAP Campione 4 YZ 28
Figura 23: EDS MAP campione 6 YZ 28

Abbreviazioni e acronimi

3D	Three-Dimensional
AISI	American Iron and Steel Institute
AM	Additive Manufacturing
ASTM	American Society for Testing and Materials
BSE	Backscattered Electrons
CAD	Computer-Aided Design
DNA	Deoxyribonucleic Acid
EDS	Energy Dispersive Spectroscopy
FDM	Fused Deposition Modeling
HV	Vickers Hardness
LOF	Lack of Fusion
LPBF	Laser Powder Bed Fusion
MAM	Metal Additive Manufacturing
MO	Microscopio Ottico
MOI	Microscopio Ottico Invertito
SE	Secondary Electrons
SEM	Scanning Electron Microscopy
SLA	Stereolithography
SLM	Selective Laser Melting
STL	Standard Tassellation Language
VED	Volumetric Energy Density

INTRODUZIONE

L'Additive Manufacturing è una tecnica di produzione additiva che sta guadagnando sempre più spazio nelle industrie negli ultimi anni. Questo sviluppo è dovuto ai suoi numerosi vantaggi e alla possibilità di applicazione in vari ambiti. Tra le tecnologie dell'AM, la Laser Powder Bed Fusion è riconosciuta per la produzione di parti in materiale metallico con proprietà meccaniche e strutturali elevate.
Tra i materiali in via di sviluppo maggiormente utilizzati si colloca l'acciaio AISI 316L, noto per caratteristiche come elevata resistenza alla corrosione e buone proprietà meccaniche.

In questa tesi, viene analizzata l'aggiunta del 10% in peso di rame al 316L prodotto tramite LPBF, effettuata al fine di migliorarne alcune caratteristiche quali le proprietà antibatteriche e la biocompatibilità con le strutture ossee per applicazioni in ambito biomedicale. Sono stati analizzati 2 di 12 campioni, studiandone le proprietà microstrutturali e meccaniche. In particolare, sono state effettuate prove di microdurezza Vickers su ogni campione, lungo il piano YZ.

L'elaborato è suddiviso in cinque capitoli, come segue:

1. Introduzione al mondo della manifattura additiva attraverso la storia dello sviluppo, la classificazione dei processi, i vantaggi, le limitazioni e le principali applicazioni;
2. Descrizione delle caratteristiche dell'acciaio 316L e dell'aggiunta di rame, con focus sulle proprietà antibatteriche;
3. Esposizione delle procedure effettuate in laboratorio per la caratterizzazione dei campioni;
4. Illustrazione dei principali risultati ottenuti dall'analisi microstrutturale, delle prove di microdurezza e dal confronto con altri campioni;
5. Conclusioni dello studio e possibili sviluppi futuri.

1. ADDITIVE MANUFACTURING

L'Additive Manufacturing, comunemente conosciuta come stampa 3D, è un processo additivo di fabbricazione che ha subito uno sviluppo significativo negli ultimi anni. Tale tecnologia permette di ottenere un prodotto finito tramite la deposizione di strati di materiale, partendo da un file CAD 3D.

1.1 Storia

Le origini dell' Additive Manufacturing sono da attribuire già al 1980, quando fu sviluppata la prototipazione rapida, RP, tecnologia basata sulla creazione strato per strato di un modello tridimensionale attraverso la progettazione assistita da computer (CAD) [1].

Nel 1983, Charles Hull ideò la stereolitografia (SLA), oggi considerata l'inizio dello stampaggio 3D. Tale processo consiste nella polimerizzazione o solidificazione di un polimero attraverso l'interazione di un laser a luce ultravioletta con la resina, grazie ad un sistema di specchi. Il modello viene prodotto attraverso un software CAD e poi tradotto in un file STL, grazie al quale i pezzi da realizzare vengono "divisi in fette", pari al numero di strati da realizzare [2] [3].

Nella Figura 1 sono definite le parti di una macchina per stereolitografia.

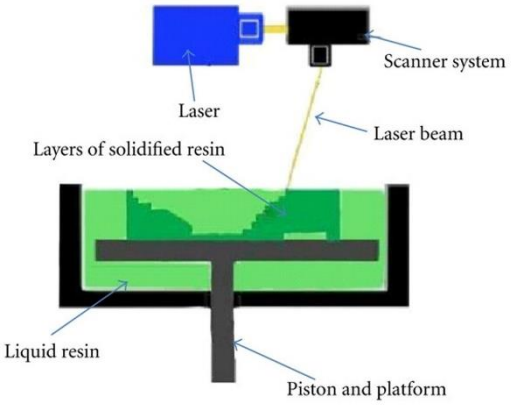


Figura 1: Macchina per stereolitografia [4]

Pochi anni dopo, nel 1986, alcuni ricercatori si unirono per riprendere le idee di Hull e sviluppare il processo di Selective Laser Sintering, o Sinterizzazione, sostituendo l'utilizzo della resina con il Nylon. Grazie a questo cambiamento non fu più necessario l'utilizzo di supporti durante lo stampaggio.
Le tecnologie descritte, insieme alla Fused Deposition Modelling (FDM), basata sullo stampaggio di un materiale fuso idealizzata da Scott Crump nel 1988, erano tutti processi basati sulla creazione di modelli od oggetti in materiale plastico [5]. Soltanto dalla fine degli anni 90 fu reso possibile l'utilizzo anche dei metalli nella stampa 3D, portando allo sviluppo di diverse tecnologie.

La diffusione dell'additive manufacturing si propagò rapidamente con l'avvenire del nuovo millennio. Il tecnico tedesco Meiners del Fraunhofer presentò il brevetto della tecnologia del Selective Laser Melting (SLM). Nello stesso periodo altre aziende si affacciarono alla manifattura additiva con materiale metallico, definita in modo più preciso Metal Additive Manufacturing (MAM) [6].
I progressi di questo settore continuano ad evolversi, facendo nascere costantemente nuove tecnologie e applicazioni innovative.

1.2 Generalità

A differenza delle tecniche di fabbricazioni tradizionali, che prevedono la sottrazione o la deformazione del materiale per ottenere l'oggetto finale, la manifattura additiva utilizza materia prima sottoforma di filo, polvere o materiale fuso. Queste tecnologie innovative possono essere quindi utilizzate per la realizzazione di prodotti da vari materiali come metalli, polimeri, ceramiche e compositi [7].

Secondo l'ASTM [8], la gamma di tecnologie AM è divisa in sette categorie principali basate sulle tipologie di materiale e il metodo di deposito di quest'ultimo:
1. Binder Jetting
2. Direct Energy Deposition
3. Material Extrusion
4. Material Jetting
5. Powder Bed Fusion

6. Sheet Lamination
7. Vat Photopolymerization

La manifattura additiva sfrutta la rielaborazione delle geometrie grazie all'ottimizzazione topologica, un metodo di progettazione strutturale che permette la realizzazione di oggetti utilizzando il materiale solo dove è necessario e quindi una riduzione di peso del pezzo prodotto [9].

Figura 2: esempio di ottimizzazione topologica [10]

Secondo lo studio riportato dagli articoli [11] e [12], sono diversi i vantaggi dell'utilizzo dell'Additive Manufacturing rispetto alla produzione tradizionale. Primo tra tutti l'ecosostenibilità, in quanto le materie prime utilizzate sono riciclabili e i materiali di scarto della produzione possono essere riutilizzati; inoltre, i piccoli lotti di produzione sono altamente personalizzabili e quindi rendono questa tecnologia innovativa adatta ad una produzione su richiesta in molti campi.
Tra i vantaggi più significativi si trova la possibilità di raggiungere livelli di complessità geometrica non ottenibili con altre tecniche di fabbricazione e la riduzione dei tempi di produzione grazie alla condivisione dei file digitali in CAD ai produttori.
È necessario, d'altra parte, tenere conto delle limitazioni di questa tecnologia.
I tempi di produzione dipendono molto dalle dimensioni del pezzo da realizzare: oggetti di grande volume, infatti, richiedono più materiale e di conseguenza una fabbricazione più lenta. Le dimensioni stesse possono essere uno svantaggio, poiché le stampanti sono in grado di realizzare solo oggetti di dimensioni più piccole della stampante [13].

Inoltre, anche il costo iniziale delle attrezzature e dei materiali è una barriera da superare per le aziende che intendono approcciarsi allo stampaggio 3D [11]. I prodotti realizzati mediante additive manufacturing potrebbero aver bisogno di lavorazioni successive per migliorare la finitura superficiale e la qualità generale.

Grazie ai numerosi vantaggi che presenta, la manifattura additiva viene oggi impiegata in molti ambiti, spaziando dall' automotive al biomedicale, dall'aerospaziale alla moda e all'arte.
Secondo lo studio [14], alcuni dei principali settori in cui questa tecnologia innovativa si sta facendo spazio sono:
-settore aerospaziale: grazie alla stampa 3D è possibile realizzare componenti resistenti e leggeri, con proprietà meccaniche superiori;
-settore biomedicale: le strutture create tramite AM possono essere facilmente personalizzabili, migliorando la produzione di protesi di ogni tipo. Inoltre, è possibile ottenere parti con porosità simile a quella ossea, evitando il rigetto da parte dell'organismo;
-settore automobilistico: è possibile fabbricare prototipi, parti leggere e componenti personalizzate anche in questo caso, i motori stessi possono essere realizzati mediante stampaggio, riducendo i tempi e i costi di produzione;
-settore della moda: la fabbricazione di prodotti complessi può essere facilitata e resa più accurata e precisa; con l'utilizzo della stampa 3D, i designer sono in grado di produrre materiali e tessuti nuovi e flessibili.

Lo sviluppo della tecnologia additiva permetterà in futuro di accogliere nuove tendenze come lo stampaggio 4D, i materiali programmabili e andare incontro ad una sostenibilità sempre più elevata nelle industrie.

1.3 Laser Powder Bed Fusion (LPBF)

La tecnologia Laser Powder Bed Fusion, (o Fusione laser a letto di polvere), conosciuta anche come Selective Laser Melting (SLM), consiste nella fusione completa di polvere di materiale metallico sotto l'azione di uno spot laser ad alta potenza. Grazie a questo processo vengono ridotti i tempi dei cicli di produzione di parti complesse, garantendo ai fabbricati eccellenti proprietà meccaniche.

1.3.1 Principio di funzionamento

Il funzionamento della LPBF si basa su un sistema di lenti e di uno scanner per indirizzare il laser. Come si può notare dalla Figura 3, la polvere metallica, contenuta in apposite tramogge, viene distribuita uniformemente sul piatto di stampa mediante una racla.

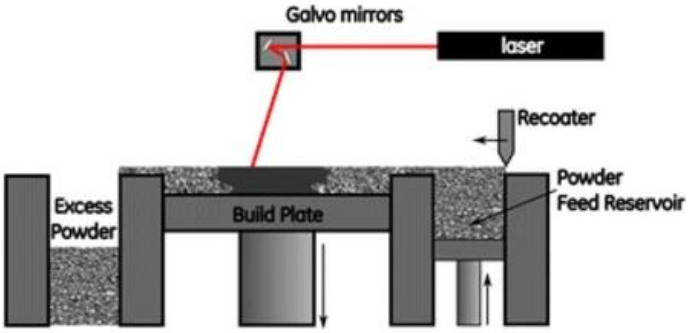


Figura 3: Funzionamento di una macchina LPBF [15]

Lo strato di polvere presenta uno spessore tra i 20 e i 60 micron. Il laser effettua la scansione della sezione trasversale del pezzo, così da fondere le particelle metalliche. Al termine del primo strato, il piatto di stampa si abbassa per permettere la distribuzione di un altro strato di polvere. Il processo viene ripetuto fino al completamento della parte da realizzare [16].

Terminata l'operazione, il pezzo viene rimosso e post-processato tramite trattamenti termici e finitura superficiale.

La piastra dove viene stampato il pezzo, oltre che fungere da supporto, deve dissipare il calore accumulato durante la stampa. Per questo motivo può essere riscaldata per abbassare il gradiente termico con la parte costruita e diminuire di conseguenza la possibilità che si formino tensioni residue e quindi delle deformazioni del pezzo. La distribuzione del calore attraverso la superficie è un parametro che dipende sia dalla qualità del fascio laser che dalla sua lunghezza d'onda [17].

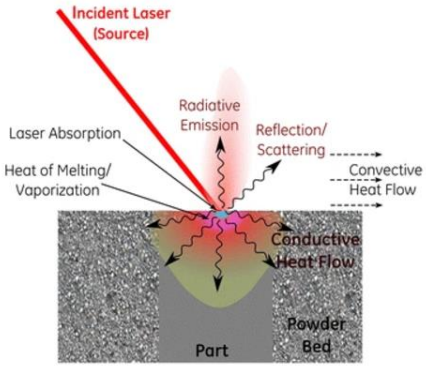


Figura 4: processo di trasferimento di calore durante fusione e solidificazione [18]

Come descritto dall'articolo prima citato, per avviare il processo è necessario riempire la camera con un gas inerte, come argon o azoto con una bassa concentrazione di ossigeno.

Per il processo LPBF vengono utilizzate polveri di metalli o leghe; in particolar modo vengono utilizzate leghe di alluminio e titanio, che conferiscono resistenza a trazione, durezza e basso peso, acciai resistenti alla corrosione e biocompatibili e superleghe di nichel [17].

La tecnologia di Laser Powder Bed Fusion presenta dei vantaggi rispetto alle altre tecnologie additive, in quanto è possibile ottenere livelli di precisione elevata, realizzare geometrie molto complesse e ridurre al minimo lo spreco di materiale [19].

1.3.2. Parametri di processo

I parametri di processo da tenere in considerazione durante la produzione sono molteplici; tra essi troviamo:

-Parametri laser e di scansione, come potenza del laser, velocità di scansione e strategia di scansione;

-Proprietà del materiale in polvere, come forma, densità e spessore dello strato;

-Proprietà del letto di polvere;

-Parametri dell'ambiente di costruzione, come la temperatura di stampa. La potenza del laser viene regolata a diversi livelli in base alle caratteristiche desiderate, alla zona di scansione e la dimensione dello spot da fondere. Il processo di fusione avviene attraverso un raggio laser a fibra ottica, caratterizzato da lunghezze d'onda comprese tra 1,06 e 1,08 micron [20].

La velocità di scansione è un parametro che determina il tempo di applicazione del laser in uno stesso punto. I valori tipici sono nell'ordine di 10-100 millimetri al secondo.

Questi due primi parametri, insieme alla spaziatura di scansione (h) e lo spessore dello strato di polvere (t), determinano l'energia necessaria di fusione, meglio descritta come densità di energia volumetrica (VED) [21]:

$$VED = \frac{P}{vht}$$

P: Potenza del laser

v: velocità di scansione

h: spaziatura di scansione

t: spessore dello strato di polvere

La scansione può avvenire in due diversi modi: unidirezionale e bidirezionale (Figura 5). Il fascio laser si muove sempre lungo la stessa direzione nella scansione unidirezionale, mentre nella seconda tipologia di scansione, zig zag o chessboard, si divide l'area in piccole celle quadrate, riducendo la lunghezza del vettore di scansione, andando a ridurre lo stress termico e migliorando la qualità di pezzi di grandi dimensioni [22].

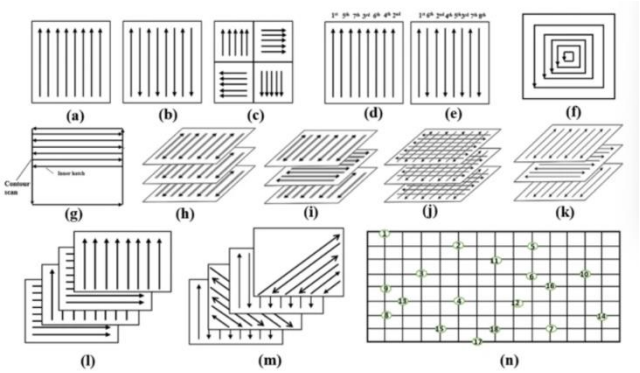


Figura 5: schemi di diverse strategia di scansione[23]

Le polveri metalliche utilizzate nella SLM presentano una forma sferica, così da permettere una buona scorrevolezza e un'elevata densità del letto di polvere e di conseguenza uno strato di polvere costante che assicuri un assorbimento uniforme del raggio laser nell'area di costruzione [24].

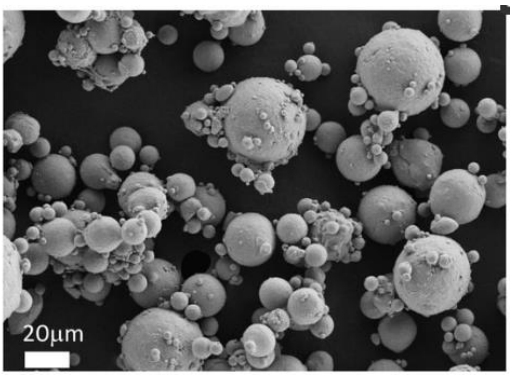


Figura 6 : immagine ottenuta tramite microscopia elettronica a scansione SEM di polveri di alluminio utilizzate in processo LPBF con dimensione tra 1 e 30 micron [25]

1.3.3 Difetti comuni

La qualità delle parti prodotte tramite LPBF e le loro proprietà sono influenzate da diversi fattori come i parametri di processo, le condizioni di lavoro e la natura della polvere di partenza.

Se uno dei parametri di processo viene scelto in modo errato, è inevitabile l'insorgere di difetti. I più comuni possono essere classificati in: porosità, formazione di vuoti per fusione incompleta (LOF, lack of fusion) e cricche [26].
Le porosità sono cavità solitamente di piccole dimensioni; possono crearsi a causa della presenza di gas intrappolato (cavità di forma sferica) durante la solidificazione o per un'elevata energia laser. La presenza di questo difetto può portare alla riduzione della resistenza meccanica del pezzo [27].
La fusione incompleta di alcune zone può portare alla formazione di vuoti. In particolar modo questo accade quando le polveri metalliche non sono completamente fuse e viene depositato un nuovo strato. Di conseguenza, i vuoti possono contenere particelle di polveri metalliche non fuse. Per ridurre questa tipologia di difetto è necessario aumentare la potenza laser o diminuire la velocità di scansione [26].
Le cricche sono piccole fratture che compromettono le proprietà del pezzo in costruzione e possono propagarsi fino a causarne la rottura. Possono essere causate dalla presenza di elevati valori di tensione residua o da elevati gradienti di temperatura. È possibile effettuare dei trattamenti termici post-processo per ridurre le tensioni residue interne [28].

2. ACCIAIO 316L

2.1 Acciaio inossidabile 316L: caratteristiche generali

L'acciaio inossidabile 316L è un acciaio austenitico composto da un basso contenuto di carbonio (C<0,03%), un'alta percentuale di cromo (Cr) pari circa al 16-18%, Nichel (Ni,10-14%) e Molibdeno (Mo, 2-3%).
Il basso contenuto di carbonio che caratterizza gli acciai come il 316L, 304L o il 317L riduce la probabilità di frattura intergranulare [29].
La sua versatilità lo rende adatto all'applicazione in settori diversi tra loro, dagli articoli per la casa all'aerospazio. Le proprietà principali includono elevata duttilità e saldabilità, moderato limite di snervamento e elevata resistenza alla corrosione a fronte dei costi relativamente bassi [30].

L'acciaio 316L lavorato tramite AM presenta caratteristiche che differiscono dall'acciaio 316L lavorato convenzionalmente. In particolar modo, gli acciai 316L processati tramite LPBF presentano una maggiore resistenza allo snervamento, minori porosità e maggiore resistenza alla durezza. Il processo produce una struttura a grani fini che favorisce la rapida solidificazione e di conseguenza una crescita epitassica dei grani. Questa tipologia di struttura migliora la resistenza della lega tramite un meccanismo simile all'effetto di Hall-Patch, mentre la duttilità marcata deriva dall'interazione tra le dislocazioni [31].
Inoltre, grazie alla presenza del molibdeno, riducendo la perdita di cromo durante il processo, viene migliorata anche la capacità di resistere alla corrosione, rendendo il materiale adatto ad essere applicato anche in ambito biomedicale [29].

Dalla Figura 7, si possono osservare delle barre cilindriche e delle piastre rettangolari costruite tramite AM e sottoposte a ricottura, utilizzate per la caratterizzazione della microstruttura e per prove meccaniche.

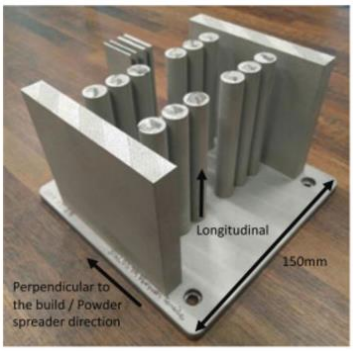


Figura 7: barre cilindriche e piastre rettangolari realizzate tramite LPBF e sottoposte a ricottura[32]

2.2 Acciaio inossidabile 316L con aggiunta di Rame

Negli ultimi anni, si è posto interesse nell'aggiunta di Rame (Cu) agli acciai inossidabili 316L. È stato dimostrato come l'aggiunta di questo elemento, nella sua forma ionica Cu^{2+}, ha attività antimicrobiche in quanto l'acciaio inossidabile 316L è suscettibile alle infezioni batteriche, causando non pochi problemi nell'ambito medicale [33]. Il rilascio degli ioni Cu da parte del campione inibisce l'adesione dei biofilm batterici.
Inoltre, la porosità del materiale modificato simile a quella dell'osso umano, aumenta la biocompatibilità del materiale.

Inoltre, è importante stabilire con precisione la percentuale di Cu da aggiungere, in quanto una quantità troppo elevata potrebbe comportare aree ricche dell'elemento con rilascio veloce nell'organismo e di conseguenza un avvelenamento dei tessuti, danni alla membrana cellulare e al DNA [34].

La presenza del rame influisce inoltre anche sulle proprietà meccaniche dell'acciaio 316L. Dall'articolo [35], si osserva come l'aggiunta di Cu non svolge un ruolo particolarmente evidente nella raffinazione dei grani ma aumenta la resistenza alla corrosione del materiale, anche se diversi studi presentano delle discordanze su tale effetto [36], sottolineando che il rame possa ridurre la stabilità del film passivo e la resistenza alla corrosione dell'acciaio inossidabile.

Nella Figura 8 vengono confrontate le micrografie di campioni 316L non modificati (a) e con aggiunta di rame(b), notando come le pozze di fusione nell'immagine b

hanno dimensioni piuttosto contenute grazie alla rapida solidificazione all'aumento del gradiente di temperatura causato dalla maggiore conduttività termica del rame presente [37].

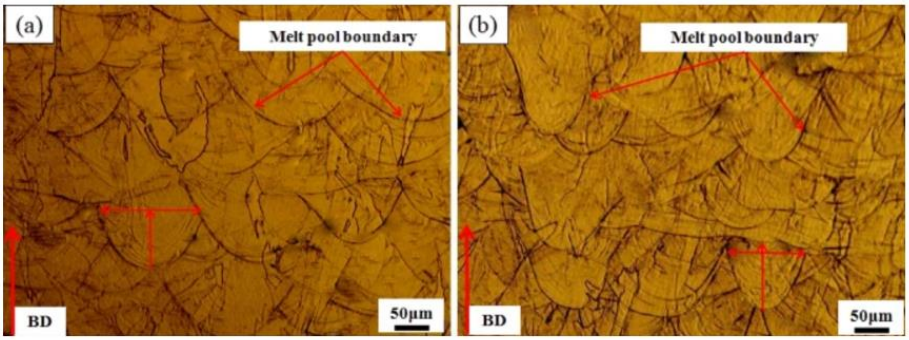


Figura 8:immagini acciaio 316L (a) e 316L-Cu [38]

2.2.1 Produzione 316L-Cu con LPBF

Negli ultimi anni sono stati condotti studi sui metodi di produzione additiva di acciai inossidabili con aggiunta di vari elementi per verificare le variazioni delle proprietà e i benefici che tali aggiunte possono offrire.

Una delle tecnologie AM applicate per questo tipo di studi è la SLM, fusione laser selettiva, per la capacità di produrre parti metalliche con l'utilizzo di un raggio laser che fonde le polveri metalliche. L'aggiunta del Rame può avvenire attraverso la miscelazione di polvere 316L e polvere di Cu, utilizzando un mulino a sfere a bassa energia. Dalla Figura 9, è possibile osservare tale miscelazione.

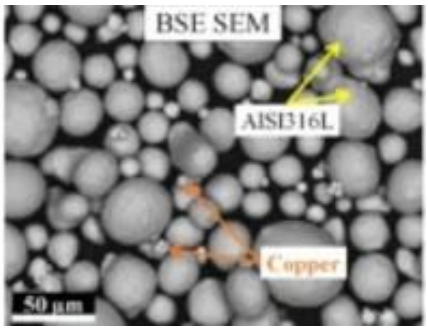


Figura 9: immagine BSE SEM della polvere miscelata (2,5% Cu in peso).[38]

Grazie all'utilizzo della tecnologia LPBF, si riesce ad ottenere una maggiore precisione e un rafforzamento dei bordi di grano, con dimensioni minori e maggiore velocità di raffreddamento.

I parametri di processo a cui prestare attenzione sono molteplici, per questo alcuni studi, tra cui [39], suggeriscono l'utilizzo di algoritmi di apprendimento automatico per semplificare il processo di ricerca dei parametri SLM. Inoltre, grazie a questo tipo di apprendimento, è possibile studiare anche la variazione delle proprietà meccaniche e il rilevamento dei difetti.

3. PROCEDURE SPERIMENTALI

In laboratorio sono stati analizzati 12 campioni di acciaio 316L con aggiunta del 10% in peso di rame (Cu). I provini sono stati precedentemente stampati con parametri di processo differenti, elencati di seguito:

Campione	Potenza laser $[W]$	Velocità di scansione $[\frac{mm}{s}]$	Hatching Distance	Spessore $[\mu m]$	VED $[\frac{J}{mm^3}]$
1	110	700	70	20	112.2
2		850			92.4
3		1000			78.6
4	95	700			96.9
5		850			79.8
6		1000			67.9
7	80	700			81.6
8		850			67.2
9		1000			57.1
10	65	700			66.3
11		850			54.6
12		1000			46.4

In particolare, in questa tesi vengono analizzati i campioni 4 e 6 processati con la stessa potenza laser di 95 Watt e diverse velocità di scansione pari a 700 e 1000 millimetri al secondo. I risultati vengono messi poi in confronto con quelli riportati dai provini 5 e 8.

3.1 Preparazione metallografica

3.1.1 Assottigliamento meccanico

I campioni sono stati sottoposti a levigatura e lucidatura per facilitare l'analisi della microstruttura e la determinazione dei valori di microdurezza.

Per il processo di assottigliamento meccanico vengono usate delle macchine lappatrici a dischi rotanti, che rimuovono progressivamente strati del materiale

metallico. Il lavoro viene effettuato dalle carte abrasive al SiC di diverse granulometrie, poggiate sui dischi della lappatrice.

Le carte vengono classificate in base alla densità media dei carburi di silicio per $inch^2$, ovvero al numero di carburi e alla loro grandezza sulla superficie. Minore è il numero riportato sulla carta, maggiore sarà il solco prodotto da essa.

La scelta della carta dipende dal materiale metallico e dal risultato che si vuole ottenere.

In questo caso sono state usate prevalentemente carte abrasive P2400 e P4000. Passando da una carta all'altra, è importante ricordare di ruotare il campione di 90° per garantire una finitura superficiale ottimale.

Figura 10: Lappatrice

Al termine della levigatura, per ottenere la lucidatura a specchio voluta si utilizza un piatto rotante dotato di panno abrasivo, bagnato con lubrificante e pasta diamantata. Questa fase è fondamentale per le osservazioni al microscopio ottico e l'effetto dell'attacco chimico risulterà ottimale poiché i graffi sono troppo piccoli per essere percepiti dall'occhio umano.

3.1.2 Attacco chimico

L'attacco chimico, o elettrochimico, è una procedura localizzata che mette in risalto i dettagli della microstruttura e attacca le discontinuità presenti, quali bordi di grano, seconde fasi, carburi e strutture allotropiche. Il tipo di attacco da effettuare dipende dal materiale che si deve analizzare e da cosa si vuole far risaltare. In generale, sono costituiti da un solvente e da uno o più acidi e il risultato dipende anche dalle condizioni di laboratorio (temperatura e umidità).
Il tempo di permanenza è un fattore principale, per questo motivo è necessario agire in maniera progressiva, rispettando un range ben definito. Se il campione viene tolto in anticipo ci si trova in condizioni di sottoattacco e i dettagli non saranno visibili in maniera nitida. D'altra parte, un tempo di esposizione elevato del campione comporta un sovraattacco con parti della superficie bruciata, rendendo quindi necessario ripetere l'intera procedura.
L'attacco chimico viene effettuato all'interno di una cappa e con dispositivi di sicurezza opportuni.
Per i campioni analizzati è stato effettuato un attacco elettrochimico con 100 ml di Acqua e 2% di acido ossalico a 5 Volt. Il tempo di attacco per ogni provino è stato di 45 secondi.

3.2 Analisi microstrutturale

La microstruttura viene studiata attraverso l'utilizzo di strumenti diversi per osservare gli elementi del campione, la qualità e i difetti che lo caratterizzano. In base al tipo di interazione che lo strumento ha con l'oggetto in analisi, vengono divisi in microscopi ottici (sfruttano la luce visibile) o elettronici (utilizzano le interazioni elettrone-materia).

3.2.1 Microscopia ottica

L'analisi microstrutturale è stata inizialmente effettuata attraverso un Microscopio Ottico invertito (MOI). Questo strumento utilizza la radiazione ottica, con una lunghezza d'onda compresa fra 400 e 750 nm, per ingrandire e risolvere. Per generare l'immagine della superficie in analisi viene utilizzato un sistema di lenti che deviano e focalizzano i fotoni. Il termine "invertito" deriva dal fatto che la luce e l'obiettivo sono invertiti rispetto ai microscopi tradizionali.

Il funzionamento del microscopio ottico si basa sull'utilizzo di due lenti principali: l'obiettivo e l'oculare. La prima lente è posta davanti all'oggetto abbastanza vicina al fuoco, mentre la seconda è posta ad una distanza tale per cui il fuoco coincide con l'immagine dell'oggetto. In poche parole, l'immagine creata dalla prima lente diventa l'oggetto della seconda.

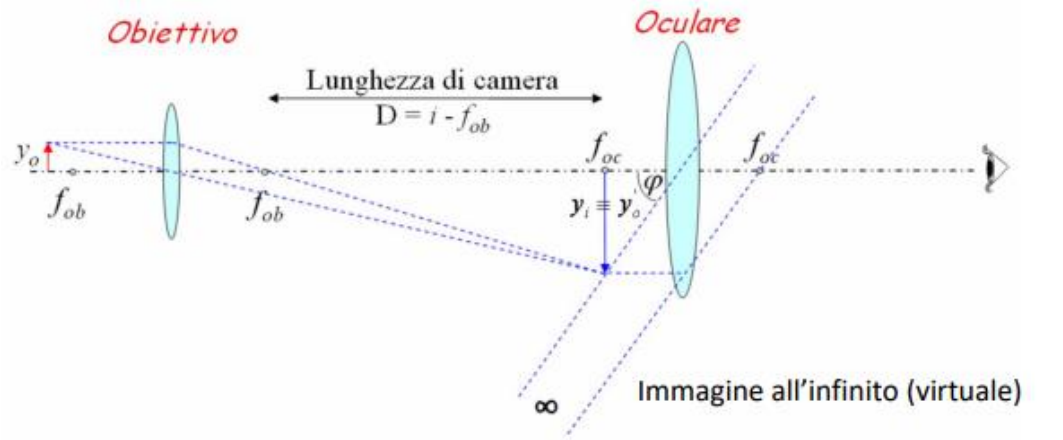


Figura 11: schema funzionamento del MOI [40]

L'ingrandimento totale del microscopio è il prodotto dell'ingrandimento della lente obiettivo e dell'oculare.

La parte meccanica dello strumento è composta da uno stativo, costituente il sostegno metallico centrale che poggia su una base pesante.

Gli obiettivi dei microscopi sono spessa classificati in termini di aperture numerica (NA), ovvero, la misura della capacità dello strumento di raccogliere la luce e di risolvere i dettagli del campione mentre si lavora ad una distanza fissa dal campione stesso.

$$NA = n \cdot sin\alpha$$

dove n è l'indice di rifrazione del mezzo di immersione utilizzato tra l'obbiettivo e il campione, mentre α è l'angolo massimo del cono di luce che entra nella lente obiettivo. Per aumentare il potere risolutivo del microscopio è possibile aggiungere un'altra lente, definita condensatore, al fine di generare un cono sul lato di illuminazione del campione. In questo modo l'obiettivo raccoglie raggi di luce dovuti ad angoli di diffrazione maggiori. La massima risoluzione, ovvero, la distanza minima osservabile tra due punti, si ottiene quando l'angolo di apertura del condensatore corrisponde a quello dell'obiettivo.

Aumentando l'angolo, si può andare incontro al problema delle aberrazioni, generate dall'astigmatismo. È necessario, in questo caso, aggiungere il diaframma,

controllando l'apertura del condensatore. Quest'ultimo componente corregge le aberrazioni aumentando la profondità di campo, a discapito di NA, e aumentando il contrasto. In ogni modo è necessario trovare dei compromessi poiché il diaframma introduce l'ulteriore problema della diffrazione della luce [40].

Dopo aver accuratamente preparato il campione, è possibile osservare la microstruttura, le porosità e i vari difetti; nel caso dello studio effettuato, nei campioni prodotti tramite LPBF si possono evidenziare le tracce delle melting pool e le modalità di scansione. Dalla figura 11 è possibile visualizzare lo schema di un microscopio ottico invertito.

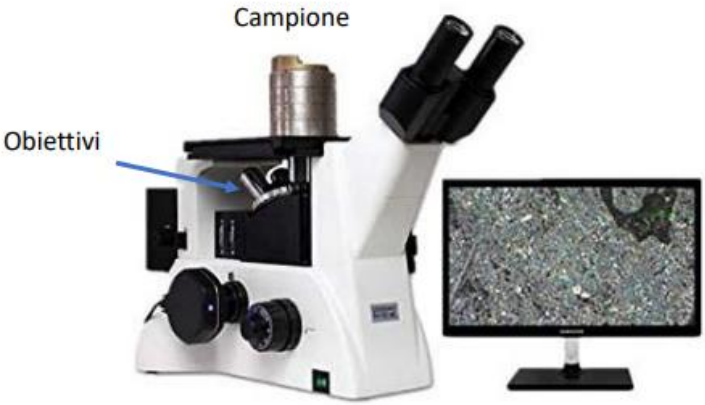


Figura 12: esempio di microscopio ottico invertito [40]

Durante le attività di laboratorio, sono state effettuate delle micrografie dei campioni da analizzare con ingrandimenti pari a 20x, 50x e 100x e un'apertura numerica dell'obbiettivo di 1,25. Le immagini sono state acquisite dopo aver attentamente impostato la messa a fuoco, la polarizzazione e la luminosità dello strumento per migliorarne il contrasto.
In particolar modo, il suo utilizzo è stato destinato al controllo delle superfici del campione dopo la lucidatura meccanica e all'osservazione della microstruttura.

Figura 13: Metallografia campione 4 piano XY con presenza di cricche 20x1.25

È bene sottolineare che l'ingrandimento del MO è limitato da due fattori: un limite strumentale, dovute alle necessarie dimensioni ridotte e compatte dello strumento e un limite fisco in quanto la dimensione del più piccolo dettaglio visibile distinguibile con un MO è di circa 200 nm.

3.2.2 Microscopia elettronica

La microscopia elettronica permette di ottenere informazioni riguardo la struttura, la morfologia e la composizione dei materiali, sfruttando un fascio di elettroni al posto della luce visibile. Grazie alla lunghezza d'onda degli elettroni, molto minore rispetto a quella dei fotoni, il potere risolutivo dello strumento è elevato e permette l'osservazione di dettagli non osservabili attraverso il MO. Il campione viene posto in una camera in condizione di vuoto dove sono presenti i rivelatori di elettroni e viene collegato ad un supporto (stub).

Il fascio di elettroni è generato da un cannone elettronico e passa successivamente attraverso un sistema di lenti; viene accelerato ad alte energie e fatto incidere sul campione, generando dei segnali differenti. La sorgente del fascio può essere ad emissione termoionica o ad emissione di campo. La prima tipologia di sorgenti sfrutta l'effetto Joule scaldando un filamento di tungsteno o un cristallo di vari materiali (ad esempio esaboruro di lantanio o di cerio) per ottenere una generazione localizzata di elettroni che vengono emessi quando si fornisce una tensione di accelerazione. Le sorgenti ad emissione di campo invece sono costituite da un cristallo di tungsteno ad estremità appuntita nella quale si localizzano gli elettroni per effetto tunneling.

La colonna del SEM è composta da una serie di lenti elettromagnetiche, costituite da avvolgimenti di rame all'interno di un involucro metallico. La corrente nei fili genera un campo magnetico, facendo muovere gli elettroni in traiettorie elicoidali (forza di Lorenz).

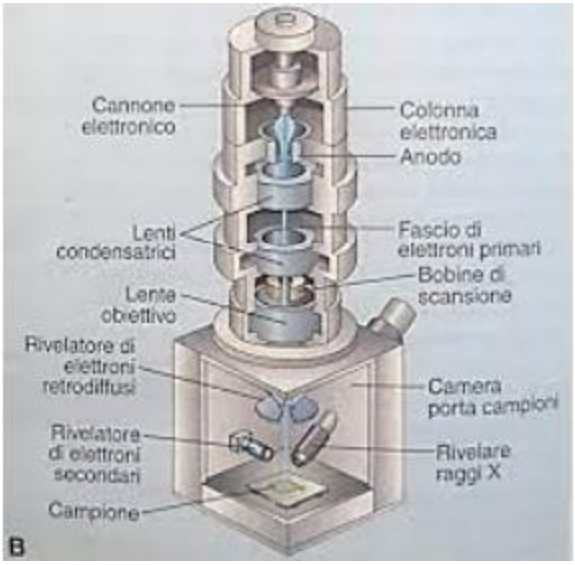


Figura 14: schema del sistema SEM[41]

Come si può osservare dalla figura 14, la lente condensatrice converge il fascio, che entra poi nella lente obiettivo. Quest'ultima lente focalizza il fascio sul campione ed è responsabile della grandezza del fascio nel punto in cui incontra il campione (spot size). Tra le lenti prima descritte vengono poste delle bobine di scansione, ovvero degli avvolgimenti di rame che muovono il fascio in modo da scansionare tutta la superficie.

Durante l'interazione del fascio con il campione, vengono emessi principalmente:

- Elettroni secondari (SE): elettroni del campione emessi dopo essere stati colpiti da quelli del fascio, secondo un'interazione anelastica. Vengono usati per studiare la superfice del campione e la sua morfologia.
- Elettroni retrodiffusi (BSE): elettroni del fascio che entrano nel campione e collidono con gli atomi del campione, vengono deviati dalla direzione di propagazione e subiscono un'interazione elastica.
- Elettroni Auger e raggi x caratteristici: radiazioni emesse quando il fascio di elettroni colpisce il campione. Vengono utilizzati per studiare la composizione chimica del campione.

I segnali vengono analizzati da rilevatori diversi in base al tipo di elettroni emessi. In particolar modo, nello studio effettuato in laboratorio dei campioni 316L+Cu, sono state ricavate le informazioni riguardo la composizione chimica attraverso l'EDS (Energy Dispersive Spectroscopy), rilevatore dei raggi X caratteristici. Questa tipologia di strumentazione sfrutta l'interazione magnetica tra i raggi X e un monocristallo di Si ad alta resistività drogato con Li e raffreddato con celle Peltier. [40]. Grazie all'effetto Peltier, si ottiene una cessione o un assorbimento di calore sulla giunzione di due metalli diversi quando viene fatta passare corrente.

Le radiazioni generate dal fascio possono essere di due tipi:

- Radiazione continue (Bremsstrahlung) : le interazioni casuali tra elettroni del fascio e gli atomi del campione fanno si che gli elettroni perdano energia elettronica decelerando. I valori di energia emessa possono arrivare fino a quella dell'elettrone incidente, portando alla formazione di uno spettro elettromagnetico continuo.
- Radiazione discreta: quando il fascio incide sul campione e gli atomi negli orbitali più interni si ionizzano, dando la possibilità di ottenere informazioni composizionali del materiale in analisi. Ogni elemento del campione analizzato è caratterizzato da una propria energia dovuta alle radiazioni elettromagnetiche emesse.

Viene misurata l'energia e la distribuzione delle intensità dei raggi X generati dal fascio elettronico. L'analisi prodotta può essere sia dell'area ingrandita presa in riferimento durante lo studio oppure in un punto di interesse sulla superficie del campione (microanalisi) [42]. Ogni spot dell'analisi puntuale viene utilizzato come pixel per comporre la mappa composizionale della zona in studio. Il detector dello strumento conteggia il numero di raggi X che arrivano da una finestra energetica relativa al picco dell'elemento di cui si vuole la distribuzione. È possibile acquisire una mappa per ogni elemento e ottenere un'immagine della distribuzione di tale elemento nell'area in studio.

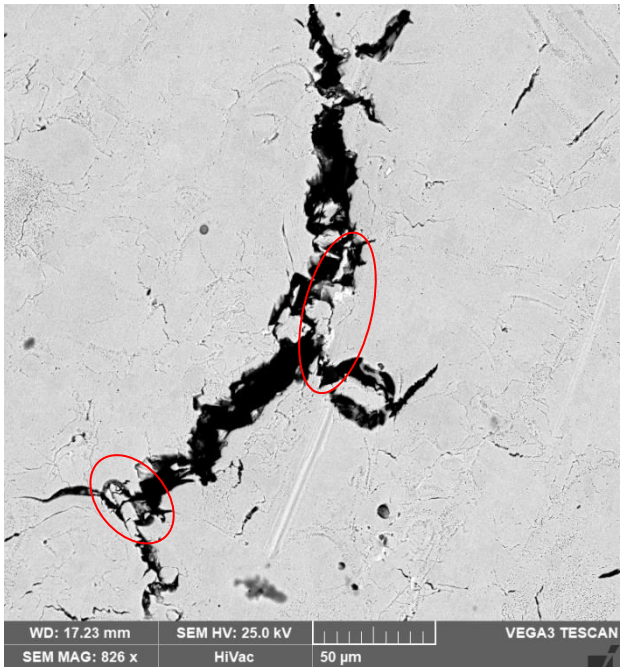


Figura 15: micrografia elettronica campione 4 YZ, con rame evidenziato dal grigio più chiaro (zone cerchiate)

3.3 Prove microdurezza

La durezza metallurgica è definita come la resistenza che la superficie di un materiale oppone alla penetrazione di un corpo duro e viene valutata attraverso le prove meccaniche di durezza. Le prove si dividono in macrodurezza, se l'impronta interessa un volume notevole di materia e microdurezza, se il volume è ridotto. Si tratta di prove semplici e poco costose ma soprattutto non distruttive. Tra le più conosciute troviamo la prova Brinell, la Vickers e la Rockwell. La scelta della tipologia della prova dipende dal tipo di materiale e dalle esigenze specifiche dell'analisi.

Per lo studio dei campioni sono state effettuate misurazioni di microdurezza Vickers sulla faccia del piano YZ.

Un penetratore di diamante a forma di piramide a base quadrata, con angolo al vertice di 136°, è sottoposto ad un carico F che lo fa entrare in contatto e penetrare nel materiale.

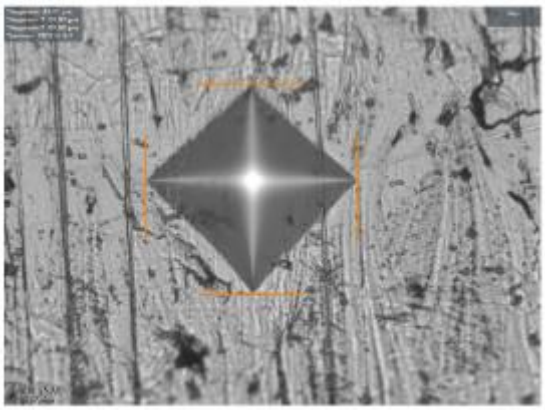


Figura 16: impronta del penetratore a forma di piramide quadrata.

Il valore della durezza è ricavato dalla misurazione della diagonale media dell'impronta. Si definisce la durezza Vickers (HV) come il rapporto tra il carico di prova F e l'area della superficie S dell'impronta:

$$HV = \frac{F}{S} = 1.854 \times \frac{F}{d^2}$$

Dove S è il valore della superficie della piramide in funzione della diagonale d e la diagonale media d si calcola:

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

Il test in laboratorio è stato di microdurezza ed è stato eseguito con un Microdurometro Qness 60 A. I campioni sono stati stretti in una morsa e posizionati nel piano di lavoro dello strumento. La superficie dei provini è stata in un primo momento scansionata e poi sottoposta ad una penetrazione pari a 300 gf.

La durezza è stata valutata in 3 diverse parti della superficie del campione: superiore, centrale e inferiore. Per ogni fascia sono state effettuate 20 impronte distanti 0.05 mm circa l'una dall'altra, posizionate in modo da evitare zone con difetti che avrebbero potuto alterare i risultati.

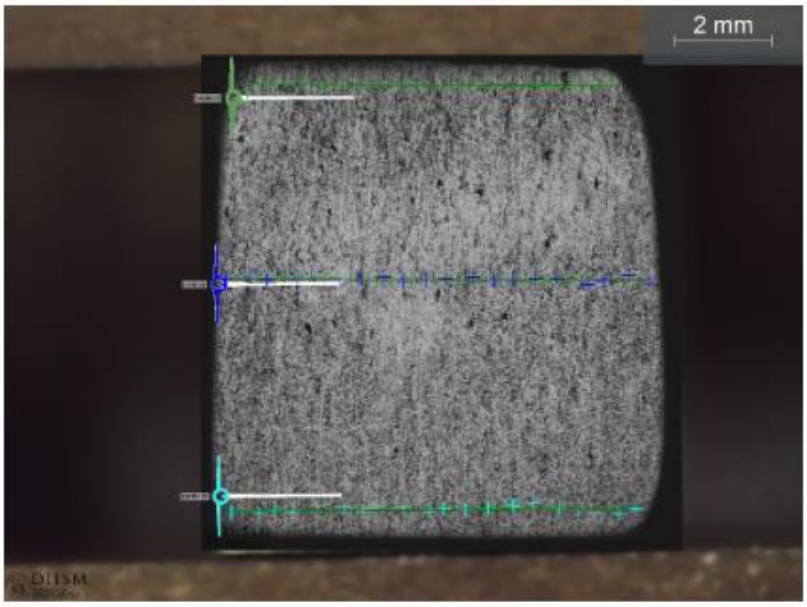


Figura 17: schema delle impronte effettuate durante la prova di microdurezza Vickers

Nel capitolo dei risultati sperimentali vengono riportati i valori ricavati e le analisi effettuate di tale prova.

4. RISULTATI SPERIMENTALI

In questo capitolo verranno elencati i risultati e le conseguenti conclusioni formulate dall'analisi dello studio.

4.1 Risultati analisi microstrutturale

Come spiegato nel capitolo precedente, l'analisi microstrutturale dei campioni 4 e 6 è stata effettuata mediante microscopio ottico invertito e microscopio elettronico a scansione.

Di seguito sono riportate le immagini acquisite con il primo strumento:

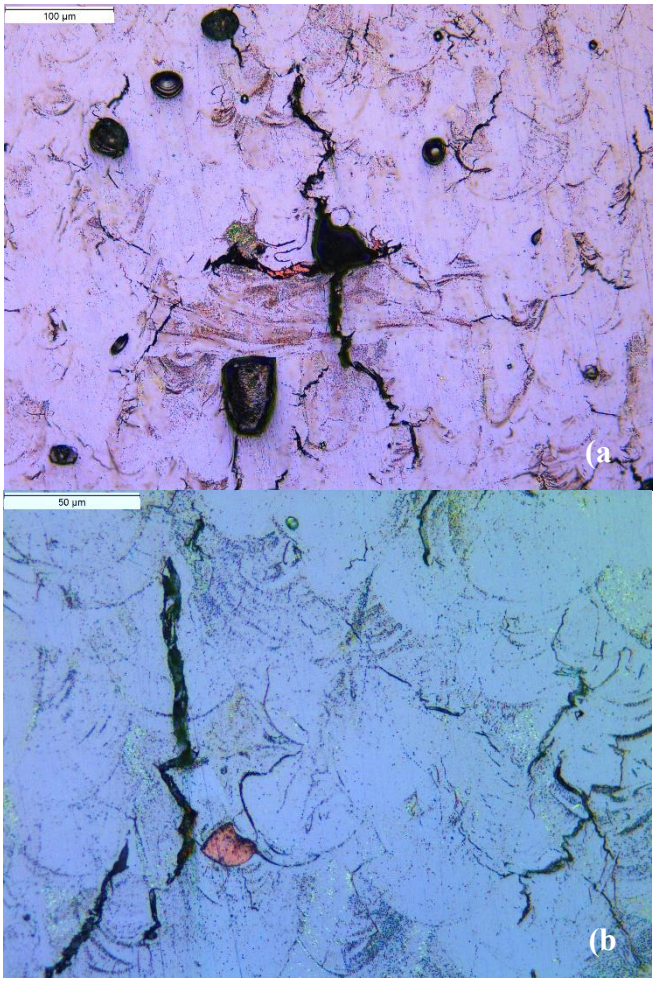


Figura 18: micrografie campione 4 YZ acquisite con MO, a) 20x1, b)50x1

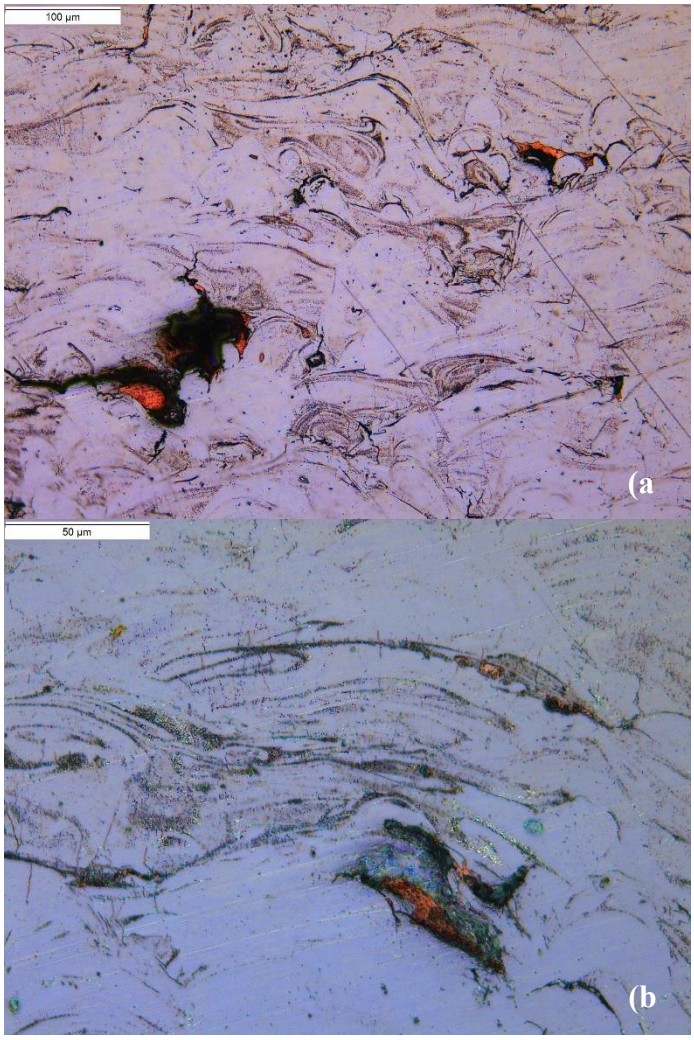


Figura 19: micrografie campione 6 YZ acquisite con MO, a) 20x1.25, b)50x.25

Sia dalla figura 18 che dalla 19, in entrambi i campioni è possibile osservare del rame (zone rossastre) in prossimità di difetti del materiale. In particolar modo nella figura 19 a), il rame è presente in una cricca generata da una porosità.

Dall' analisi della microstruttura è stato notato come il campione 4, prodotto con VED maggiore rispetto al campione 6, presenti più difetti, mentre il rame è quasi impercettibile. Al diminuire della velocità di scansione, la permanenza del fascio in un punto della scansione è maggiore, provocando un incremento della profondità di fusione. Questo comporta una solidificazione più lenta che favorisce la formazione di porosità dovuta ai gas intrappolati e la formazione di cricche a caldo.

Valori troppo elevati della VED inoltre possono innescare il fenomeno del key hole melting, portando alla formazione di vuoti [39]

Con una densità di energia elevata, il rame potrebbe essere evaporato, avendo un punto di evaporazione più basso rispetto a quello del ferro.

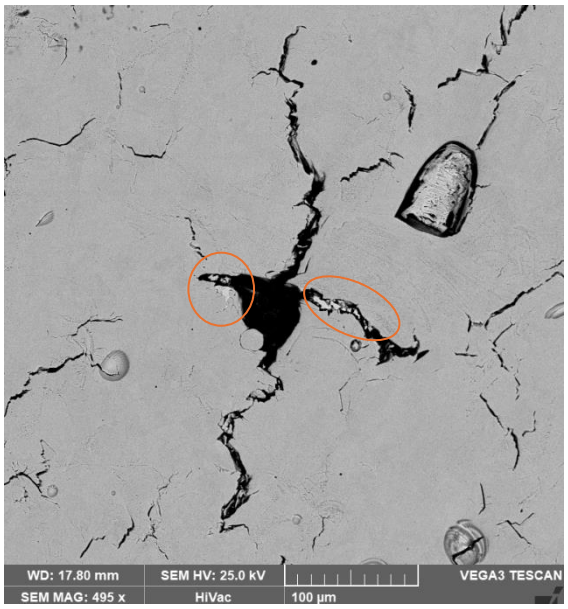


Figura 20: micrografia elettronica campione 4 YZ, rame cerchiato (zone chiare)

La microstruttura del campione 6, invece, risulta più fine, ma sempre con presenza di difetti. Valori troppo bassi della VED, infatti, potrebbero portare ad una fusione incompleta e conseguenti discontinuità. Con VED minore, il rame potrebbe segregare nei difetti senza subire evaporazione.

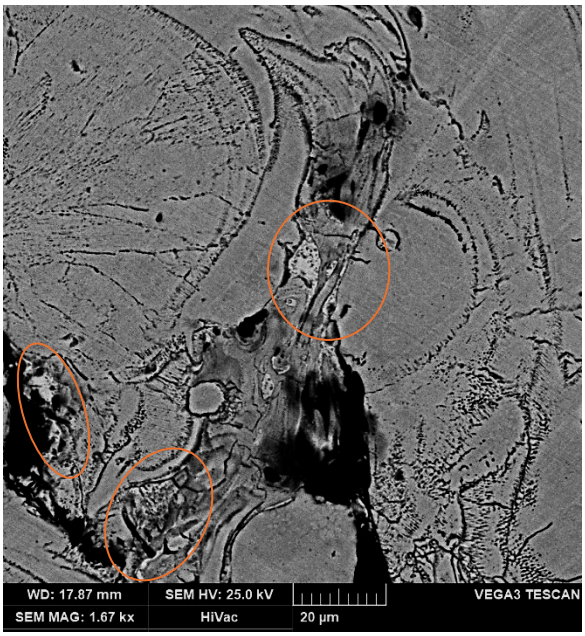


Figura 21: micrografia elettronica campione 6 YZ, rame cerchiato (zone chiare)

Attraverso l'utilizzo del SEM e dei rivelatori EDS, è stato possibile affermare che le zone di colore rossastre nelle immagini acquisite al MO rappresentano il rame. Nella figura 22, il rame è rappresentato dalle zone di colore rosa.

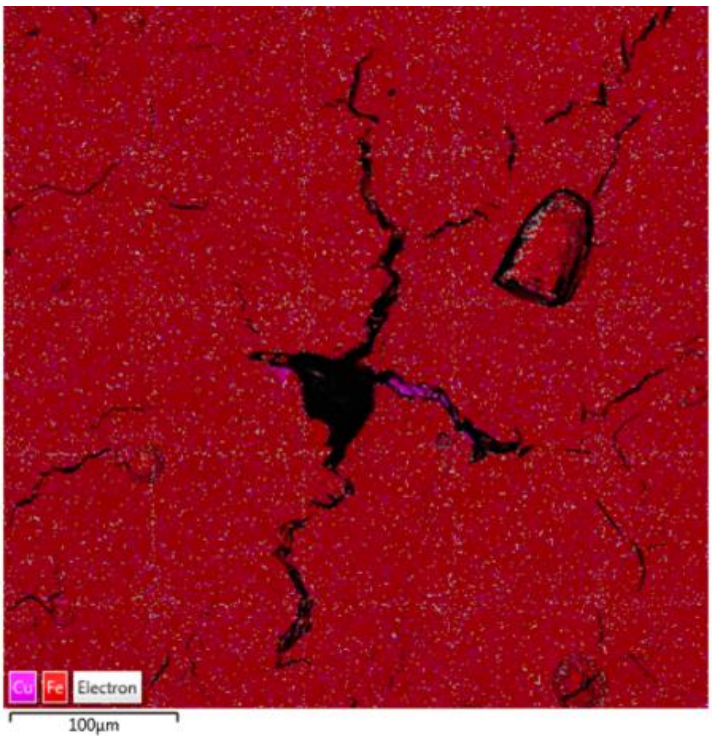


Figura 22: EDS MAP Campione 4 YZ

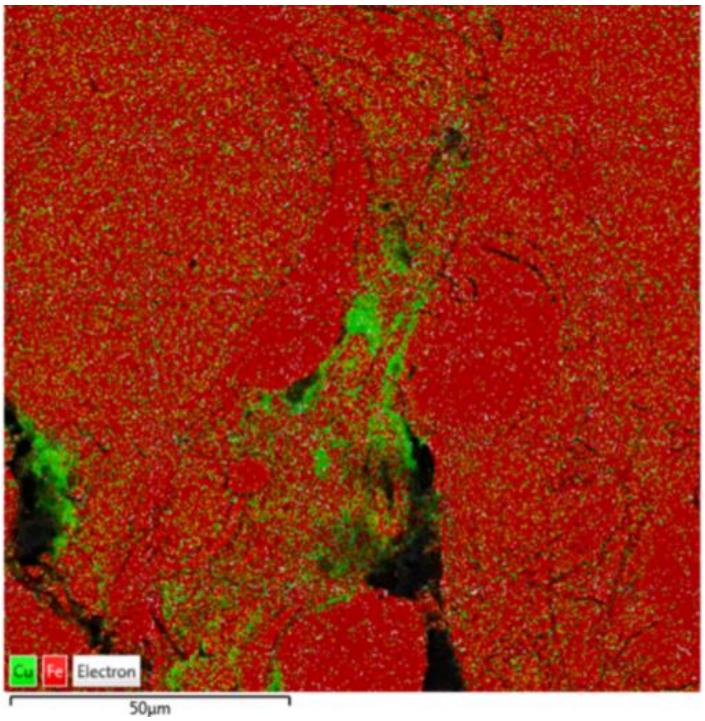


Figura 23: EDS MAP campione 6 YZ

Nella figura 23, che rappresenta il campione 6, il rame è evidenziato dal colore verde. È possibile, quindi, sottolineare e confermare come l'elemento rameico si concentri principalmente in prossimità dei difetti, in questo caso cricche e vuoti. Come si può notare dall'immagine, ci sono zone cosparse di puntini verdi (rame) più o meno dense. Questo sta a significare che il rame si è distribuito in maniera eterogenea nel campione, in quanto sono presenti chiazze rosse in cui i puntini verdi sono quasi inesistenti.

4.2 Risultati prove microdurezza Vickers

Come descritto nel capitolo precedente, sono state eseguite delle prove di microdurezza Vickers sui campioni. Sono state effettuate tre diverse misurazioni, sul bordo superiore, al centro e sul bordo inferiore.

Tramite un file Excel sono stati riportati i valori ricavati da ogni punto del campione, dove è stata effettuata una traccia dal penetratore. Si è calcolata la durezza media totale, la media e la deviazione standard di ogni linea di misure.

CAMPIONE 4:

BORDO SUPERIORE	
N.	HV
1	201
2	194
3	178
4	185
5	173
6	207
7	185
8	195
9	201
10	192
11	197
12	186
13	196
14	172
15	185
16	167
17	170
18	171
19	188
20	189
MEDIA	186,6
DEV. STANDARD	11,6366

LINEA CENTRALE	
N.	HV
1	190
2	173
3	199
4	199
5	163
6	198
7	192
8	192
9	200
10	188
11	197
12	193
13	190
14	196
15	202
16	192
17	185
18	200
19	192
20	196
MEDIA	191,85
DEV.STANDARD	9,443879

BORDO INFERIORE	
N.	HV
1	184
2	181
3	184
4	189
5	188
6	192
7	191
8	189
9	186
10	186
11	185
12	189
13	180
14	187
15	183
16	188
17	171
18	199
19	179
20	201
MEDIA	186,6
DEV. STANDARD	6,636423

MEDIA TOTALE	188,35

CAMPIONE 6:

BORDO SUPERIORE	
N.	HV
1	227
2	179
3	242
4	180
5	200
6	193
7	209
8	189
9	205
10	198
11	196
12	207
13	181
14	206
15	208
16	192
17	205
18	221
19	210
20	208
MEDIA	202,8
DEV. STANDARD	15,68976

LINEA CENTRALE	
N.	HV
1	185
2	180
3	170
4	195
5	204
6	184
7	195
8	192
9	196
10	161
11	171
12	186
13	188
14	186
15	192
16	180
17	200
18	181
19	196
20	177
MEDIA	185,95
DEV.STANDARD	10,87477

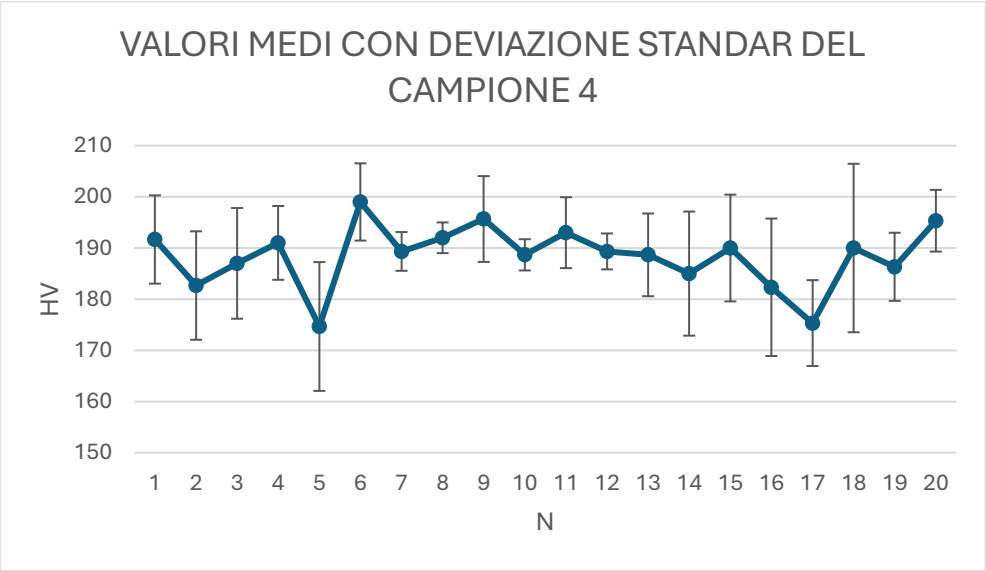
BORDO INFERIORE	
N.	HV
1	172
2	183
3	175
4	180
5	178
6	179
7	183
8	180
9	180
10	159
11	179
12	186
13	180
14	190
15	194
16	183
17	170
18	193
19	163
20	160
MEDIA	178,35
DEV. STANDARD	9,729364

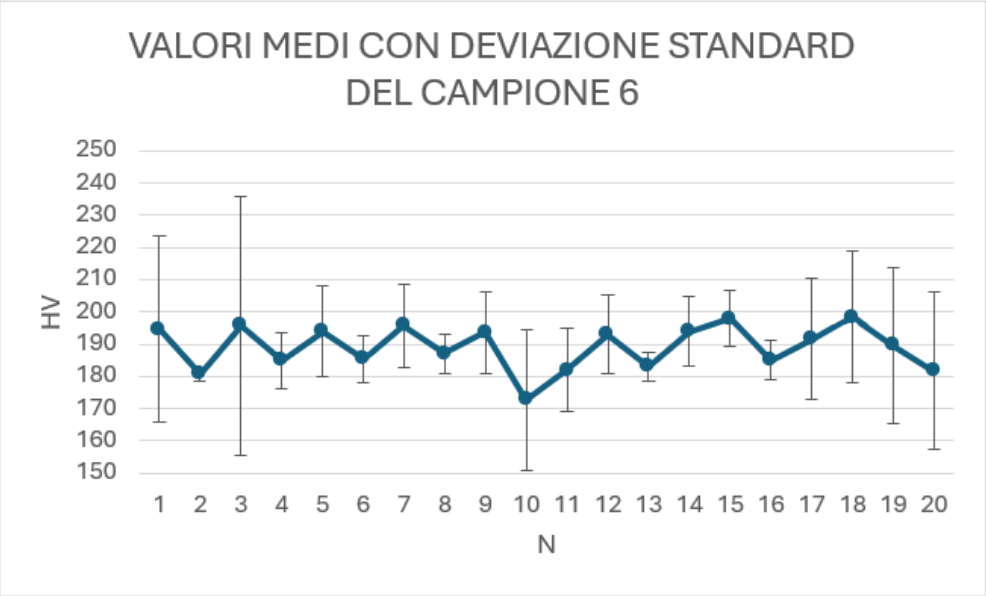
MEDIA TOTALE	189,0333

Dalle tabelle è possibile notare come i valori della durezza media totale di entrambi i campioni siano simili ma variano molto lungo le linee superiori, centrali e inferiori.

Il campione 4 presenta la stessa microdurezza sui bordi, mentre il centro ha un valore leggermente più alto, ma sono tutti e tre valori comparabili tra loro.
Il campione 6 ha valori microdurezza via via decrescenti andando dal bordo superiore al bordo inferiore e la deviazione standard del B.S. è particolarmente alta, 15,7 circa, facendo intendere che qualche valore delle misurazioni (es. traccia 3) sia un errore dovuto alla presenza di impurezze o difetti strutturali.

È possibile riportare in un grafico i valori medi della microdurezza per la stessa posizione nelle tre linee e studiarne la deviazione standard.





Sia dalle tabelle che dai grafici è possibile notare la presenza di valori molto più bassi della media per entrambi i campioni. Ciò può essere dovuto al fatto che il penetratore potrebbe aver centrato difetti microstrutturali della superfice, graffi o impurità. I valori molto più alti della media potrebbero essere causati dalla presenza di particelle di altri materiali rimasti nella macchina di stampa e poi intrappolati nei campioni.

4.3 Confronto con i campioni 5 e 8

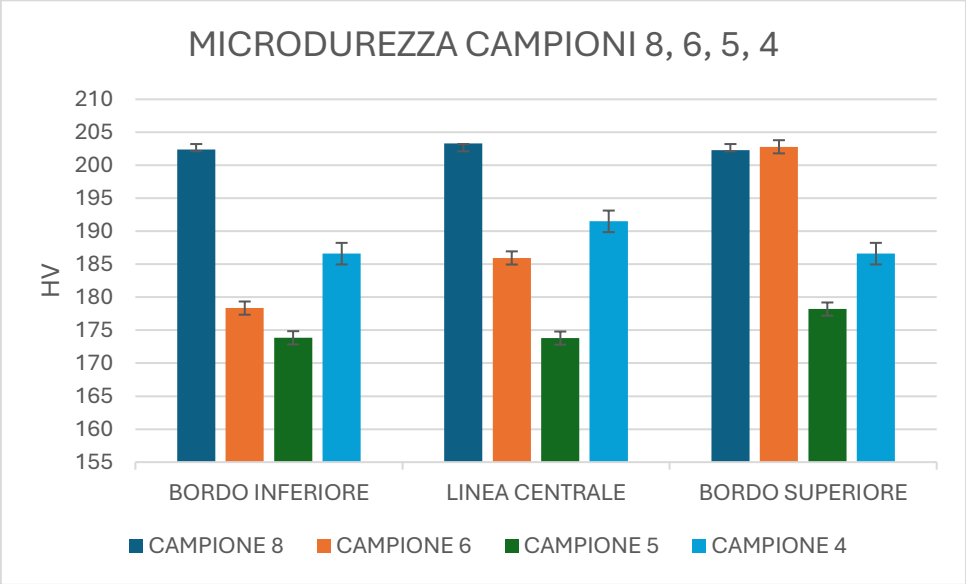
Per ottenere dei risultati migliori, sono stati confrontati i campioni 4 e 6 con i campioni 5 e 8. I risultati di questi ultimi derivano da uno studio svolto precedentemente.

I campioni 5 e 8 dello studio sono stati processati con stessa velocità di scansione pari a 850 $\frac{mm}{s}$ ma differente potenza laser, rispettivamente pari a 95 W e 80 W. Hanno, quindi, velocità diversa sia dal campione 4 che dal campione 6, mentre il 5 è stato stampato con la stessa potenza laser dei campioni qui analizzati.

La VED dei provini 5 e 8 è rispettivamente uguale a 79,8 $\frac{J}{(mm)^3}$ e 67,2 $\frac{J}{(mm)^3}$, quest'ultima molto simile a quella del campione 6.

Il campione 8 presenta molti meno difetti rispetto al 6 e il rame è distribuito in modo più omogeneo, facendo dedurre che sarebbe utile diminuire la potenza laser e aumentare la velocità di scansione durante il processo di stampa.

Sono state confrontate le microdurezze dei vari campioni, riportati in ordine di VED crescente sul grafico sottostante.



Dal grafico, è possibile notare come l'8 è il campione che presenta il valore di durezza maggiore ed è più costante. Il campione 5 invece ha una durezza minore in ogni linea.

5. CONCLUSIONI

In questa tesi sono stati esaminati due campioni di AISI 316L con aggiunta del 10% in peso di rame, fabbricati tramite LPBF. Attraverso l'analisi microstrutturale e le prove di microdurezza Vickers è stato possibile studiare gli effetti dei diversi parametri di processo con cui sono stati fabbricati i campioni, verificando il comportamento e la distribuzione del rame nel materiale e la formazione di difetti. Grazie ai risultati raccolti a seguito delle fasi sperimentali, si evince che:

- Il rame si distribuisce principalmente nei difetti quali cricche, vuoti e porosità e in prossimità di essi.
- Al crescere della VED con cui vengono prodotti i campioni, si evidenzia una microstruttura caratterizzata da difetti di fabbricazione e, contemporaneamente, la presenza di rame nella microstruttura di riduce.
- I campioni con maggiore quantità di rame segregato presentano proprietà meccaniche maggiori, ad esempio il campione 8 e la sua microdurezza elevata e costante su tutta su superficie.

L'analisi suggerisce che è possibile ottimizzare i parametri di processo LPBF per migliorare le proprietà meccaniche e diminuire la formazione di difetti. Inoltre, con parametri ottimizzati si migliora anche la distribuzione del rame nel materiale, garantendo migliori caratteristiche antibatteriche e biocompatibilità.

Ricerche future potrebbero approfondire lo studio dell'aggiunta di percentuali di rame in diversa percentuale all'AISI 316L e studiarne le proprietà, così da ottimizzarne le caratteristiche e sviluppare migliori applicazioni in ambito biomedicale.

BIBLIOGRAFIA

[1] K. V. Wong e A. Hernandez, «A Review of Additive Manufacturing», *International Scholarly Research Notices*, vol. 2012, fasc. 1, p. 208760, 2012, doi: 10.5402/2012/208760.

[2] M. Jiménez, L. Romero, I. A. Domínguez, M. D. M. Espinosa, e M. Domínguez, «Additive Manufacturing Technologies: An Overview about 3D Printing Methods and Future Prospects», *Complexity*, vol. 2019, fasc. 1, p. 9656938, gen. 2019, doi: 10.1155/2019/9656938.

[3] J. Huang, Q. Qin, e J. Wang, «A Review of Stereolithography: Processes and Systems», *Processes*, vol. 8, fasc. 9, Art. fasc. 9, set. 2020, doi: 10.3390/pr8091138.

[4] Y. Du, J. Chen, Q. Meng, Y. Dou, J. Xu, e S. Z. Shen, «Thermoelectric materials and devices fabricated by additive manufacturing», *Vacuum*, vol. 178, p. 109384, ago. 2020, doi: 10.1016/j.vacuum.2020.109384.

[5] Mh. + Pyetro e L. Onniboni, «Storia completa della stampa 3D: dal 1982 a oggi · ObjectsMag», Objects. Consultato: 28 gennaio 2025. [Online]. Disponibile su: https://www.objectsmag.it/storia-completa-della-stampa-3d/

[6] A. Pilo, «Come è nata la Metal Additive Manufacturing?», #invisibilemavero. Consultato: 28 gennaio 2025. [Online]. Disponibile su: https://www.invisibilemavero.it/additive-manufacturing/come-nata-metal-additive-manufacturing/

[7] M. Armstrong, H. Mehrabi, e N. Naveed, «An overview of modern metal additive manufacturing technology», *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 84, pp. 1001–1029, dic. 2022, doi: 10.1016/j.jmapro.2022.10.060.

[8] S. D. Nath e S. Nilufar, «An Overview of Additive Manufacturing of Polymers and Associated Composites», *Polymers (Basel)*, vol. 12, fasc. 11, p. 2719, nov. 2020, doi: 10.3390/polym12112719.

[9] J. Liu *et al.*, «Current and future trends in topology optimization for additive manufacturing», *Struct Multidisc Optim*, vol. 57, fasc. 6, pp. 2457–2483, giu. 2018, doi: 10.1007/s00158-018-1994-3.

[10] J. Zhu, H. Zhou, C. Wang, L. Zhou, S. Yuan, e W. Zhang, «A review of topology optimization for additive manufacturing: Status and challenges», *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 34, fasc. 1, pp. 91–110, gen. 2021, doi: 10.1016/j.cja.2020.09.020.

[11] M. Attaran, «The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing», *Business Horizons*, vol. 60, fasc. 5, pp. 677–688, set. 2017, doi: 10.1016/j.bushor.2017.05.011.

[12] S. Ford e M. Despeisse, «Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges», *Journal of Cleaner Production*, vol. 137, pp. 1573–1587, nov. 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.04.150.

[13] I. Bahnini, M. Rivette, A. Rechia, A. Siadat, e A. Elmesbahi, «Additive manufacturing technology: the status, applications, and prospects», *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 97, fasc. 1, pp. 147–161, lug. 2018, doi: 10.1007/s00170-018-1932-y.

[14] S. Rouf *et al.*, «Additive manufacturing technologies: Industrial and medical applications», *Sustainable Operations and Computers*, vol. 3, pp. 258–274, gen. 2022, doi: 10.1016/j.susoc.2022.05.001.

[15] «(PDF) In-process sensing in selective laser melting (SLM) additive manufacturing», *ResearchGate*, ott. 2024, doi: 10.1186/s40192-016-0045-4.

[16] N. A, «Laser Powder Bed Fusion (LPBF): tutto quello che c'è da sapere», 3Dnatives. Consultato: 29 gennaio 2025. [Online]. Disponibile su: https://www.3dnatives.com/it/laser-powder-bed-fusion-lpbf-050920219/

[17] S. Chowdhury *et al.*, «Laser powder bed fusion: a state-of-the-art review of the technology, materials, properties & defects, and numerical modelling», *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 20, pp. 2109–2172, set. 2022, doi: 10.1016/j.jmrt.2022.07.121.

[18] T. G. Spears e S. A. Gold, «In-process sensing in selective laser melting (SLM) additive manufacturing», *Integr Mater Manuf Innov*, vol. 5, fasc. 1, pp. 16–40, dic. 2016, doi: 10.1186/s40192-016-0045-4.

[19] MakerVerse, «I 10 principali vantaggi della fusione laser a letto di polvere (LPBF)», MakerVerse. Consultato: 29 gennaio 2025. [Online]. Disponibile su: https://www.makerverse.com/it/risorse/stampa-3d/i-10-principali-vantaggi-della-fusione-laser-a-letto-di-polvere-lpbf/

[20] T. G. Spears e S. A. Gold, «In-process sensing in selective laser melting (SLM) additive manufacturing», *Integr Mater Manuf Innov*, vol. 5, fasc. 1, pp. 16–40, dic. 2016, doi: 10.1186/s40192-016-0045-4.

[21] T. Kurzynowski, W. Stopyra, K. Gruber, G. Ziółkowski, B. Kuźnicka, e E. Chlebus, «Effect of Scanning and Support Strategies on Relative Density of SLM-ed H13 Steel in Relation to Specimen Size», *Materials (Basel)*, vol. 12, fasc. 2, p. 239, gen. 2019, doi: 10.3390/ma12020239.

[22] B. AlMangour, D. Grzesiak, e J.-M. Yang, «Scanning strategies for texture and anisotropy tailoring during selective laser melting of TiC/316L stainless steel nanocomposites», *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 728, pp. 424–435, dic. 2017, doi: 10.1016/j.jallcom.2017.08.022.

[23] «Investigation on the effect of laser parameters and hatch patterns on the dimensional accuracy of micro-dimple and micro-channel texture geometries | Request PDF», *ResearchGate*, dic. 2024, doi: 10.1007/s12008-023-01258-z.

[24] F. Trevisan *et al.*, «On the Selective Laser Melting (SLM) of the AlSi10Mg Alloy: Process, Microstructure, and Mechanical Properties», *Materials*, vol. 10, fasc. 1, Art. fasc. 1, gen. 2017, doi: 10.3390/ma10010076.

[25] «Evaluation of corrosion resistance of Al–10Si–Mg alloy obtained by means of Direct Metal Laser Sintering - ScienceDirect». Consultato: 4 febbraio 2025. [Online]. Disponibile su: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013615302491

[26] B. Zhang, Y. Li, e Q. Bai, «Defect Formation Mechanismsin Selective Laser Melting: A Review», *Chin. J. Mech. Eng.*, vol. 30, fasc. 3, pp. 515–527, mag. 2017, doi: 10.1007/s10033-017-0121-5.

[27] H. Gong, K. Rafi, H. Gu, T. Starr, e B. Stucker, «Analysis of defect generation in Ti–6Al–4V parts made using powder bed fusion additive manufacturing processes», *Additive Manufacturing*, vol. 1–4, pp. 87–98, ott. 2014, doi: 10.1016/j.addma.2014.08.002.

[28] «Cracking Behavior and Formation Mechanism of TC4 Alloy Formed by Selective Laser Melting», *ResearchGate*, ott. 2024, doi: 10.3901/JME.2013.23.021.

[29] S. Mirzababaei e S. Pasebani, «A Review on Binder Jet Additive Manufacturing of 316L Stainless Steel», *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, vol. 3, fasc. 3, Art. fasc. 3, set. 2019, doi: 10.3390/jmmp3030082.

[30] V. B. Vukkum e R. K. Gupta, «Review on corrosion performance of laser powder-bed fusion printed 316L stainless steel: Effect of processing parameters, manufacturing defects, post-processing, feedstock, and microstructure», *Materials & Design*, vol. 221, p. 110874, set. 2022, doi: 10.1016/j.matdes.2022.110874.

[31] L. Lemarquis, P. F. Giroux, H. Maskrot, B. Barkia, O. Hercher, e P. Castany, «Cold-rolling effects on the microstructure properties of 316L stainless steel parts produced by Laser Powder Bed Fusion (LPBF)», *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 15, pp. 4725–4736, nov. 2021, doi: 10.1016/j.jmrt.2021.10.077.

[32] S. Dryepondt, P. Nandwana, P. Fernandez-Zelaia, e F. List, «Microstructure and high temperature tensile properties of 316L fabricated by laser powder-bed fusion», *Additive Manufacturing*, vol. 37, p. 101723, gen. 2021, doi: 10.1016/j.addma.2020.101723.

[33] Y. Zhuang, S. Zhang, K. Yang, L. Ren, e K. Dai, «Antibacterial activity of copper-bearing 316L stainless steel for the prevention of implant-related infection», *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, vol. 108, fasc. 2, pp. 484–495, 2020, doi: 10.1002/jbm.b.34405.

[34] «Antimicrobial Cu-bearing stainless steel scaffolds - PubMed». Consultato: 30 gennaio 2025. [Online]. Disponibile su: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27524049/

[35] T. Xi *et al.*, «Effect of copper addition on mechanical properties, corrosion resistance and antibacterial property of 316L stainless steel», *Materials Science and Engineering: C*, vol. 71, pp. 1079–1085, feb. 2017, doi: 10.1016/j.msec.2016.11.022.

[36] S. Ogura, K. Sugimoto, e Y. Sawada, «Effetti di Cu, Mo e C sulla corrosione degli acciai inossidabili 18Cr□8Ni deformati in soluzioni di H 2 SO 4 /NaCl», *Corrosion Science*, vol. 16, fasc. 5, pp. 323–337, gen. 1976, doi: 10.1016/0010-938X(76)90118-9.

[37] A. Behjat, M. Shamanian, L. Iuliano, e A. Saboori, «Laser powder bed fusion in situ alloying of AISI 316L-2.5%Cu alloy: microstructure and mechanical properties evolution», *Prog Addit Manuf*, vol. 9, fasc. 6, pp. 2031–2039, dic. 2024, doi: 10.1007/s40964-023-00557-x.

[38] A. Behjat, M. Shamanian, L. Iuliano, e A. Saboori, «Laser powder bed fusion in situ alloying of AISI 316L-2.5%Cu alloy: microstructure and mechanical properties evolution», *Prog Addit Manuf*, vol. 9, fasc. 6, pp. 2031–2039, dic. 2024, doi: 10.1007/s40964-023-00557-x.

[39] B. Rankouhi, S. Jahani, F. E. Pfefferkorn, e D. J. Thoma, «Compositional grading of a 316L-Cu multi-material part using machine learning for the determination of selective laser melting process parameters», *Additive Manufacturing*, vol. 38, p. 101836, feb. 2021, doi: 10.1016/j.addma.2021.101836.

[40] «Slide corso Metodologie Metallografiche, Eleonora Santecchia»,

[41] A. Postiglione, «Microscopia Elettronica ed Ibridazione in Situ».

[42] «MICROANALISI EDS», Tec Eurolab. Consultato: 5 febbraio 2025. [Online]. Disponibile su: https://www.tec-eurolab.com/glossario/microanalisi-eds/