



DAMIANO ZITO
Progold S.p.a.
Trissino (VI)

Damiano Zito è il CEO di Progold S.p.A. a Trissino, Italia ed è un membro del consiglio dell' Associazione Orafa Italiana come delegato per le Norme ed Innovazione. Grazie alla sua esperienza di 25 anni nel settore e alla prolifera attività di ricerca è stato fregiato con il titolo di ambasciatore del Santa Fé Symposium e il Dipartimento di Ricerca e Sviluppo della sua azienda è stato due volte vincitore del premio per la ricerca.

Questo lavoro è lo sviluppo dei risultati presentati al Santa Fe Symposium 2012. L'effetto delle variabili più rappresentative della tecnologia Selective Laser Melting (SLM) sulla qualità dei prodotti finali viene valutata mediante un approccio DOE (Design Of Experiments). Le variabili di processo prese in considerazione sono potenza del laser, velocità di scansione e spessore dello strato di polvere. Lo scopo di questo lavoro è anche quello di individuare le caratteristiche chimico-fisiche della polvere che garantiscono i migliori risultati della tecnica SLM. Inoltre l'influenza della composizione chimica e la distribuzione granulometrica della polvere sulla porosità e sulla rugosità superficiale è stata specificatamente studiata. Questo lavoro descrive i progressi ottenuti con la tecnologia SLM nell'ultimo anno, mettendo in evidenza l'importanza di ottimizzare i parametri di processo. Tutti i risultati presentati sono stati ottenuti utilizzando leghe preziose.

Ottimizzazione dei principali parametri della tecnologia SLM nella produzione di gioielli d'oro

Damiano Zito(a), Alessio Carlotto(a), Alessandro Loggi(a), Dr. Patrizio Sbornicchia(a), Daniele Maggian(a), Dr. Matthias Fockele(b), Peter Unterberg(b), Prof. Alberto Molinari(c), Prof. Ilaria Cristofolini(c)

(a) Progold S.p.A, Trissino (VI), Italia

(b) Realizer GMBH, Borchten, Germania

(c) Università degli Studi di Trento, Trento (TN), Italia

Abstract

Questo lavoro è lo sviluppo dei risultati presentati al Santa Fe Symposium 2012. L'effetto delle variabili più rappresentative della tecnologia Selective Laser Melting (SLM) sulla qualità dei prodotti finali viene valutata mediante un approccio DOE (Design Of Experiments). Le variabili di processo prese in considerazione sono potenza del laser, velocità di scansione e spessore dello strato di polvere.

Lo scopo di questo lavoro è anche quello di individuare le caratteristiche chimico-fisiche della polvere che garantiscono i migliori risultati della tecnica SLM. Inoltre l'influenza della composizione chimica e la distribuzione granulometrica della polvere sulla porosità e sulla rugosità superficiale è stata specificatamente studiata.

Questo lavoro descrive i progressi ottenuti con la tecnologia SLM nell'ultimo anno, mettendo in evidenza l'importanza di ottimizzare i parametri di processo.

Tutti i risultati presentati sono stati ottenuti utilizzando leghe preziose.

Introduzione

Il primo lavoro sulla fusione laser selettiva (SLM) ha evidenziato l'influenza della distribuzione granulometrica delle particelle metalliche e dei parametri laser sulla densità, la qualità superficiale e le proprietà meccaniche degli articoli prodotti [1, 2]. L'andamento generale ha mostrato che una maggiore energia specifica del laser comporta una densificazione più alta dei pezzi, unitamente ad una maggiore resistenza meccanica ed una migliore rugosità superficiale, mentre la velocità di scansione e la distribuzione di particelle hanno un'influenza minore sulla densità della lega. Inoltre, la rugosità delle superfici ha evidenziato una diminuzione all'aumentare della loro inclinazione, quindi le pareti più verticali rispetto al piano di costruzione hanno una minore rugosità e lucentezza. D'altra parte, la dimensione del grano è sostanzialmente costante al variare dei parametri di costruzione e fine. Questo permette di avere sempre una resistenza meccanica più alta rispetto agli oggetti ottenuti per microfusione classica oppure diretta.

In questo nuovo articolo introduciamo lo studio dell'effetto della composizione chimica della lega costituente le polveri metalliche e l'azione dei tipici parametri laser sulle caratteristiche ottiche e meccaniche del prodotto finale. In particolare, una lega classica costituita da oro, argento e rame è stata confrontata con una lega dotata di un elemento capace di modificare marcatamente la tensione superficiale del metallo fuso, quale il gallio. Un ulteriore studio è stato effettuato con la medesima lega d'oro costituita da oro, argento e rame ma con intervallo granulometrico differente, questo al fine di valutare la qualità del processo di fusione selettiva anche in funzione dell'intervallo granulometrico delle polveri che impartisce una diversa densità apparente e scorrevolezza.

Procedura sperimentale.

Gli articoli in lega sono stati costruiti con una macchina SLM 50 (Realizer) equipaggiata con un laser a fibra (100 W) avente uno spot da 10 μm e dotata di una tavola di lavoro circolare (70 mm) inserita in una camera ad atmosfera protetta con argon. Le polveri sono state prodotte nel nostro laboratorio impiegando un atomizzatore a gas, che opera in ambiente completamente protetto con gas inerte e pressione atmosferica.

Il controllo della morfologia delle polveri prodotte è svolto internamente per mezzo della microscopia elettronica e della distribuzione granulometrica adoperando un granulometro laser Malvern (Hydro 2000S). Il processo di atomizzazione permette di ottenere polveri prive di umidità costituite da particelle sferiche non agglomerate con una ristretta distribuzione dimensionale, perciò particolarmente adatte all'impiego nella fusione laser selettiva (figg. 1, 2). La forma delle particelle e l'umidità assorbita sono di fatto aspetti molto importanti ai fini della scorrevolezza della polvere (flowability) sotto l'azione della spazzola di distribuzione sulla tavola di lavoro. Il controllo della scorrevolezza della polvere è stato eseguito attraverso un Hall Flowmeter Funnel (ASTM B213-03) e un Carney Flowmeter Funnel (ASTM B417-89), la densità apparente è stata rilevata utilizzando una tazza a volume normato (ASTM B212, B329 e B417).

La composizione delle polveri metalliche è stata scelta in modo da realizzare una distinta variazione della tensione superficiale allo stato fuso, della conducibilità termica e riflettività del materiale rispetto ad una semplice lega ternaria (tab. 1). Nelle leghe per la fusione selettiva laser non è necessario aggiungere affinatori di grano poiché il grano è intrinsecamente piccolo ed inoltre, elementi a basso punto di ebollizione, quali lo zinco, sono stati evitati per ridurre la porosità da gas.

LEGA	Au (‰)	Ag (‰)	Cu (‰)	Ga (‰)	Intervallo granulometrico della polvere (μm)
1	752	40	208	0	0-53
2					5-53
3	752	40	188	20	0-53

Tab. 1. Composizione chimica (‰) delle leghe utilizzate per la fusione selettiva laser (SLM).

La polvere di intervallo granulometrico 5-53 μm è stata ottenuta partendo da polvere di intervallo granulometrico 0-53 μm e rimuovendo le particelle 0-5 μm utilizzando un classificatore Hosokawa Alpine (100MZR). Questo apparato permette di eliminare in modo selettivo particelle di un determinato intervallo dimensionale in funzione della portata d'aria e della velocità di rotazione della turbina.

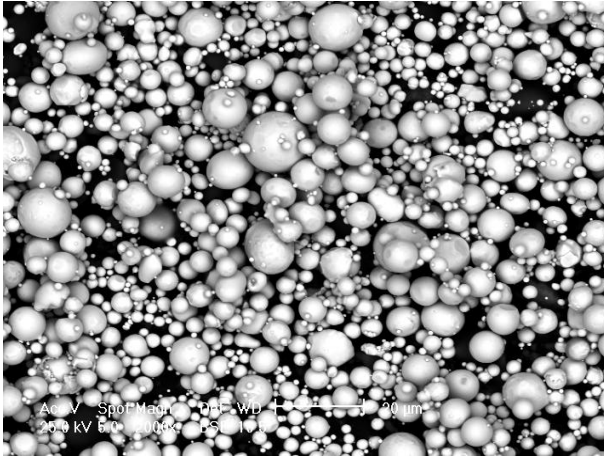


Fig. 1. Lega in polvere (1).

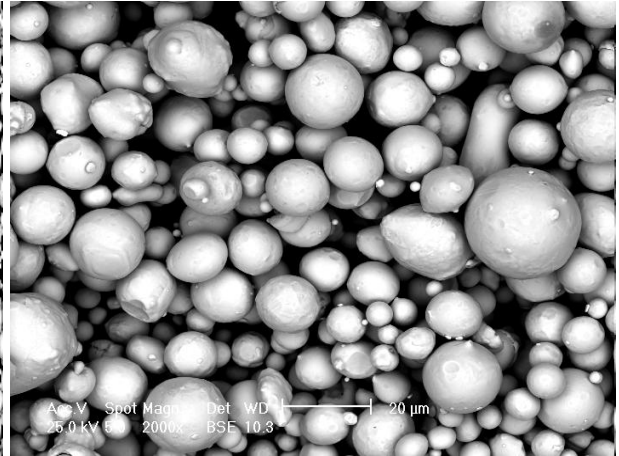


Fig. 2. Lega in polvere (2).

L'analisi superficiale degli oggetti grezzi è stata effettuata a livello stereoscopico, metallografico ed elettronico, nonché per mezzo di un rugosimetro Taylor Hobson (Form Talysurf Intra2), dotato di tastatore stilo in fibra di carbonio e punta in diamante con raggio 2.0 μm. L'analisi della porosità è stata effettuata con il software Leica Qwin (Leica Microsystems). La progettazione degli articoli sperimentali è stata effettuata mediante software McNeel (Rhinoceros 4.0), mentre l'applicazione dei supporti è stata effettuata con il software Materialise (Magics 16.02).

Gli articoli sperimentali hanno la forma di un parallelepipedo rettangolo ($l = 10.00$ mm, $h = 5.00$ mm) ed una struttura lamellare interna, con una interdistanza nominale uniforme di 500 μm, tuttavia, sia la distanza reale tra le lamelle, sia il loro spessore dipende dalla potenza e dalla velocità di scansione del laser (figg. 3, 4). Le lamelle sono denominate *vettori* e ciascuna è prodotta con una singola passata del fascio laser per ogni strato di prototipazione. Le analisi microstrutturali sono state condotte per valutare l'effetto dei parametri laser sulla qualità della fusione delle polveri ed individuare le condizioni che rendono massima la densificazione e riducono al minimo la porosità. La qualità della fusione è stata analizzata variando la potenza del laser, la distanza delle esposizioni (point distance of outer and hatches) e la loro durata sul letto di polvere metallica (tab. 2).

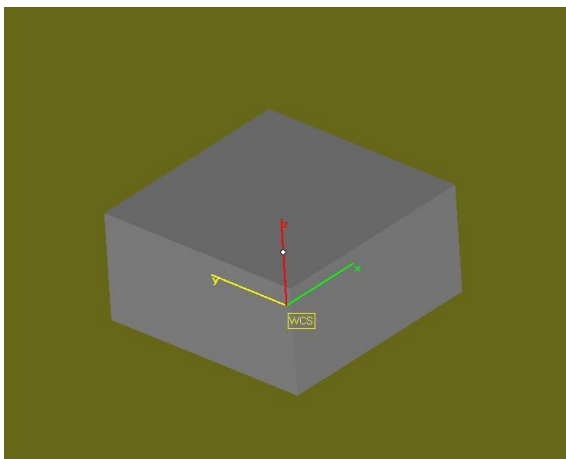


Fig. 3. Modello del parallelepipedo rettangolo realizzato

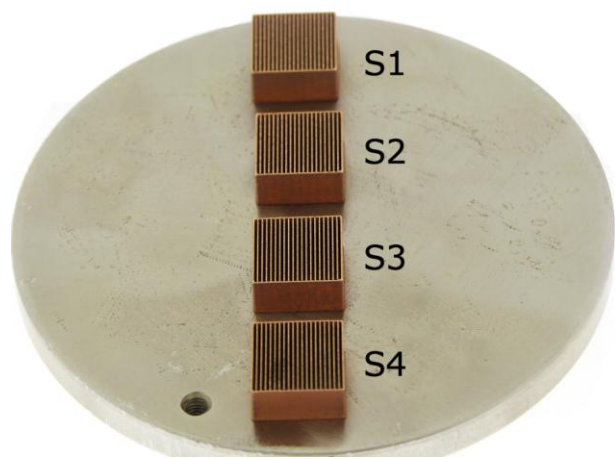


Fig. 4. Gruppo di parallelepipedi rettangoli prodotti con Magics. (Materialise).

Il primo gruppo di esperimenti (S1-S4) è stato condotto fissando la velocità di scansione e variando la potenza da 92.5 W fino a 62.5 W, con un intervallo di 10 W (tab. 2). La distanza dei laser spot sul profilo esterno (30 μm) è stata impostata ad un valore sensibilmente più basso rispetto alla distanza dei laser spot dei vettori interni (40 μm), al fine di produrre un guscio esterno più spesso per dare maggiore robustezza durante la caratterizzazione dei pezzi, che nel caso specifico sono di natura lamellare. Il secondo (S5-S8) e terzo (S9-S12) gruppo di esperimenti sono stati condotti con potenza del laser uguale al primo gruppo, variando la velocità di scansione.

Al fine di confrontare la tecnologia SLM con le odierne tecnologie di produzione di gioielli sono stati realizzati gli stessi campioni utilizzando la tecnica della colata a cera persa, partendo sia da modelli in cera iniettata che modelli prototipati con resina (3D System). La procedura seguita è stata la seguente:

1. Prefusione con una macchina fonditrice ad induzione. Il metallo è stato colato in staffa ad una temperatura di 150°C superiore alla temperatura di liquidus. Successivamente, il lingotto è stato laminato e tagliato per facilitare la fase successiva di lavorazione.
2. La fusione è stata eseguita in una macchina fonditrice ad induzione sottovuoto. La temperatura di colata è stata di 150°C superiore alla temperatura di liquidus. La temperatura dei cilindri è stata di 550°C ed il loro tempo di permanenza in macchina dopo colata è stato di cinque minuti, dopodiché sono stati rapidamente in acqua dopo cinque minuti di permanenza in macchina.

Risultati e discussione

La riduzione della potenza laser nel primo gruppo di esperimenti (S1-S4) provoca un assottigliamento dei vettori (figg. 5, 6, 7, 8), poiché diminuisce sia il volume di materiale fuso, sia il tempo di solidificazione a partire dallo stato fuso. Tuttavia, la velocità di scansione è sufficientemente bassa da creare una buona continuità del cordone di metallo fuso, perciò le lamelle mostrano un profilo piuttosto lineare costante. Questo vantaggio è perso non appena la velocità di scansione del laser è aumentata da 0.33 m/s a 0.50 m/s, a parità delle altre condizioni (figg. 9, 10, 11, 12), nel caso del secondo gruppo di esperimenti (S5-S8). L'aumento della velocità di scansione, unitamente alla riduzione della potenza del laser, impedisce di fondere in modo continuo e lineare l'adeguato volume di polvere e aumenta la lunghezza dello spot liquido introducendo fenomeni di instabilità [3]. Questo provoca la crescita di vettori dal profilo più ondulato, irregolare.

La velocità di scansione v è data per definizione (eqn. 1) dal rapporto tra la distanza degli spot d_{spot} ed il tempo di esposizione t_e , ma a parità di velocità di scansione è possibile avere dei risultati diversi in termini di qualità dei vettori, secondo che sia modificata la distanza degli spot oppure il tempo di esposizione. L'effetto della distanza degli spot è risultato più importante del tempo di esposizione, infatti, a parità di velocità di scansione, una riduzione della distanza tra gli spot laser aumenta sensibilmente la linearità dei vettori, anche se il tempo di esposizione del laser è stato ridotto di conseguenza (figg. 13, 14, 15, 16). Questo fenomeno accade poiché una distanza degli spot più corta implica una migliore continuità del fronte di lega fusa, invece una distanza più lunga può provocare una interruzione parziale del vettore ed il profilo delle lamelle appare più frastagliato.

Numero test	Potenza (W)	Esposizione (μ s)	Distanza Spot del Contorno (μ m)	Distanza Spot dei Vettori (μ m)	Velocità Scansione Contorno (m/s)	Velocità Scansione Vettori (m/s)
S1	92,5	120	30	40	0,25	0,33
S2	82,5	120	30	40	0,25	0,33
S3	72,5	120	30	40	0,25	0,33
S4	62,5	120	30	40	0,25	0,33
S5	92,5	120	50	60	0,42	0,50
S6	82,5	120	50	60	0,42	0,50
S7	72,5	120	50	60	0,42	0,50
S8	62,5	120	50	60	0,42	0,50
S9	92,5	80	30	40	0,38	0,50
S10	82,5	80	30	40	0,38	0,50
S11	72,5	80	30	40	0,38	0,50
S12	62,5	80	30	40	0,38	0,50

Tab. 2. Elenco dei parametri laser adottati nella prima serie di prototipazioni pilota.

$$v = \frac{d_{spot}}{t_e} \quad (\text{Eqn. 1}).$$



Fig. 5. Vettori con una potenza di 92.5 Watt.

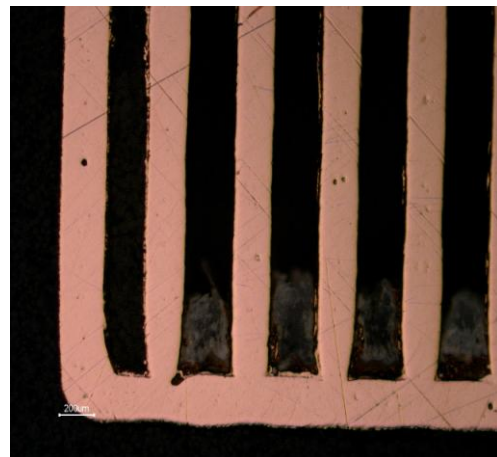


Fig. 6. Vettori con una potenza di 82.5 Watt.



Fig. 7. Vettori con una potenza di 72.5 Watt.



Fig. 8. Vettori con una potenza di 62.5 Watt.



Fig. 9. Vettori con potenza di 92.5 Watt e velocità di scansione di 0.5 m/s.



Fig. 10. Vettori con potenza di 82.5 Watt e velocità di scansione di 0.5 m/s.



Fig. 11. Vettori con potenza di 72.5 Watt e velocità di scansione di 0.5 m/s.

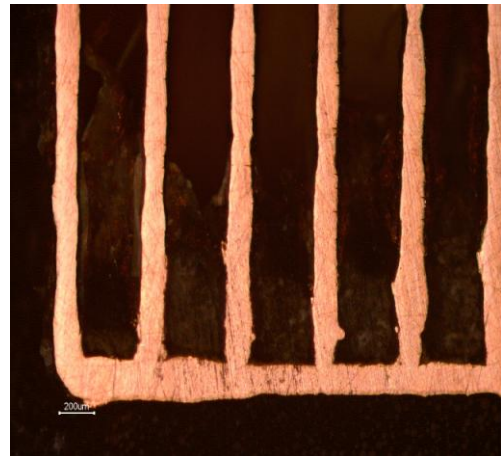


Fig. 12. Vettori con potenza di 62.5 Watt e velocità di scansione di 0.5 m/s.



Fig. 13. Vettori con potenza di 92.5 Watt ed tempo di esposizione di 80 μ s.



Fig. 14. Vettori con potenza di 82.5 Watt ed tempo di esposizione di 80 μ s.



Fig. 15. Vettori con potenza di 72.5 Watt e tempo di esposizione di 80 μ s.



Fig. 16. Vettori con potenza di 62.5 Watt e tempo di esposizione di 80 μ s.

L'insieme di queste prove [4] ha permesso di selezionare la combinazione migliore di parametri laser al fine di realizzare una costruzione lineare e stabile dei vettori, per poi impiegarli nella produzione di un articolo solido ad elevata qualità microstrutturale, cioè con bassa concentrazione di pori da gas, inclusioni di ossido e pori da incompleta fusione della polvere. La combinazione migliore dei parametri laser implica una potenza di 72.5 W, un tempo di esposizione di 120 μ s ed una distanza degli spot di 40 μ m (S3).

Questi parametri sono stati adoperati per ottenere un solido di forma analoga al provino pilota, ma con una base piramidale piena per favorire il distacco dalla piattaforma di costruzione e limitare la presenza di pori nei primi strati del pezzo (fig. 17). Nella fusione selettiva laser, infatti, uno degli ostacoli principali per il raggiungimento di un pezzo completamente esente da pori consiste nella difficoltà di eliminare le porosità nella zona di attacco dei supporti di costruzione.

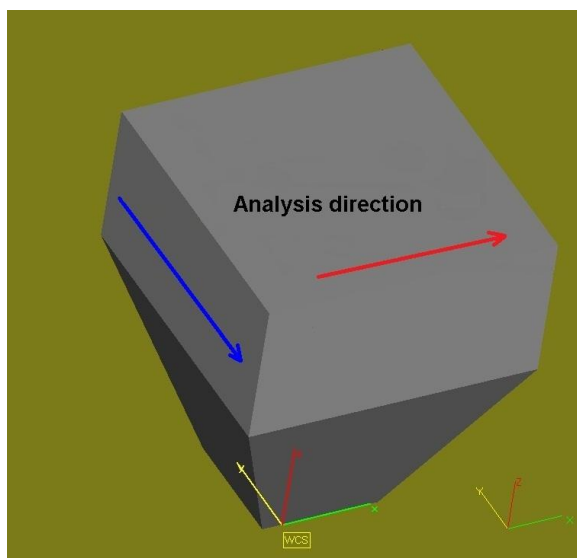


Fig. 17. Modello del solido con le direzioni di analisi rugosimetrica.

La distanza dei vettori (hatches) in questo caso è ovviamente ridotta rispetto al pezzo pilota, in modo da favorire il contatto e la giunzione delle loro pareti verticali ed ottenere una massa compatta di lega. Il primo collaudo dei parametri selezionati è stato condotto con la polvere di lega d'oro ternaria semplice (1), contenente soltanto argento e rame. Le modalità di costruzione ovvero il percorso del laser sono state mantenute uguali a quelle del pezzo pilota (*comblike*), cioè con una singola scansione del laser per ogni strato di costruzione.

Un fenomeno rilevante è stato osservato al variare della interdistanza tra i vettori, vale a dire la costante presenza di pori, sia tra vettori adiacenti, sia all'interno di ciascun vettore. L'entità di questa porosità può essere ridotta anche in modo considerevole, trovando il giusto valore di distanza, ma comunque tende a permanere e compromettere la qualità dei pezzi in fase di lucidatura. L'entità della porosità ottenuta con la migliore prototipazione in singola passata del laser rende ancora difficile la realizzazione di pezzi di alta gioielleria. Un altro fatto caratteristico dell'oggetto massivo è dato dalla presenza di porosità molto più evidente all'interno dei vettori, che invece è quasi inesistente nel pezzo lamellare (figg. 19, 20, 21, 22). **La porosità media rilevata nei campioni costruiti con la singola scansione è pari a 0.19%.**

D'altra parte, la rugosità (R_t) misurata sulle facce rappresentative (fig. 17) del solido mostrano un andamento caratteristico secondo che la direzione di analisi sia parallela oppure ortogonale alla direzione dei vettori. La rugosità sulla parete verticale è praticamente indipendente dalla interdistanza dei vettori. mentre la rugosità sulla faccia superiore in direzione normale ai vettori aumenta in modo significativo in funzione dell'interdistanza dei vettori (fig. 18). Questo accade poiché all'aumentare della distanza dei vettori aumenta anche la profondità dei solchi tra di loro.

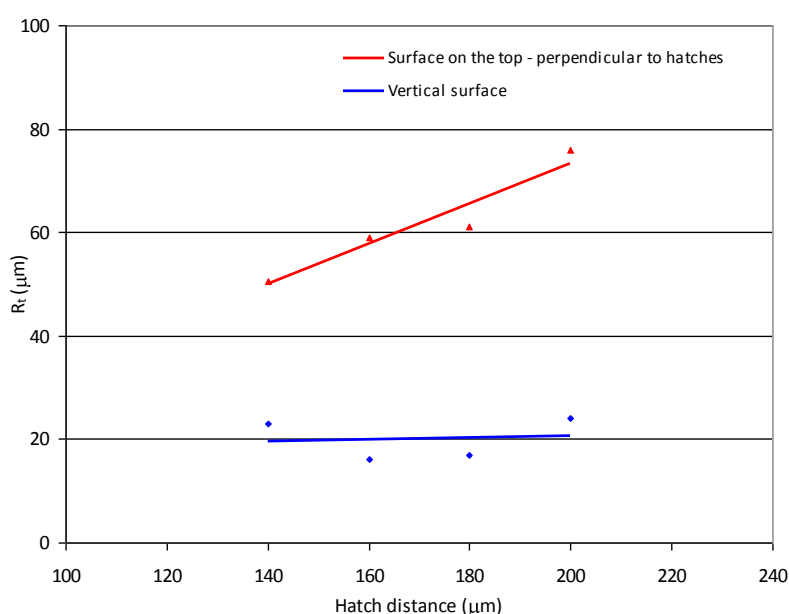


Fig. 18. Rugosità R_t in funzione della distanza dei vettori sulle facce del solido.

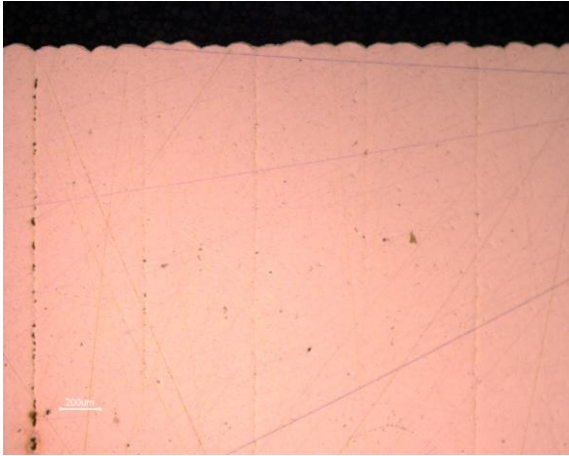


Fig. 19. Sezione trasversale dei vettori con distanza di 140 µm.

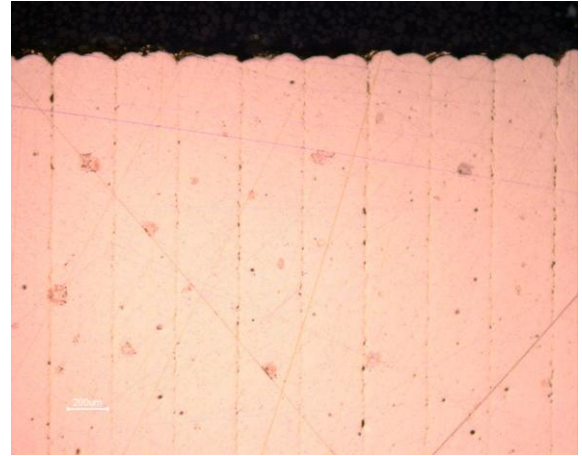


Fig. 20. Sezione trasversale dei vettori con distanza di 160 µm.



Fig. 21. Sezione trasversale dei vettori con distanza di 180 µm.

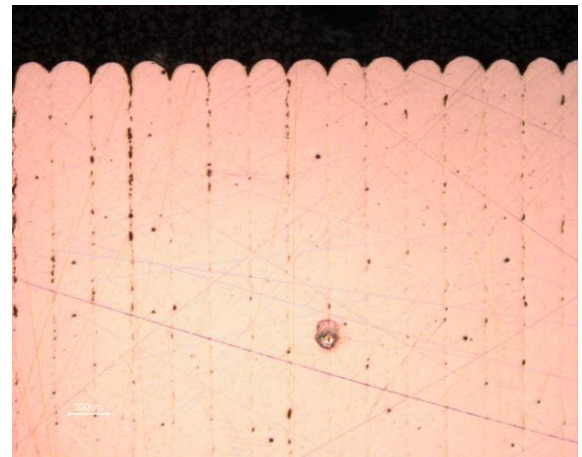


Fig. 22. Sezione trasversale dei vettori con distanza di 200 µm.

Un tentativo di eliminare questa porosità residua è stato effettuato impiegando un'altra modalità di prototipazione, vale a dire la tecnica della doppia scansione del laser su ogni strato di costruzione dei pezzi. La strategia impiegata per ridurre considerevolmente la porosità residua consiste nell'effettuare la seconda scansione sia sopra la traiettoria della prima scansione, sia a cavallo dei vettori prodotti con la prima scansione del laser (figg. 23, 24). I parametri della seconda scansione sono simili a quelli della prima e permettono di rifondere localmente la lega situata tra ciascun vettore ed eliminare la maggior parte dei difetti annidati in questa zona.

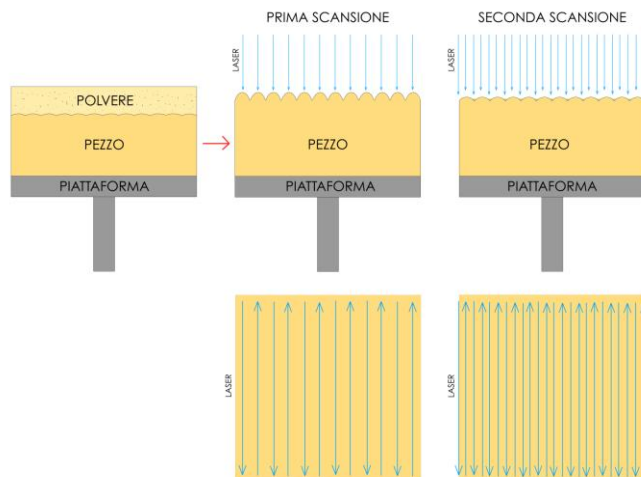


Fig. 23. Schema doppia scansione laser.

Il risultato microstrutturale ottenuto con l'uso della seconda scansione è molto buono e la porosità residua è stata ridotta a valori intorno al 0.01% (fig. 25). L'interruzione di una prototipazione tra la prima e la seconda scansione di uno strato del pezzo, mostra chiaramente l'effetto di cucitura e sigillamento del secondo passaggio laser a cavallo dei vettori, che rifondendo parzialmente il loro profilo è in grado di rimuovere la porosità interna (figg. 26, 27, 28). La migliore rugosità ottenuta in singola scansione è pari 50.6 μm , mentre quella in doppia scansione è di 63.5 μm , riferita alla direzione perpendicolare ai vettori per la lega classica (1).

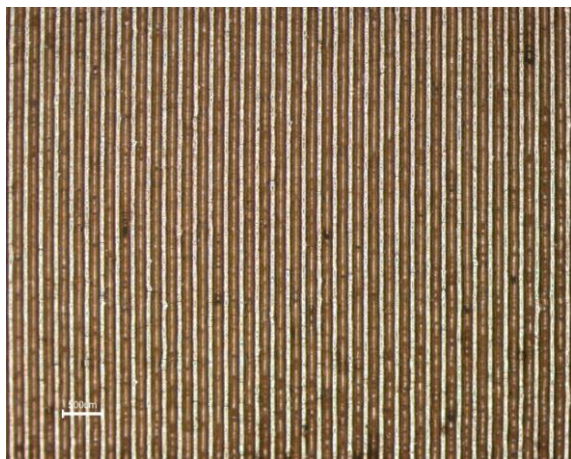


Fig. 24. Faccia superiore ottenuta con doppia scansione.



Fig. 25. Metallografia del pezzo con doppia scansione.

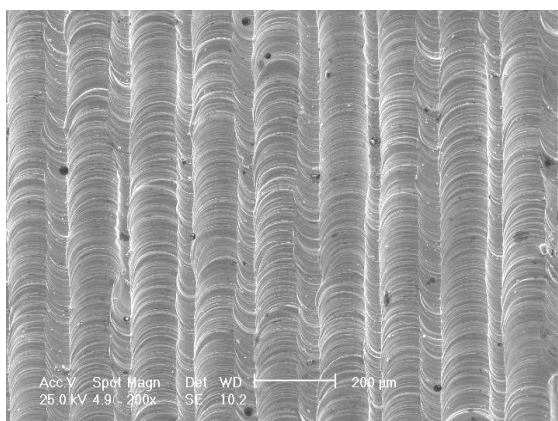


Fig. 26. SEM di una tipica doppia scansione intervettoriale

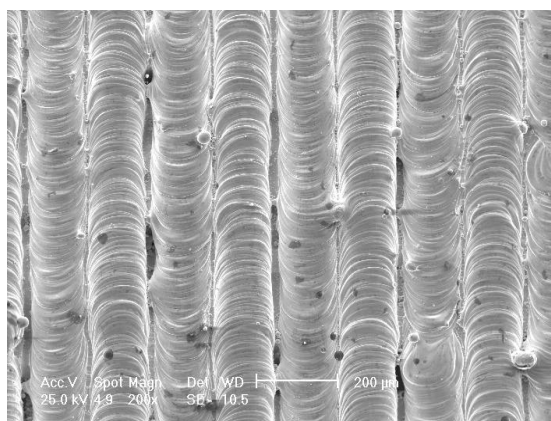


Fig. 27. SEM prima della seconda scansione con porosità.

Una volta individuata la giusta combinazione dei parametri laser per ottenere una microstruttura omogenea e compatta con la prima lega d'oro, il medesimo gruppo di parametri è stato utilizzato per prototipare lo stesso articolo, ma con una polvere costituita da una lega differente (3), avente il gallio, un elemento diffusamente utilizzato in oreficeria per modificare le proprietà ottiche, meccaniche e termiche delle leghe. Questo elemento ha la proprietà di abbassare notevolmente la temperatura d'inizio fusione di una lega, ma anche di mutarne significativamente il colore, la durezza e la tensione superficiale allo stato fuso. Infatti, la temperatura di solidus della lega classica è di circa 889°C e quella di liquidus uguale a 901°C, mentre il 2%p di gallio nell'altra lega abbassa la temperatura di solidus a 749°C e quella di liquidus a 867°C, con un'espansione dell'intervallo di fusione di circa 100°C.

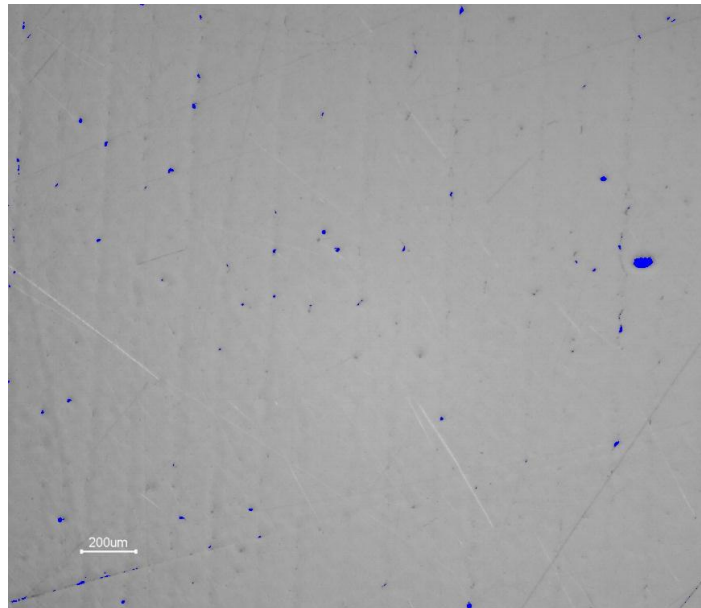


Fig. 28. Esempio d'analisi porosimetrica digitale per la lega senza gallio (2).

La medesima replica della serie di esperimenti (tab. 1) è stata nuovamente effettuata per trovare la combinazione di parametri laser più adatti alla lega contenente il gallio, ma in ogni caso la porosità interna dei pezzi e la rugosità superficiale (tab. 3), misurata sulle facce e lungo le direzioni più rappresentative del solido, sono sempre risultate più alte, anche eseguendo la prototipazione con il gruppo di parametri che avevano dato il risultato migliore con la precedente lega (figg. 29, 30, 31, 32). Inoltre, la lega con il gallio tende a proiettare in modo più intenso le particelle sul letto di polvere, nel momento in cui laser la colpisce, interferendo in modo nefasto con la costruzione ordinata del pezzo (fig. 33). Questo fenomeno di microesplosioni ed accumulo di grossi aggregati di particelle sul letto di polvere è uno dei motivi che contribuisce all'aumento di porosità ed al possibile sviluppo di rigonfiamenti superficiali del pezzo (figg. 34, 35). Le dimensioni dei pori con la lega al gallio (3) sono circa dieci volte più grandi (50 µm) di quelle riscontrati con la lega ternaria semplice (1).

LEGA	Porosità media (%)	Rugosità totale (µm)
1	0.01	76.6
2	0.09	84.4
3	0.47	99.1

Tab. 3. Porosità e rugosità totale medie ottenute con doppia scansione

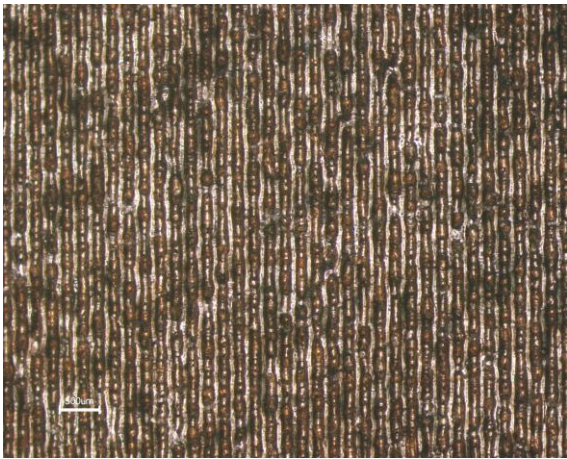


Fig. 29. Faccia con doppia scansione della lega con gallio.

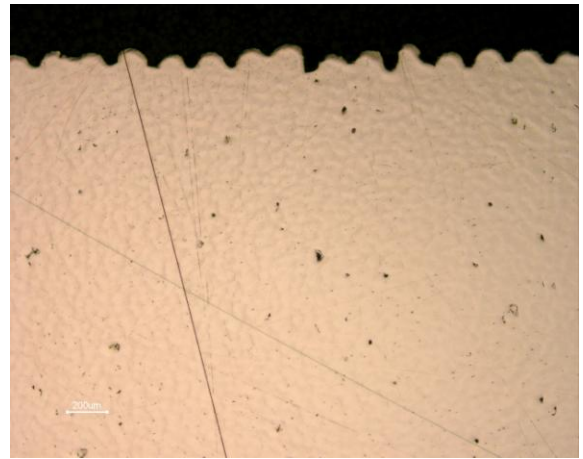


Fig. 30. Metallografia con doppia scansione della lega con gallio.

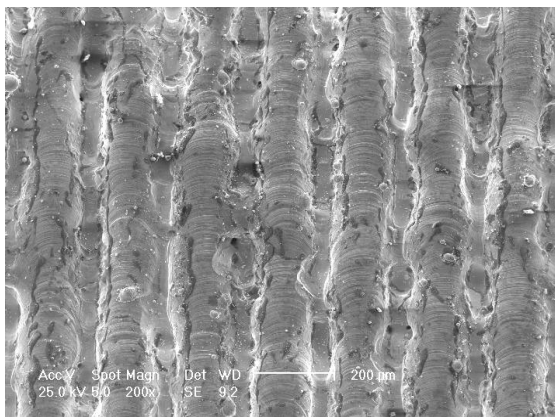


Fig. 31. Doppia scansione intervettoriale della lega con gallio.

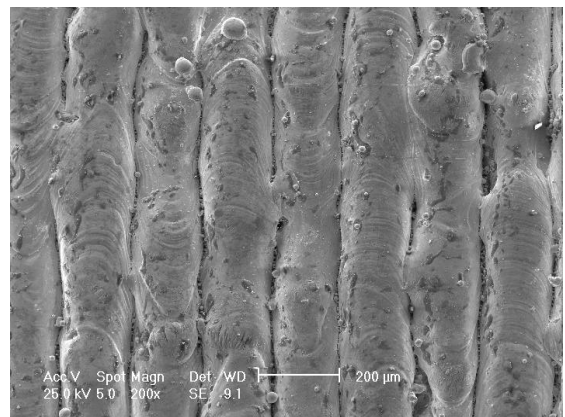


Fig. 32. Singola scansione con porosità della lega con gallio.

Nel caso dei pezzi ottenuti con la microfusione classica e diretta è stato osservato il fenomeno opposto, vale a dire che la lega contenente il 2%p di gallio ha una porosità inferiore (0.05%) rispetto alla lega che ne è priva (0.25%). Inoltre, considerando i campioni realizzati con la lega contenente gallio si denota che quelli prodotti attraverso microfusione classica presentano una rugosità inferiore (figg. 36, 37, 38, 39) rispetto quelli prodotti attraverso microfusione diretta (tab. 4). La rugosità media (R_t) della lega con il gallio lungo le tre direzioni principali (fig. 17) del solido è di 15.1 μm per i campioni realizzati attraverso microfusione classica, mentre per i campioni realizzati attraverso microfusione diretta è chiaramente più alta e pari a 25.2 μm . La minore rugosità e porosità dei campioni con il gallio ottenuti mediante la microfusione a cera persa, giustificabili con la capacità di questo elemento d'espandere durante la solidificazione (3.1%) e di bagnare le superfici ceramiche [5], sono in contraddizione con la maggiore rugosità e porosità dei pezzi ottenuti con la fusione laser selettiva. Questo fenomeno può essere tuttavia associato all'intervallo di fusione della lega molto più ampio che favorisce la presenza di una fase liquida per un tempo maggiore e la formazione di turbolenze dovute alla scansione del laser, oltre che all'effetto del gallio sulla tensione superficiale del liquido che tende a produrre un vettore liquido più ampio.

LEGA	Rt Microfusione Classica (μm)	Rt Microfusione Diretta (μm)
1	25.0	25.7
3	15.1	25.2

Tab. 4. Rugosità media per la microfusione dei modelli in cera e in resina.

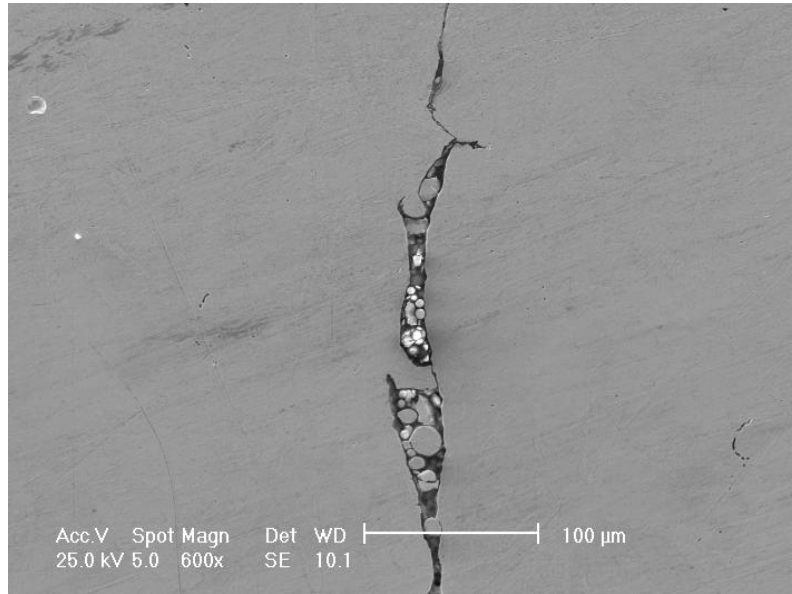


Fig. 33. Accumulo di porosità ed aggregati di particelle nella zona tra due vettori.

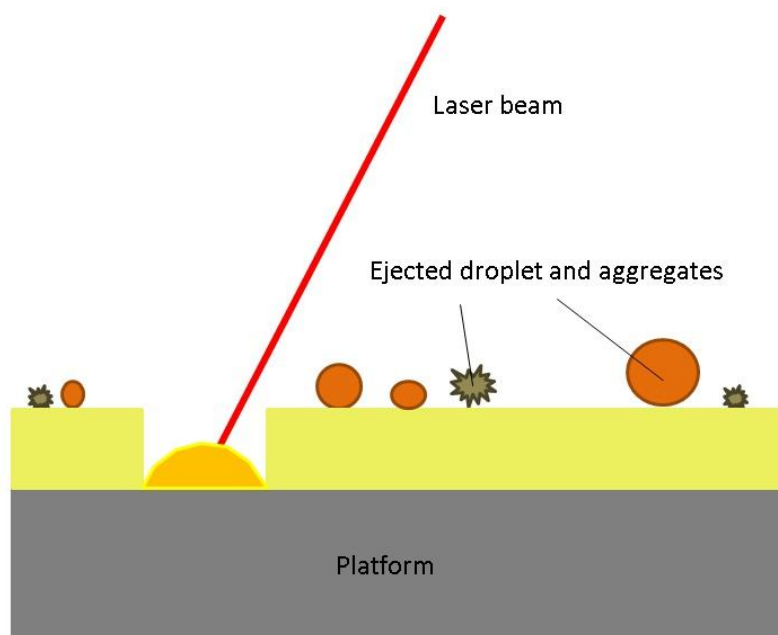


Fig. 34. Stadio iniziale della fusione laser con proiezione di microgocce ed aggregati di particelle.

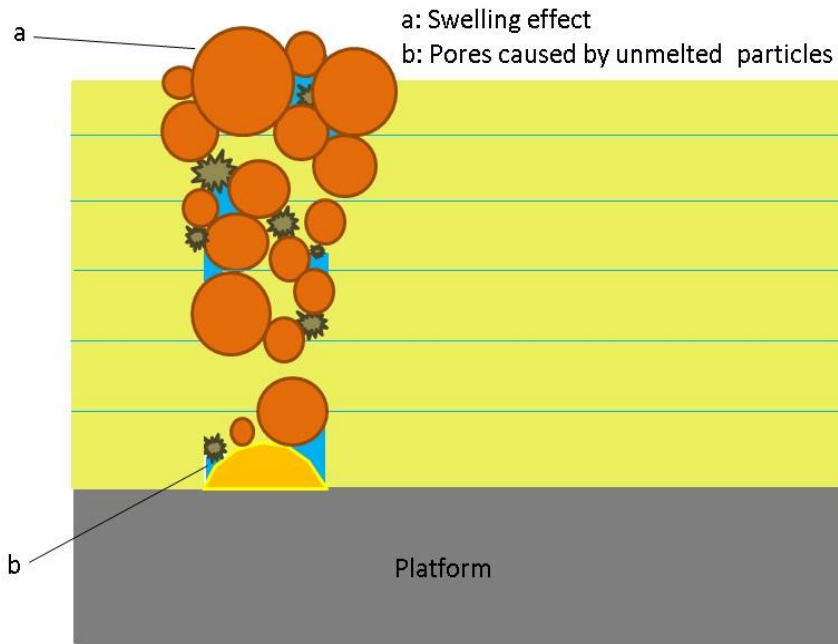


Fig. 35. Stadio finale della fusione laser con formazione di porosità e rigonfiamento.



Fig. 36. Microfusione Classica della lega senza gallio (1).

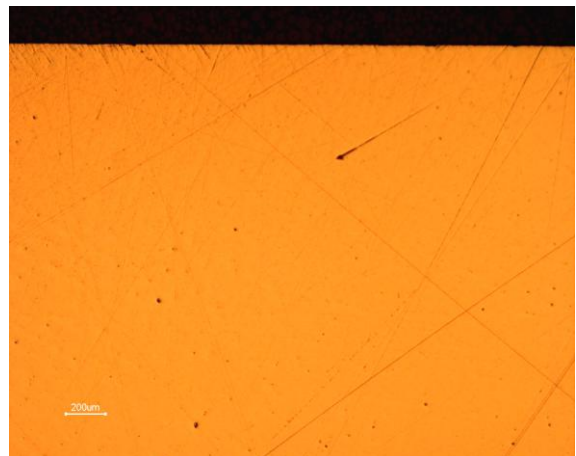


Fig. 37. Microfusione Classica della lega con gallio (3).



Fig. 38. Microfusione Diretta della lega senza gallio (1).



Fig. 39. Microfusione Diretta della lega con gallio (3).

Un altro interessante parametro che influenza la qualità finale degli articoli realizzati mediante fusione selettiva laser (SLM) è la distribuzione granulometrica delle polveri metalliche. In generale, una distribuzione completa della frazione più fine di particelle fornisce una polvere con una densità apparente più alta, ma dotata di una scorrevolezza inferiore, provocata da un attrito interparticellare più alto. Questo implica una polvere capace di fornire dei pezzi meno porosi, sebbene presenti una maggiore difficoltà ad essere distesa dalla spazzola sulla piattaforma di costruzione. D'altra parte, una distribuzione granulometrica depurata della frazione più fine di particelle, a parità di parametri laser e composizione chimica della lega, fornisce una polvere più scorrevole e quindi più facilmente distendibile sulla piattaforma di costruzione (tab. 5), ma gli articoli risultano più porosi a causa della presenza di cavità più grandi che durante il processo istantaneo di fusione non riescono ad essere completamente eliminate (fig. 40, 41).

LEGA	Distribuzione granulometrica (μm)	Scorrevolezza da Hall Flowmeter (s/50 g)	Scorrevolezza da Carney Flowmeter (s/50 g)	Densità apparente (g/cm^3)
1	0-53	18.5	3.5	9.26 ± 0.05
2	5-53	7.4	1.5	9.05 ± 0.03
3	0-53	Non scorre	4.0	8.95 ± 0.04

Tab. 5. Scorrevolezza e densità apparente in funzione della distribuzione granulometrica.

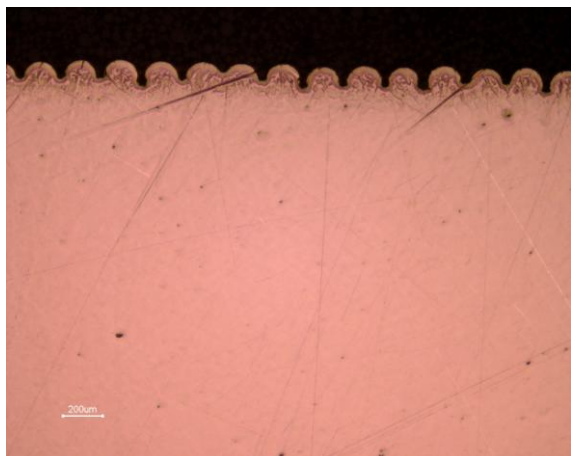


Fig. 40. SLM con polvere di intervallo granulometrico 5– 53 μm .



Fig. 41. SLM con polvere di intervallo granulometrico 0–53 μm .

Al fine di collaudare il gruppo di parametri laser e la doppia scansione nella realizzazione di alcuni articoli complessi di alta gioielleria, quali un anello cavo a sezione circolare con fodera interna traforata e preincassatura a giorno (figg. 42, 43, 44, 45) ed un altro anello cavo costituito da una tessitura parametrica. Il primo anello è stato costruito impiegando una polvere di oro rosso avente la composizione della lega classica (1), mentre il secondo anello è stato realizzato con una polvere di oro giallo 3N (fig. 46, 47, 48). I parametri di processo impiegati per la prototipazione di entrambi gli articoli sono stati scelti nel gruppo di parametri esaminati nella precedente analisi.

Il risultato è stato soddisfacente, sia nella precisione che nell'accuratezza dei dettagli morfologici del modello tridimensionale, vale a dire è stata riscontrata una buona uniformità e rispetto degli spessori della parete e dei dettagli decorativi, dei fori delle luci interne della fodera, delle granette d'incassatura ed un livello di porosità molto basso anche nella zona di attacco dei supporti di costruzione del pezzo.

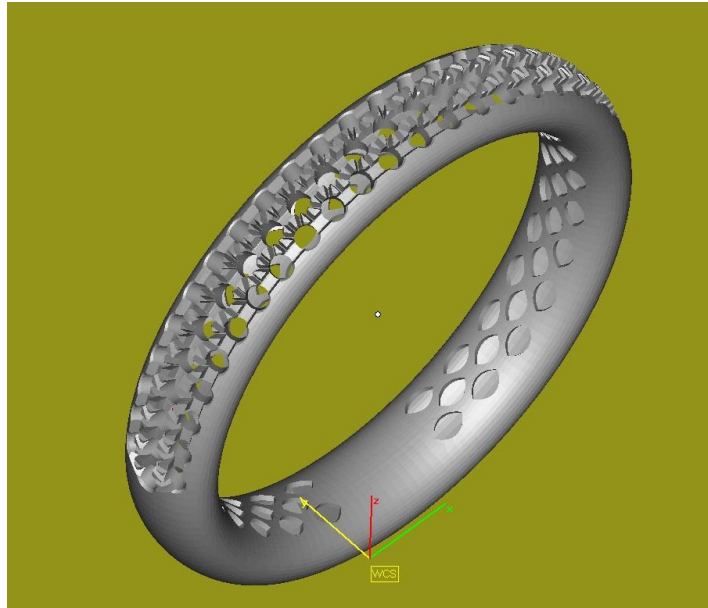


Fig. 42. Modello tridimensionale dell'anello pavè realizzata con Magics (Materialise).



Fig. 43. Gruppo di anelli pavè realizzati al termine della produzione.

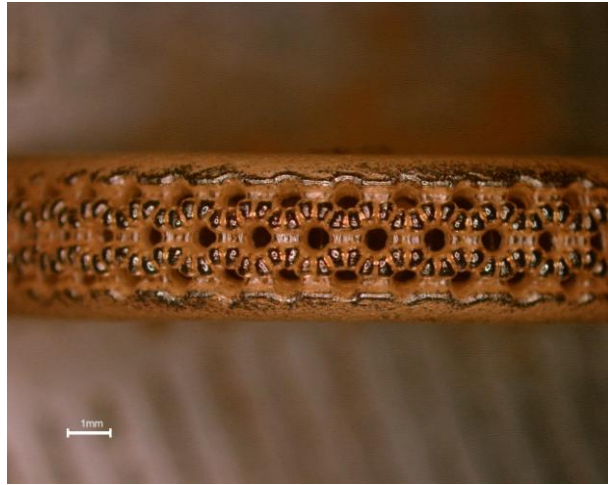


Fig. 44. Dettaglio del pavé.

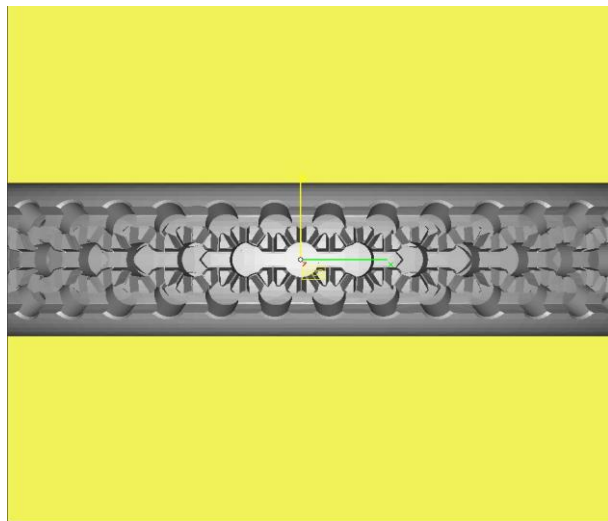


Fig. 45. Dettaglio del modello del pavé.

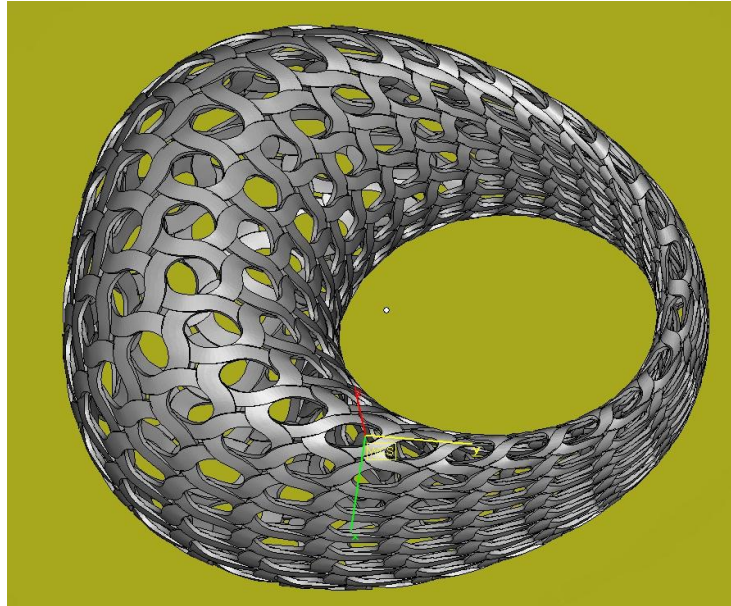


Fig. 46. Modello tridimensionale dell'anello con tessitura parametrica realizzata con Magics (Materialise).

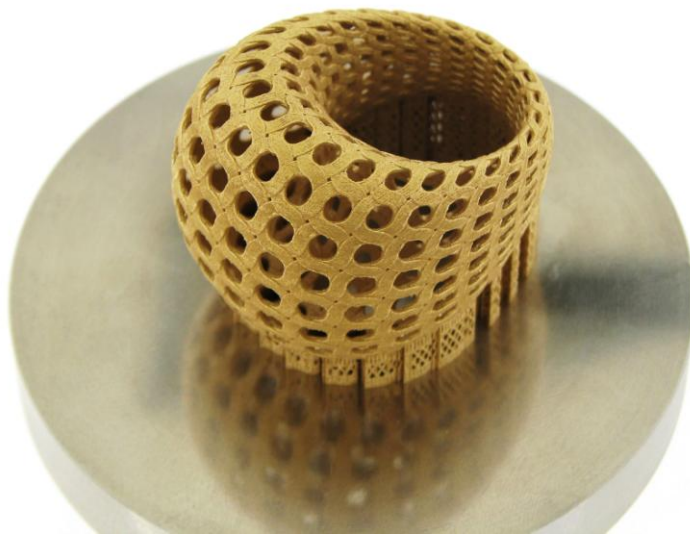


Fig. 47. Anello con tessitura parametrica al termine della produzione.

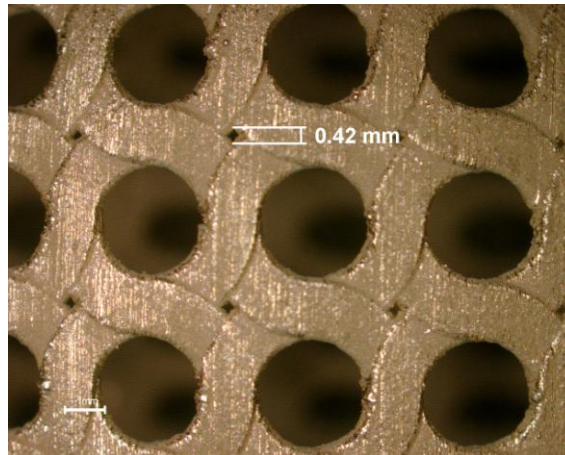


Fig. 48. Dettaglio della tessitura parametrica.

Conclusioni

In questo nuovo lavoro abbiamo studiato la possibilità di usare la tecnologia SLM per realizzare degli articoli di gioielleria che presentano una qualità superficiale ed interna paragonabile a quella ottenibile con il processo classico di colata a cera persa. La verifica dell'efficacia del metodo impiegato è stata svolta mediante degli esperimenti a complessità crescente partendo dallo studio della qualità dei singoli elementi costruttivi dei pezzi, denominati vettori, in funzione dei parametri di processo. Una volta stabilito il corretto gruppo di parametri sperimentali per il singolo vettore, in modo da fornire una superficie liscia ed una struttura esente da pori, lo stesso gruppo di parametri è stato applicato per la realizzazione di un oggetto solido costituito da una serie consecutiva di vettori e valutando la difettologia relativa. La riduzione dei difetti è stata effettuata inserendo una scansione laser addizionale atta a rifondere localmente la lega per eliminare le porosità residue della prima scansione. La sperimentazione condotta ha consentito di individuare le criticità nell'utilizzo di una polvere di lega d'oro contenente gallio, riconducibili all'effetto di questo elemento sulla tensione superficiale del liquido. I risultati sono stati utilizzati nella realizzazione di articoli complessi di alta gioielleria. Il risultato è stato soddisfacente, sia nella precisione che nell'accuratezza dei dettagli morfologici del modello tridimensionale, utilizzando sia polvere di oro rosso che di altri colori.

Bibliografia

- 1) D. Zito et al., Latest developments in Selective Laser Melting production of gold jewellery, Proceedings of Santa Fe Symposium, 2012 pp. 537-562.
- 2) Kruth, J., Mercelis, P., Froyen, L. and Rombouts, M. (2004), "Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting", Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium, pp. 44-59.
- 3) Y. Yadroitsev et al., Factor analysis of selective laser melting process parameters and geometrical characteristics of synthesized single tracks, Rapid Prototyping Journal, 3(18)(2012)201-208.
- 4) J. P. Kruth and S. Kumar, Advanced Engineering materials 7(8)(2005)750.
- 5) CRC Handbook of Chemistry and Physics, 87th Edition (2006-2007), [David R. Lide](#) editor.