POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Gestionale Classe LM-31

Percorso Industria 4.0

A.A. 2023/2024 Sessione di Laurea Ottobre 2024

Tesi di Laurea Magistrale

Tecniche di finitura nel settore Orafo

Relatore/i

prof.ssa Flaviana Calignano

prof. Luca Iuliano

Candidato

Francesca Gurgone s312944

Anno Accademico 2023-2024

Sommario

L’obiettivo di questa tesi è analizzare l’applicazione *Additive Manufacturing* (AM) all’interno del settore orafo, esplorando le potenzialità e le sfide di questa innovativa tecnologia in un ambito caratterizzato da alta precisione e creatività. In particolare, la tesi si focalizza sull’analisi delle possibili tecniche di AM utilizzabili in campo orafo, con un'attenzione speciale alle tecniche di finitura attualmente più diffuse e alle loro implicazioni sulla qualità e l’estetica dei prodotti finali.

Nel corso del lavoro, verranno esaminate diverse tecnologie di AM, come il *Powder Bed Fusion-Laser Beam/Melting* (PBF-LB/M), e altre tecniche rilevanti, valutando i loro vantaggi e limiti specifici per la produzione di gioielli e componenti orafi. Saranno approfondite le caratteristiche dei materiali utilizzabili, le finiture superficiali ottenibili e le possibili configurazioni di design che queste tecniche permettono di realizzare, con un occhio di riguardo verso l'innovazione e la personalizzazione dei prodotti.

Nella seconda parte della tesi, sarà presentato un caso di studio concreto che include la riprogettazione di un componente orafo specifico e la sua produzione tramite PBF-LB/M. Questo esempio pratico sarà seguito da un'analisi dettagliata dei risultati ottenuti. In particolare, verranno esaminate le prestazioni del componente sia dal punto di vista della precisione geometrica che della qualità superficiale. A tal fine, sono state testate anche due tecniche di finitura comuni, la burattatura in umido e la pallinatura con microsfere di vetro, per valutare il loro impatto sulla riduzione della rugosità e sulla definizione dei dettagli. Questi test forniranno una visione completa delle potenzialità e delle limitazioni delle tecnologie AM nel settore orafo, mettendo in luce le migliori pratiche per ottenere risultati ottimali nella produzione di gioielli di alta qualità.

Questo studio mira a dimostrare come l'AM possa rivoluzionare il settore orafo, offrendo nuove opportunità per la creazione di design complessi, personalizzati e di alta qualità, e contribuendo a ridurre i tempi e i costi di produzione. La tesi intende fornire una visione completa delle applicazioni attuali e future dell’AM nel settore orafo, proponendo soluzioni innovative e pratiche per superare le sfide legate a questa tecnologia emergente.

Indice

1 Introduzione 1

1.1 AM come tecnologia abilitante dell'Industria 4.0 1

1.2 Principali fasi per ottenere un componente tramite AM 3

1.3 Tecniche per metalli utilizzate nell'AM 4

1.4 Analisi e applicazioni del PBF-LB/M 6

2 AM nel settore orafo 12

2.1 Introduzione al settore orafo 12

2.2 Tecniche di AM usate nel settore orafo 13

2.2.1 Materiali usati nel settore orafo 14

2.3 Uso della Stereolitografia nel settore orafo 15

2.4 Uso della tecnica di PBF-LB/M nel settore orafo 17

2.5 Confronto tra processi: produzione a cera persa con SLA e PBF-LB/M 19

2.6 Uso della micro-PBF-LB/M come alternativa al PBF-LB/M tradizionale 21

3 Tecniche di finitura utilizzate nel settore orafo 24

3.1 Tecniche di finitura meccaniche adottate in campo orafo 24

3.1.1 Lucidatura 24

3.1.2 Centrifugal Disc Finishing 25

3.1.3 *Drag Finishing* 26

3.1.4 *Stream Finishing* 27

3.1.5 *Tumbling* (o *Barreling*) 28

3.1.6 Centrifugal Tubling 29

3.1.7 Vibratory Bowl Finishers 29

3.1.8 Confronto tra tecniche di lucidatura meccaniche 30

3.2 Tecniche di finitura innovative introdotte nel campo orafo 32

3.2.1 Lucidatura Laser 32

3.2.2 Electropolishing 33
3.2.3 Electro-Mechanical Finishing 35
3.2.4 *Plasma Electrolytic Polishing* (PEP) 38
4 Progettazione del componente 41
4.1 Scelta del componente 41
4.2 Riprogettazione 43
4.2.1 Ghiera 43
4.2.2 Perni cilindrici con basi coniche 45
4.2.3 Supporti per stampa PBF-LB/M 46
5 Stampa del componente 48
5.1 Macchina utilizzata, limiti e specifiche 48
5.2 Materiale utilizzato 50
5.3 Risultato della stampa dell'anello 52
6 Tecniche di finitura testate 54
6.1 Burattatura in umido 55
6.1.1 Descrizione del Processo di Burattatura in umido 55
6.1.2 Risultati Ottenuti dalla Burattatura 56
6.2 Pallinatura 57
6.2.1 Descrizione del Processo di Pallinatura 57
6.2.2 Risultati Ottenuti dalla Pallinatura 58
7 Conclusioni 60
Bibliografia 63

1 Introduzione

In questa tesi esploreremo il tema dell'AM nel contesto dell'Industria 4.0, con particolare attenzione al settore orafo.

L'AM offre una libertà di progettazione senza precedenti e porta innovazioni significative nella sostenibilità. Nella gestione della produzione e delle operazioni, l'integrazione dell'AM semplifica i processi aziendali consentendo l'ottimizzazione e automazione della produzione all'interno dell'ecosistema Industria 4.0. I modelli di business che adottano l'AM si concentrano sulla produzione veloce di parti multiple, sull'efficienza energetica, sulla riduzione degli sprechi e sulla capacità di ricondizionare le parti metalliche. Coinvolgendo attivamente il cliente nel processo produttivo, questo approccio non solo riduce i costi di trasporto ma promuove anche un modello distribuito della produzione (Castelo-Branco, Cruz-Jesus and Oliveira, 2019).

Tuttavia, l'implementazione dei sistemi di produzione additiva in ambienti tradizionali richiede una valutazione attenta dei costi e delle specifiche esigenze produttive, specialmente in settori come l'artigianato orafo dove il lavoro manuale svolge un ruolo fondamentale (Hernandez Korner *et al.*, 2020) .

Le capacità avanzate dell'AM, come la progettazione assistita al computer e la produzione personalizzata, offrono vantaggi significativi nel settore orafo. Questa tecnologia consente una flessibilità di progettazione senza precedenti e la rapida produzione di parti multiple, semplificando la creazione di gioielli e componenti personalizzati con maggiore precisione e dettaglio.

1.1 AM come tecnologia abilitante dell'Industria 4.0

La quarta rivoluzione industriale, nota come Industria 4.0, rappresenta l'integrazione delle nuove tecnologie dell'informazione alle moderne competenze della manifattura (Dilberoglu *et al.*, 2017).

Tra le tecnologie abilitanti di questa rivoluzione è bene evidenziare: l'IoT (*Internet of Things*), il Big Data, il Cloud Computing, vi è l'AM. L'AM consente di produrre componenti complessi direttamente da modelli digitali, senza la necessità di strumenti di produzione tradizionali con una tecnica "*layer by layer*" ovvero tramite la deposizione di di strato dopo strato. Questo

approccio non solo riduce i tempi e i costi di produzione, ma offre anche la possibilità di creare pezzi personalizzati e adattabili alle esigenze specifiche del cliente. Grazie all'AM, è possibile realizzare parti con geometrie complesse e con proprietà materiali avanzate, che spaziano dalla leggerezza e resistenza nel settore aerospaziale, alla biocompatibilità e personalizzazione nel campo biomedico. L'applicazione dell'AM si estende a diversi ambiti industriali, dimostrando il suo potenziale non solo nella prototipazione rapida e nella produzione su piccola scala, ma anche nell'integrazione sempre più diffusa nelle catene di produzione più ampie. Questo rende l'AM non solo una tecnologia di punta nell'Industria 4.0, ma anche un motore di innovazione per lo sviluppo di prodotti avanzati e su misura che rispondono alle sfide e alle opportunità del mercato moderno.

Come è possibile notare dalla ricerca di mercato proposta da Industrial Today, le applicazioni e la diffusione dei servizi di AM sono in costante crescita negli anni. Nel 2020 il mercato mondiale collegato a questa tecnologia è stato valutato circa 12,6 miliardi di dollari e si prevede che l'industria continuerà a crescere con un tasso di crescita di oltre il 17%. (3D Hubs, 2021)

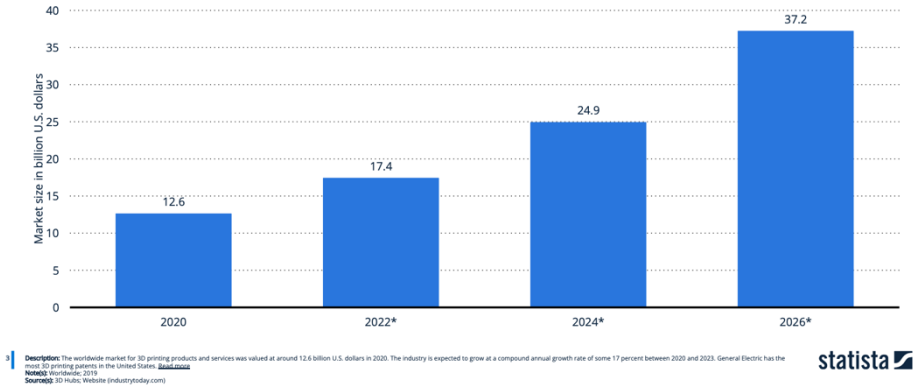

Grafico 1:Market Size AM dal 2020 al 2026, da Statista

Questo è possibile perché l'AM permette di utilizzate una vasta gamma di materiali per molteplici applicazioni in diversi settori industriali.

In base alle esigenze del settore è possibile utilizzare diversi materiali con diverse proprietà fisiche. Come mostrato in figura 1, la diversificazione dei materiali risulta essere essenziale per poter supportare le moderne applicazioni industriali in modo da consentire la produzione di componenti personalizzati e performanti che supportano l'avanzamento dell'Industria 4.0.

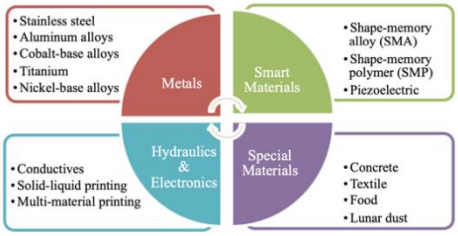

Figura 1: Materiali usati in campo AM (ripreso da Dilberoglu et al.*, 2017)*

All'interno di questa tesi ci concentreremo sull'applicazioni delle tecniche riguardanti principalmente i metalli e come queste possono essere usate nel settore orafo.

1.2 Principali fasi per ottenere un componente tramite AM

La prima fase è la progettazione 3D del componente tramite un modello matematico ottenibile tramite un software CAD. Questa fase risulta essere critica dato che i progettisti incorrono nei vincoli del *Design For Manufacturing* sia quelli imposti dalla produzione additiva a livello industriale. Per tali motivi sono stati creati dei software ad hoc per la gestione di geometrie complesse integrando la fase di simulazione. È possibile inserire supporti sia manualmente durante la progettazione che automaticamente tramite il software della macchina di AM per garantire la stabilità della geometria durante il processo di stampa

Nella fase successiva è essenziale eseguire una post-elaborazione per adattare il design alla tecnica di produzione. Di solito, il modello viene esportato nel formato STL (*Standard Tessellation Language*), il quale rappresenta la superficie triangolata del modello CAD 3D. Questo formato costituisce lo standard per ogni processo di produzione additiva, convertendo principalmente la geometria continua del file CAD in un'intestazione, piccoli triangoli o una lista di triplette di coordinate x, y e z, insieme al vettore normale ai triangoli. Successivamente, una volta completata la fase di progettazione e preparazione del file STL, si procede con la stampa del componente. La durata del processo dipende dalla complessità della geometria, dalla tecnica di stampa utilizzata e dalle dimensioni del componente stesso, potendo variare da pochi minuti fino a diverse ore.

Dopo la fabbricazione del componente, è spesso necessario eseguire ulteriori processi per migliorarne le proprietà superficiali, dimensionali o meccaniche. Questi processi possono includere lavorazioni di finitura, trattamenti termici, sabbiatura, lucidatura o trattamenti chimici, a seconda delle specifiche dell'applicazione e dei requisiti del componente.

Queste fasi post-stampa sono cruciali per garantire che il componente rispetti le aspettative di qualità e prestazioni richieste, contribuendo così al successo complessivo dell'implementazione dell'AM nella produzione industriale (Wong and Hernandez, 2012).

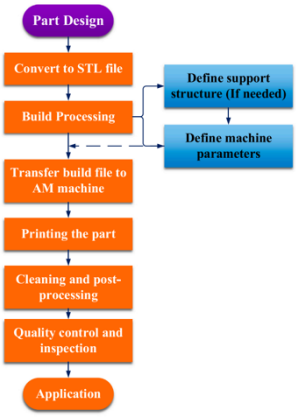

Grafico 2: Workflow dell'AM (ripreso da Sefene, 2022)

1.3 Tecniche per metalli utilizzate nell'AM

I metalli, grazie alle loro favorevoli caratteristiche meccaniche, sono tra i materiali più utilizzati nel campo dell'ingegneria. Le loro proprietà, come l'alta resistenza, la durabilità e la capacità di sopportare carichi elevati, li rendono ideali per una vasta gamma di applicazioni industriali, dall'automobilistico all'aerospaziale, fino al settore biomedicale. Per tale motivo, c'è un crescente interesse nel campo della produzione additiva (AM) per sviluppare tecnologie in grado di sostituire le tecniche di produzione tradizionali per la realizzazione di parti metalliche (Frazier, 2014)

Attualmente sono disponibili diverse tecniche per la produzione di parti in metallo tramite l'AM. In generale queste vengono classificate in base alla fonte di calore e da come viene fornita la materia prima (Lewandowski and Seifi, 2016)

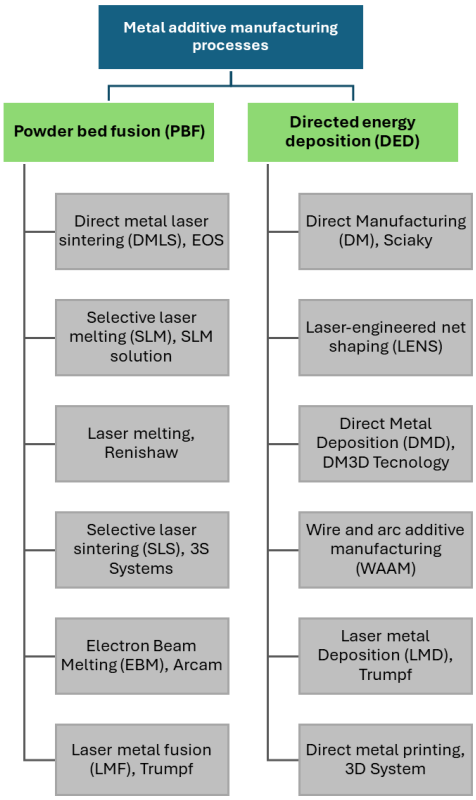

Figura 2:Principali tecniche di AM per i metalli con i nomi delle macchine disponibili a livello commerciale (modificato da Lewandowski and Seifi, 2016)

Le due principali sottocategorie per il *Metal* AM sono il *Power Bed Fusion* (PBF) e la *Direct Energy Deposition* (DED).

Nel processo di PBF il materiale è sottoforma di letto di polvere. Un raggio laser o un fascio di elettroni colpisce il materiale e lo fonde in modo selettivo con uno schema predeterminato *layer by layer*. Questa tecnica tende ad avere una migliore finitura superficiale e dimensionale. In generale viene utilizzato per la produzione di componenti complessi e di alta qualità per il settore aerospaziale, automotive o biomedicale.

Nel processo DED il materiale, sottoforma di filo o polvere, è depositato direttamente su una piattaforma o su un componente preesistente utilizzando un ugello e fuso tramite un laser, un fascio di elettroni o un arco di plasma, la superficie ottenuta con questa tecnica risulta essere più ruvida e può richiedere delle lavorazioni successive per ottenere le specifiche richieste. Per questo motivo questa tecnica viene principalmente usata per riparazioni o rivestimenti di componenti.

Data questa suddivisione approfondiremo l'analisi della tecnica utilizzata nella seconda parte della tesi per la stampa del componente. In particolare, ci concentreremo PBF-LB/M, una delle tecniche più avanzate e ampiamente adottate nel campo del *Metal* AM. Analizzeremo i principi fondamentali di questa tecnica, le sue applicazioni pratiche e i vantaggi specifici che essa offre in confronto ad altre metodologie di produzione additiva.

1.4 Analisi e applicazioni del PBF-LB/M

Il PBF-LB/M (*Powder Bed Fusion - Laser Beam Melting*) rappresenta una significativa evoluzione nel campo della manifattura additiva, derivando dal processo originario di SLS (*Selective Laser Sintering*), che era inizialmente sviluppato per la lavorazione di materiali polimerici e compositi polimerici con metalli. Mentre l'SLS utilizza un laser per sinterizzare selettivamente particelle di polvere legandole insieme allo stato solido, il PBF-LB/M va oltre, applicando il concetto della fusione selettiva al settore dei metalli.

Il PBF-LB/M si distingue dalle altre tecnologie di manifattura additiva per metalli grazie alla sua capacità di fondere completamente il materiale in polvere, creando componenti metallici densi con proprietà meccaniche eccellenti. A differenza dei processi che utilizzano sinterizzazione allo stato solido o agenti leganti, come alcune varianti del 3D *printing*, il PBF-LB/M elimina la necessità di post-elaborazioni come trattamenti termici o infiltrazioni di materiale per migliorare la densità o la resistenza delle parti prodotte. Questo rende il PBF-LB/M particolarmente vantaggioso per la produzione di componenti "*near-net-shape*" che richiedono alta qualità superficiale e integrità strutturale.

L'evoluzione dal SLS al PBF-LB/M ha permesso di trasferire il concetto di sinterizzazione selettiva dai polimeri ai metalli, aprendo nuove opportunità per la produzione additiva in ambiti industriali altamente esigenti. Il PBF-LB/M, infatti, è applicabile esclusivamente ai metalli, consentendo la realizzazione di strutture complesse e personalizzate che sono molto richieste nei settori aeronautico e biomedico, dove precisione, resistenza e leggerezza sono essenziali.

Questa tecnologia non solo ha ampliato le possibilità della manifattura additiva, ma ha anche ridefinito gli standard di produzione per componenti metallici complessi, offrendo soluzioni innovative che rispondono alle esigenze più avanzate in termini di design e performance (Sefene, 2022).

Il processo di PBF-LB/M fa parte, come indicato nel paragrafo precedente delle tecniche PBF, in particolare la tecnica analizzata fa parte del gruppo L-PBF, ovvero basata sul fascio laser. Le macchine per PBF-LB/M possono avere un numero variabile di laser, a seconda del modello e del produttore. Inizialmente, le macchine PBF-LB/M erano dotate di un singolo laser, ma con l'evoluzione della tecnologia e per migliorare la produttività e l'efficienza, i produttori hanno iniziato a integrare più laser nelle loro macchine. In generale i laser usato sono a fibra (Fiber Laser), laser Yb (Itterbio-drogato Yttrio Alluminio Granato), laser Nd (Neodimio-drogato Yttrio Alluminio Granato), laser a diodo (Diode Laser). La potenza del laser, la velocità di scansione, lo spaziamento tra gli strati e lo spessore dello strato sono i parametri comunemente regolati per ottimizzare il processo.

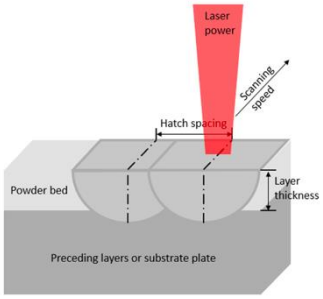

Figura 3: Parametri del processo di PBF-LB/M (ripreso da Yap et al.*, 2015)*

Questa particolare tecnica consente di fabbricare geometrie complesse con una densità superiore al 99,9%, andando a fondere le polveri tramite un laser ad elevata potenza.

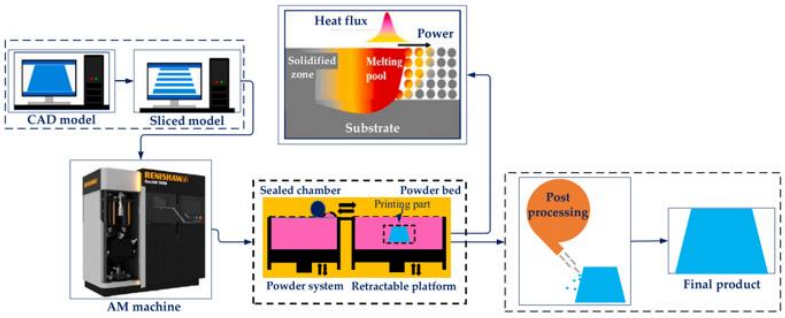

Grafico 3: Principio funzionamento PBF-LB/M (ripreso da Sefene, 2022)

Nel contesto del processo PBF-LB/M, come mostrato nel Grafico 3, dopo la progettazione iniziale, i dati CAD devono essere elaborati mediante software come *Magics* della Materialize convertiti nel formato proprietario del produttore della macchina ed elaborati dal software della macchina. Questo processo è fondamentale per creare strutture di supporto per eventuali parti

sporgenti del componente e per generare i dati di sezione necessari per la scansione laser degli strati individuali durante la fabbricazione (Yap *et al.*, 2015).

La parte fisica del processo di PBF-LB/M inizia con la deposizione di uno strato sottile di polvere sulla piattaforma; quest'ultima viene regolata in modo da garantire la massima qualità e precisione del componente finale.

Inizialmente viene posizionata ad una distanza tale da garantire la deposizione corretta del primo strato di polvere. Successivamente uno o più laser ad alta potenza fonde in modo selettivo le particelle di polvere metallica secondo il percorso definito dal file di *slicing*. Terminata la fusione del primo strato, la piattaforma si abbassa dello spessore dello strato e una lama di acciaio o gomma distribuisce uniformemente la polvere sulla piattaforma.

Questo processo di fusione laser selettiva e di deposizione dello strato di polvere si ripete tante volte fino a quando l'intero componente non è completato.

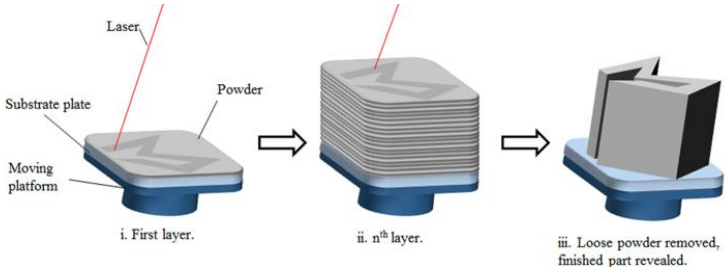

Figura 4: Sequenza del processo di PBF-LB/M (ripreso da Yap et al.*, 2015)*

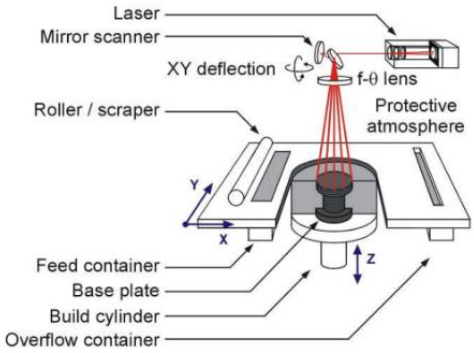

Figura 5: Layout tipico del processo PBF-LB/M (ripreso da Yap et al.*, 2015)*

Nel corso del processo PBF-LB/M, la camera di lavoro è mantenuta in un'atmosfera protettiva riempita con gas inerte, come azoto o argon, per prevenire l'ossidazione delle parti metalliche durante la fusione. Questo ambiente inerte è essenziale per garantire la qualità del componente finale, poiché impedisce la formazione di ossidi e altri difetti superficiali che potrebbero compromettere le proprietà meccaniche del pezzo.

A differenza di altre tecnologie di manifattura additiva, come l'*Electron Beam Melting* (EBM), che prevede il preriscaldamento della polvere metallica per ridurre gli stress termici, nel PBF-LB/M il preriscaldamento è limitato principalmente alla piattaforma di costruzione. Questo preriscaldamento della piattaforma, adottato in alcune macchine PBF-LB/M, ha lo scopo di ridurre gli stress residui nei primi strati del materiale e migliorare l'adesione del pezzo alla piattaforma stessa. Tuttavia, non vi è preriscaldamento della polvere metallica durante l'intero processo di costruzione. La fusione del materiale avviene in modo localizzato e istantaneo al passaggio del fascio laser, che scioglie selettivamente la polvere metallica strato dopo strato.

Lo spessore dello strato di polvere depositato, che varia generalmente da 20 a 100 micron, è un parametro critico nel PBF-LB/M. Questo spessore è scelto per ottimizzare la risoluzione dei dettagli geometrici e per garantire una fluida distribuzione della polvere sul letto di costruzione. Un corretto controllo dello spessore degli strati è essenziale per ottenere una buona qualità superficiale e per evitare difetti come la formazione di porosità o mancanza di fusione tra gli strati.

Una volta terminato il processo di stampa, a differenza dell'EBM, dove è necessario attendere un lento raffreddamento del componente e della polvere circostante, nel PBF-LB/M il raffreddamento del pezzo avviene quasi istantaneamente dopo la solidificazione del metallo fuso. Questo rapido raffreddamento riduce significativamente i tempi di produzione e minimizza il rischio di deformazioni dovute a stress termici residui.

Dopo il raffreddamento, il componente può essere rimosso dalla piattaforma di costruzione insieme alla polvere non fusa rimanente. Questa polvere residua può essere setacciata e riciclata per future stampe, rendendo il processo non solo efficiente dal punto di vista della produzione, ma anche sostenibile in termini di utilizzo del materiale (Farshidianfar, Khajepour and Gerlich, 2016).

Una volta raffreddato il componente, è possibile rimuoverlo dalla piattaforma di costruzione insieme alla polvere non fusa rimanente. Questa polvere è possibile riciclarla per delle future stampe.

Successivamente, come tutti i processi di AM, è possibile che il componente stampato richieda lavorazioni successive per migliorarne proprietà superficiali, dimensionali o meccaniche oppure per andare a rimuovere i supporti inseriti in fase di stampa per stabilizzare il componente.

Il processo PBF-LB/M può essere applicato con una vasta gamma di lege a base di alluminio, ferro, titanio, cobalto, rame e nichel (Prashanth, 2020).

In generale le applicazioni del PBF-LB/M si concentrano in settori ad alto valore aggiunto dato che questa tecnica risulta essere ancora molto costosa in confronto alle tecniche di produzione convenzionali.

Le principali applicazioni:

- Settore biomedicale e odontoiatrico: i prodotti in questo campo possono essere personalizzati per andare a soddisfare le esigenze individuali non andando ad incorrere in costi aggiuntivi di personalizzazione
- Settore aerospaziale: i prodotti ottenuti tramite PBF-LB/M risultano essere molto leggeri, resistenti e di geometri molto complessa. In particolare, le principali applicazioni si hanno per la produzione di parti di motori, componenti strutturali e condotti di raffreddamento
- Settore automotive: le applicazioni in questo ambito comprendono la produzione di componenti leggeri, prototipi veloci, strumentazione sofisticata e parti destinate ai sistemi di raffreddamento e scarico.
- Settore dell’energia: i manufatti prodotti mediante PBF-LB/M comprendono principalmente componenti per generatori avanzati, parti di turbine e altri componenti destinati a operare in condizioni di elevate temperature e pressioni.

Data la capacità del processo PBF-LB/M di produrre componenti di geometria sofisticata e con elevata precisione, il settore orafo si presenta come uno dei settori più promettenti per l'applicazione dell'AM. Questa tecnologia rivoluzionaria consente agli orafi di creare gioielli e componenti preziosi con dettagli intricati e design personalizzati, superando le limitazioni dei tradizionali metodi di produzione. L'introduzione dell'AM nel settore orafo apre nuove

prospettive creative, permettendo di esplorare e realizzare forme e strutture innovative che sarebbero difficili, se non impossibili, da ottenere con le tecniche convenzionali, offrendo così significativi vantaggi in termini di personalizzazione, qualità ed efficienza.

2 AM nel settore orafo

2.1 Introduzione al settore orafo

Per secoli i processi produttivi orafi sono rimasti per lo più invariati. Solo negli ultimi anni si è cominciato a vedere introdotti strumenti e tecnologie tipiche di una produzione innovativa in linea con la rivoluzione industriale che stiamo vivendo. Le innovazioni introdotte all'interno della catena produttiva come l'elettroformatura, l'uso delle macchine a controllo numerico e la prototipazione rapida, hanno portato ad un vero salto tecnologico che ha portato a numerosi benefici come:

- Maggiore precisione: tecnologie come la lavorazione CNC e la saldatura laser consentono di ottenere dettagli minuti con precisione millimetrica, elevando la qualità complessiva dei gioielli.
- Riduzione dei tempi di produzione: la prototipazione rapida e lo stampaggio a iniezione di metalli velocizzano il processo di sviluppo e fabbricazione, permettendo di trasformare rapidamente i progetti in prodotti finiti.
- Personalizzazione: l'impiego di tecnologie avanzate permette di realizzare gioielli su misura con design esclusivi, soddisfacendo in modo più efficace le esigenze specifiche dei clienti
- Efficienza nell'uso di materiali: tecniche avanzate come l'elettroformatura consentono un utilizzo più efficiente dei materiali preziosi, riducendo gli sprechi e ottimizzando i costi di produzione.
- Flessibilità del design: la prototipazione rapida e la lavorazione CNC offrono una maggiore libertà creativa, permettendo la realizzazione di forme e strutture complesse che sarebbero difficili o impossibili da ottenere con metodi tradizionali.
- Innovazione continua: L'integrazione di nuove tecnologie stimola l'innovazione continua, mantenendo l'industria al passo con le ultime tendenze tecnologiche e competitiva sul mercato globale.

Quindi l'intero settore orafo, nonostante le sue radicate origini nell'artigianato, si sta spostando sempre di più verso il digitale. Da oltre dieci anni, la prototipazione rapida ha rivoluzionato il settore orafo, diventando uno strumento essenziale per lo sviluppo di nuovi progetti. Grazie a questa tecnologia, i designer possono trasformare rapidamente le loro idee in prototipi fisici, consentendo una verifica immediata e la possibilità di apportare modifiche in tempi brevi. Negli

ultimi cinque anni, l'evoluzione tecnologica ha permesso di compiere un ulteriore passo avanti: l'AM non è più utilizzata solo per la prototipazione, ma è diventata una componente chiave per la produzione di massa. Intere linee di prodotti vengono ora realizzate tramite AM, consentendo una produzione più efficiente e flessibile. Questo approccio permette di creare gioielli con design complessi e personalizzati, mantenendo alti standard di qualità e rispondendo in modo rapido e preciso alle tendenze del mercato. L'adozione di AM ha così trasformato il settore orafo, rendendolo più dinamico e competitivo.

Nel presente capitolo, esploreremo in dettaglio le principali tecniche di AM utilizzate nel settore orafo, analizzando i benefici specifici che offrono in termini di design flessibile, personalizzazione estesa, efficienza dei materiali e innovazione continua (Ferreira *et al.*, 2012).

2.2 Tecniche di AM usate nel settore orafo

Negli ultimi anni, il settore orafo ha abbracciato le potenzialità rivoluzionarie delle tecniche di AM per trasformare radicalmente la produzione di gioielli. Le tecniche tradizionali, intrise di una lunga storia artigianale, stanno cedendo il passo a metodologie avanzate come la stereolitografia, la sinterizzazione laser selettiva, la fusione a letto di polveri e altre forme di AM. Queste tecnologie non solo consentono una precisione millimetrica e una qualità superiore, ma offrono anche nuove opportunità di design creativo e personalizzazione su misura. Tuttavia, esistono alcune lacune nella gestione dell'energia e dei rifiuti, insieme a una mancanza di preparazione degli artigiani nell'adozione graduale di processi CAD e nuove tecniche di lavoro. L'uso più ampio dell'AM offrirebbe l'opportunità di ridurre la produzione di rifiuti e i costi di riciclaggio, riducendo anche le ore lavorative per unità e il consumo energetico. Ciò consentirebbe inoltre ai designer di esplorare una maggiore libertà nella progettazione geometrica senza compromettere la fattibilità di ciascuna creazione. I vantaggi principali, oltre a quelli prettamente operativi introdotti nel paragrafo precedente, includono:

- Ottimizzazione della competitività;
- Studio di nuovi processi di fabbricazione;
- Minimizzazione del danno ambientale;
- Potenziamento del ruolo del designer come motore del cambiamento nei metodi di produzione;

- Introduzione di innovazioni concettuali e di forme libere;
- Sviluppo di un sistema online per il design personalizzato di gioielli, garantendo una relazione diretta tra il cliente e l'industria.

2.2.1 Materiali usati nel settore orafo

Nell'industria dei gioielli è necessario utilizzare metalli con elevate performance meccaniche come la duttilità e la resilienza dato che nella fase di produzione il materiale subisce deformazioni significative, e queste non devono essere permanenti e non devono portare a frattura il metallo. Oltre a ciò, è necessario che le leghe o materiali usati abbiano il punto di fusione a temperature relativamente basse in modo da facilitare il processo di fabbricazione e lavorazione dei gioielli. Per tali motivi il settore orafo si basa sulla produzione di gioielli in metalli preziosi in quanto questi ultimi si distinguono dagli altri per: lucentezza, rarità, duttilità, resilienza, punto di fusione relativamente basso e minore reattività rispetto agli altri materiali. Nonostante ciò, oggi molti marchi di gioielleria rinomati stanno sempre più proponendo gioielli in acciaio inossidabile per avvicinarsi a un mercato più ampio e aumentare la propria quota di mercato. Questo materiale si sta rivelando un valido sostituto dei metalli preziosi, grazie a diversi vantaggi:

- Costo: l'acciaio inossidabile offre un vantaggio significativo in termini di costo rispetto ai metalli preziosi. Questa caratteristica consente di realizzare gioielli di qualità elevata a prezzi più accessibili, rendendolo una scelta preferita per coloro che cercano prodotti di valore senza dover investire cifre elevate.
- Resistenza e durabilità: l'acciaio inossidabile si distingue per la sua resistenza eccezionale alla corrosione e alla normale usura. Questa robustezza lo rende particolarmente adatto per gioielli destinati a mantenere la loro bellezza e integrità nel tempo, senza necessità di cure speciali come quelle richieste dai metalli preziosi, che possono deteriorarsi o ossidarsi più facilmente.
- Variazioni di design: grazie alla sua flessibilità e capacità di essere lavorato in molteplici stili e design, l'acciaio inossidabile permette ai designer di creare gioielli che si adattano alle tendenze contemporanee e alle preferenze individuali dei consumatori, offrendo opzioni moderne, minimaliste o intricate.

- Ipoallergenicità: l'acciaio inossidabile è generalmente sicuro per chi soffre di sensibilità cutanee, essendo ipoallergenico rispetto ad altri metalli che possono contenere allergeni come il nichel, comune in molte leghe metalliche.
- Facilità di manutenzione: i gioielli in acciaio inossidabile sono noti per la loro facilità di cura e manutenzione. Non richiedono trattamenti speciali per preservare la loro brillantezza e colore, rendendoli pratici per l'uso quotidiano senza compromettere l'aspetto estetico nel tempo.
- Tendenze di mercato: negli ultimi anni, c'è stata una crescente preferenza per gioielli che offrono un ottimo rapporto qualità-prezzo e che si adattano a uno stile di vita dinamico. L'acciaio inossidabile soddisfa questa domanda, essendo una scelta popolare per coloro che cercano accessori durevoli e alla moda che possano essere indossati con comodità in molteplici occasioni.

Vista questa tendenza di mercato, le tecniche di PBF-LB/M si configurano come valide alleate per la produzione di gioielli in acciaio inossidabile, permettendo una maggiore flessibilità nel design e una riduzione dei costi di produzione (Diamanti *et al.*, 2010).

2.3 Uso della Stereolitografia nel settore orafo

La stereolitografia (SLA) rappresenta una tecnologia avanzata nel campo della produzione di gioielli, combinando precisione digitale con la capacità di creare forme complesse e dettagliate. In generale come tutti i processi di produzione per AM, parte con la progettazione del design che deriva dalle preferenze dei clienti o dalle indicazioni creative dell'azienda (Wannarumon and Bohez, 2004).

In media come descritto in figura 6, il processo di progettazione richiede dai sette ai dodici giorni. La produzione di un gioiello tramite fabbricazione indiretta con stereolitografia (SLA) segue un processo dettagliato:

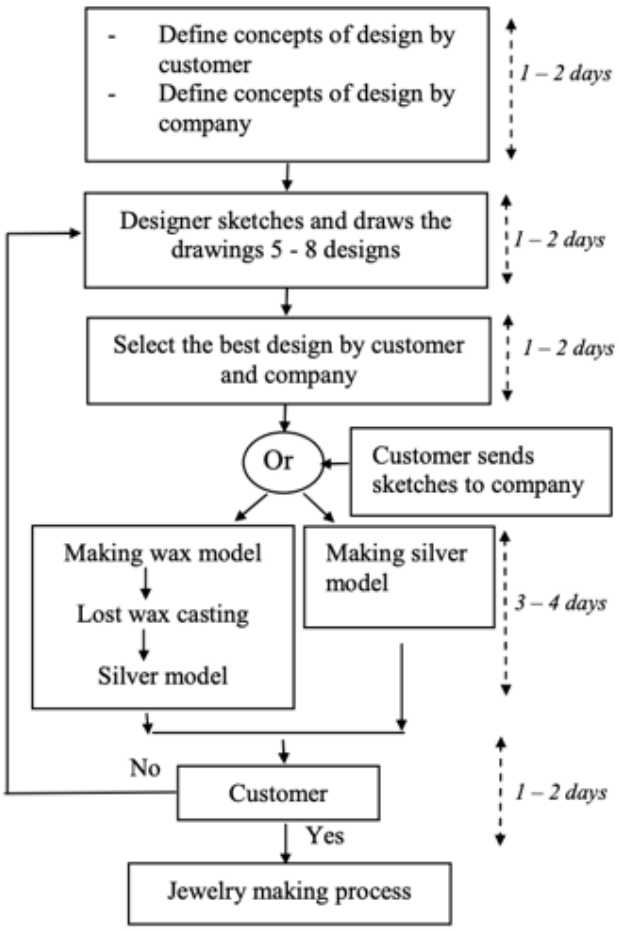

Figura 6:Processo di progettazione di un gioiello tramite SLA (ripreso da Wannarumon and Bohez, 2004)

Una volta progettato per produrre il gioiello tramite SLA è necessario creare un modello digitale dettagliato del gioiello utilizzando software CAD. Questo modello contiene tutte le specifiche geometriche e decorative del gioiello.

Successivamente, il modello digitale viene convertito in un file STL, necessario per la stampa 3D con tecnologia SLA.

Il file STL viene caricato nel software di controllo della stampante SLA. Utilizzando una resina fotosensibile liquida come materiale base, la stampante SLA costruisce il modello strato per strato. Un laser UV indurisce selettivamente la resina, seguendo le informazioni geometriche del file STL.

Una volta completata la stampa, il modello fisico del gioiello viene rimosso dalla piattaforma di lavoro della stampante.

Successivamente, il modello stampato è sottoposto a un processo di pulizia per rimuovere l'eccesso di resina non polimerizzata.

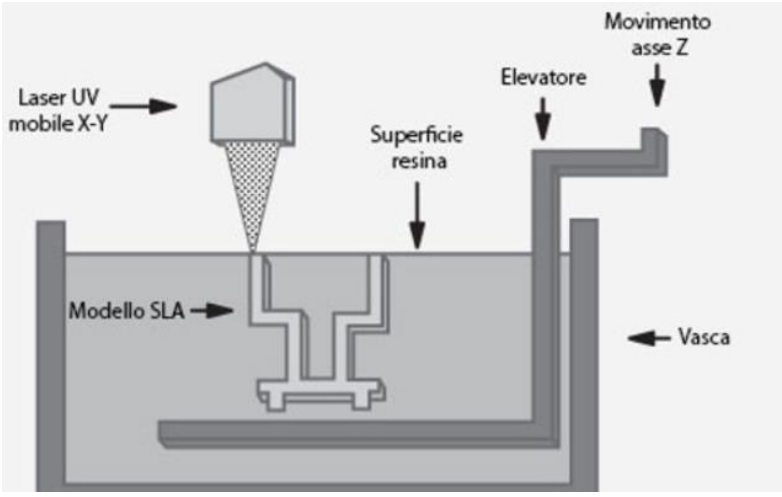

Figura 7: Schema SLA (ripresa da https://www.protolabs.com/it-it/risorse/suggerimenti-di-progettazione/la-prototipazione-rapida-mediante-stereolitografia/)

Eventuali strutture di supporto utilizzate durante la stampa per sostenere parti complesse del modello vengono rimosse manualmente.

Il modello stampato SLA subisce quindi una fase di post-cura, in cui viene esposto a una luce UV per completare la polimerizzazione della resina e migliorare la sua resistenza.

Dopo la post-cura, il modello può essere sottoposto a lavorazioni di finitura superficiale, come la levigatura e la lucidatura, per ottenere la superficie desiderata del gioiello.

Infine, il modello stampato SLA può essere utilizzato come master per la creazione di uno stampo in silicone. Questo stampo in silicone viene successivamente utilizzato per produrre modelli di cera, che servono come base per la fase finale di fusione a cera persa nella produzione di gioielli (Leong *et al.*, 1998).

2.4 Uso della tecnica di PBF-LB/M nel settore orafo

Nel panorama attuale dell'industria orafo, l'adozione della tecnologia PBF-LB/M rappresenta una rivoluzione significativa nei processi di produzione. Questo avanzato metodo consente la stampa diretta in 3D di gioielli utilizzando metalli preziosi, eliminando la necessità di creare modelli intermedi e conseguentemente riducendo notevolmente il tempo e i costi associati ai

materiali. L'PBF-LB/M non solo permette di realizzare pezzi altamente personalizzati e complessi con una precisione senza precedenti, ma apre anche nuove possibilità di design e geometrie che sarebbero difficilmente realizzabili con i metodi tradizionali.

I vantaggi della tecnologia PBF-LB/M nel settore orafo comprendono la capacità di produrre gioielli di alta qualità con superfici uniformi e dettagliate, particolarmente adatti per applicazioni che richiedono resistenza, durabilità ed estetica impeccabile. L'analisi microstrutturale dei materiali prodotti conferma la loro robustezza e qualità, spesso comparabile o superiore rispetto ai prodotti ottenuti con tecniche convenzionali.

Nonostante le sfide tecniche iniziali e gli investimenti necessari, l'PBF-LB/M promette di trasformare radicalmente la produzione orafo, rendendo accessibili pezzi unici e personalizzati anche per piccole gioiellerie e designer indipendenti. Ulteriori sviluppi nel monitoraggio e controllo in tempo reale dei processi di solidificazione e raffreddamento potrebbero contribuire a migliorare ulteriormente la qualità dei prodotti finiti, consolidando così l'PBF-LB/M come il futuro della produzione di gioielli in metalli preziosi (Korium *et al.*, 2021)

2.5 Confronto tra processi: produzione a cera persa con SLA e PBF-LB/M

Tradizionalmente, la gioielleria utilizza il processo di fusione a cera persa per la produzione dei propri manufatti. Questo metodo ha una lunga storia nel settore, caratterizzato dall'uso della cera per creare stampi che vengono successivamente riempiti con metalli fusi per formare gioielli intricati e dettagliati. Tuttavia, con l'avanzare della tecnologia, è emerso un innovativo approccio conosciuto come PBF-LB/M, che sta rivoluzionando il modo in cui vengono prodotti i gioielli.

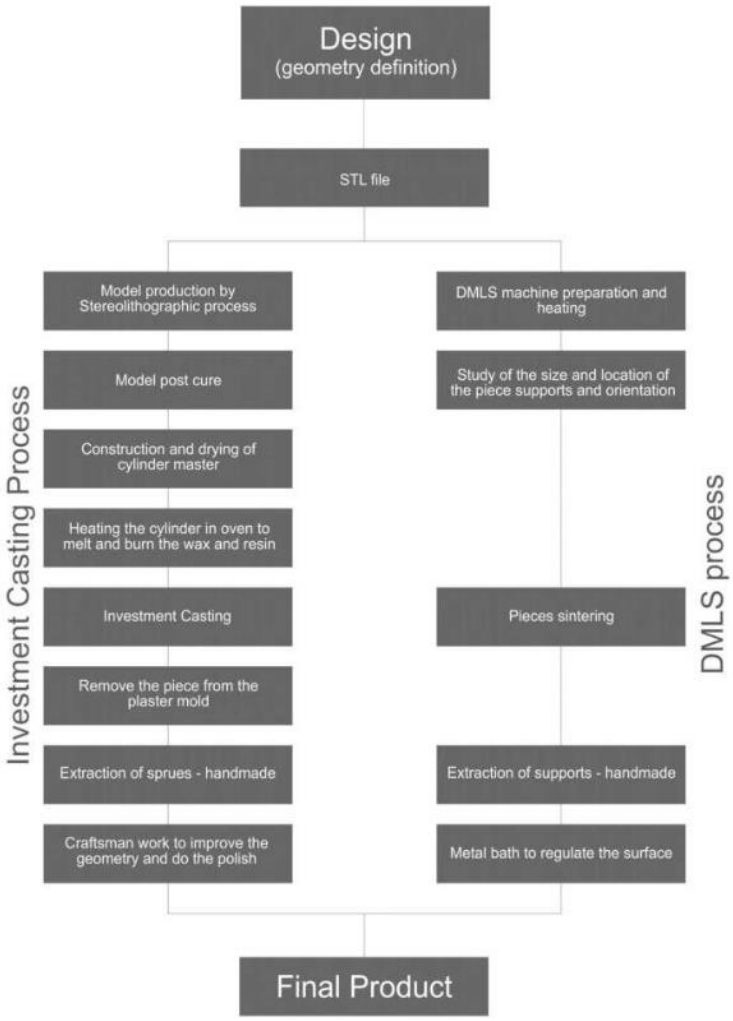

Figura 8:Confronto tra i metodi di produzione diretta e indiretta (ripresa da Ferreira et al.*, 2012)*

Dall'analisi fatta da Ferreira et al. Sono stati evidenziati diversi vantaggi e svantaggi per entrambe metodologie.

La stereolitografia è nota per la sua capacità di produrre dettagli precisi, rendendola particolarmente adatta per la realizzazione di gioielli intricati e complessi. Questa tecnologia consente ai designer di esplorare una vasta gamma di design grazie alla sua capacità di creare forme geometriche complesse, offrendo libertà creativa senza restrizioni significative. Tuttavia, è un processo che richiede diversi step: dalla produzione del modello in resina fotosensibile, alla creazione del relativo stampo necessario per il processo di cera persa. Questo metodo può ridurre i tempi di produzione rispetto ai tradizionali metodi di modellazione della cera manuale, ma aumentarli rispetto ad una produzione diretta tramite PBF-LB/M. Inoltre, è bene evidenziare che le resine utilizzate nella SLA potrebbero non essere adatte a sopportare le alte temperature necessarie per la fusione della cera persa, limitando l'uso dei modelli SLA per gioielli in metalli preziosi. In aggiunta, le resine fotosensibili possono essere costose, aumentando i costi complessivi di produzione.

La tecnologia PBF-LB/M consente, tramite l'utilizzo diretto di polveri metalliche, la produzione di gioielli anche in metalli preziosi, eliminando la necessità di creare un modello intermedio di cera. Questo metodo assicura gioielli estremamente robusti e resistenti, ideali per pezzi di alta qualità che richiedono durabilità e resistenza all'usura. Inoltre, la PBF-LB/M offre ampie possibilità di personalizzazione nei design dei gioielli, permettendo di rispondere in modo preciso alle specifiche esigenze dei clienti.

Tuttavia, la PBF-LB/M implica l'uso di attrezzature costose e richiede competenze specializzate per essere gestita correttamente, rendendola meno accessibile per le piccole gioiellerie o i designer indipendenti. Durante il processo di fusione laser, alcuni dettagli intricati dei modelli possono subire deformazioni o ritrarsi a causa delle alte temperature e delle dinamiche del processo, richiedendo un'attenzione particolare per ottenere risultati ottimali.

Inoltre, nel processo di produzione dei gioielli tramite PBF-LB/M si evidenziano alcune divergenze rispetto alle tecniche tradizionali utilizzate in gioielleria come:

- I materiali usati per il PBF-LB/M hanno caratteristiche diverse rispetto a quelli soliti usati tradizionalmente
- I due processi operano a temperature diverse a seconda dei materiali trattati. Le macchine per PBF-LB/M di solito utilizzano laser impostati per raggiungere

temperature elevate, mentre il processo tradizionale di fusione a cera persa raggiunge temperature più basse.

- Il processo di PBF-LB/M fonde piccole quantità di polvere, nonostante ciò, ne richiede elevate quantità per riempire la piattaforma di lavoro
- Il processo di PBF-LB/M con materiali preziosi richiede una pulizia prima e dopo il processo, cosa che non avviene con la fusione a cera persa

2.6 Uso della micro-PBF-LB/M come alternativa al PBF-LB/M tradizionale

Negli anni recenti, la tecnologia di fabbricazione additiva ha fatto passi da gigante, portando a sviluppi significativi nel settore della microproduzione. Tra queste innovazioni, il micro-PBF-LB/M è emerso come una tecnologia rivoluzionaria per la creazione di componenti metallici con dettagli e precisione senza precedenti. Questa tecnologia si distingue per la sua capacità di produrre microcomponenti con risoluzioni dell'ordine del micrometro, offrendo nuovi orizzonti per la realizzazione di strutture complesse e di alta precisione (Nagarajan, 2019).

La principale differenza tra il PBF-LB/M e il micro PBF-LB/M risiede nella scala e nella precisione della produzione. Mentre il PBF-LB/M è ottimizzato per la produzione di parti di dimensioni più medie e con tolleranze dal decimo al centesimo di millimetro in base all'ottimizzazione dei parametri di processo, il micro PBF-LB/M è progettato specificamente per lavorare a scale microscopiche, dove ogni dettaglio conta e le tolleranze sono critiche. Questa differenziazione comporta anche variazioni nei parametri di processo, come le dimensioni del fascio laser, lo spessore dello strato e la dimensione delle particelle di polvere, che sono adattati per rispondere alle esigenze uniche della micro-produzione.

Il PBF-LB/M offre vantaggi come la capacità di gestire materiali con diverse proprietà e la produzione di componenti con geometrie complesse e ottimizzazione del design. Tuttavia, le tolleranze dimensionali e la qualità superficiale possono essere limitate quando dalla scala macrometrica si scende a scale micrometriche. Qui entra in gioco il micro PBF-LB/M in grado di produrre componenti con dettagli intricati e tolleranze molto strette, che sono essenziali per applicazioni in cui la precisione micrometrica è fondamentale.

I laser pulsati sono preferiti nella tecnologia micro PBF-LB/M per la loro capacità di offrire un controllo preciso e mirato del trasferimento di energia al materiale. Questa modalità di uso del laser consente di gestire con maggiore accuratezza nella termica del processo di fusione,

riducendo così i difetti superficiali e migliorando la qualità del dettaglio. I laser pulsati possono emettere impulsi brevi ma ad alta intensità, permettendo una fusione del materiale più controllata e una finitura superficiale ottimale. Questa caratteristica è particolarmente vantaggiosa nella micro-produzione, dove l'aggregazione di polvere è un problema e la qualità dei dettagli microscopici è cruciale. Inoltre, i laser pulsati minimizzano il rischio di riscaldamento eccessivo, che potrebbe causare distorsioni nei particolari minuti, un aspetto essenziale quando si lavora con geometrie estremamente piccole e dettagliate.

Nel PBF-LB/M, invece, i laser continui sono generalmente preferiti per le loro caratteristiche di produzione costante e continua, che sono ideali per la produzione di componenti di dimensioni maggiori e con meno esigenze di dettaglio estremo. I laser continui offrono un flusso di energia stabile che facilita la fusione uniforme della polvere, contribuendo a una produzione più rapida ed efficiente per oggetti più grandi e meno dettagliati. Questo tipo di laser garantisce una lavorazione continua e uniforme, adatta a produzioni di massa e a componenti con requisiti meno severi in termini di precisione e dettaglio superficiale

Tutto questo è possibile riassumerlo all'interno della tabella 1:

Caratteristica	**Macro PBF-LB/M**	**Micro PBF-LB/M**
Dimensione del fascio laser	70-100 µm	1-10 µm
Spessore dello strato	Fino a 100 µm	1-10 µm
Dimensione della polvere	15-45 µm	0,3-10 µm
Risoluzione dettagli	Buona, adatta per componenti medi. Circa 100 µm	Eccellente, adatta a dettagli microscopici.Può raggiungere 1 µm
Qualità superficiale (rugosità)	7-8 µm	1-2 µm
Applicazioni tipiche	Componenti meccanici, parti strutturali, prototipi	Microcomponenti, dispositivi medici, orologeria

Tabella 1: riasunto dati ripresi da Nagarajan, 2019)

La tecnologia micro PBF-LB/M offre numerosi vantaggi specifici per il settore orafo, migliorando significativamente la qualità, l'efficienza e la capacità di innovazione nella produzione di gioielli. Permette di raggiungere una precisione estremamente elevata e di creare dettagli microscopici, essenziali per il settore orafo, dove i disegni intricati e le decorazioni fini sono fondamentali per la qualità del prodotto finale. La capacità di realizzare dettagli con una

risoluzione fino a 1 micrometro consente ai gioiellieri di produrre pezzi con una complessità e una finezza senza precedenti.

Grazie all'uso di strati molto sottili, inferiori a 10 micrometri, la micro PBF-LB/M produce superfici più lisce rispetto alla macro PBF-LB/M, riducendo significativamente la necessità di lavorazioni post-produzione come la lucidatura. Questo non solo aumenta l'efficienza produttiva ed i tempi di produzione, ma riduce anche i costi, permettendo ai gioiellieri di ottenere gioielli finiti di alta qualità con meno passaggi di rifinitura manuale. Oltre a ciò, facilita anche la personalizzazione dei gioielli, permettendo la creazione di pezzi unici su misura per ogni cliente. La capacità di realizzare dettagli microscopici specifici consente ai gioiellieri di offrire prodotti altamente personalizzati, rendendo ogni pezzo veramente unico e rispondendo alle esigenze individuali dei clienti.

Un altro vantaggio significativo della micro PBF-LB/M è l'ottimizzazione dell'uso dei materiali. Sia la micro PBF-LB/M che la macro PBF-LB/M permettono un uso efficiente della polvere, riducendo gli sprechi. Tuttavia, è importante considerare che, al diminuire della grandezza delle particelle di polvere, i costi aumentano, soprattutto quando si utilizzano polveri più fini e sferiche. Questo è particolarmente vantaggioso nel settore orafo, dove è fondamentale ottimizzare l'uso di metalli preziosi come l'oro e il platino, che sono molto costosi., riducendo gli sprechi. Questo è particolarmente vantaggioso nel settore orafo, dove i metalli preziosi come l'oro e il platino sono molto costosi.

3 Tecniche di finitura utilizzate nel settore orafo

Nel settore orafo, le tecniche di finitura rivestono un ruolo fondamentale nella trasformazione di semilavorati grezzi in gioielli di qualità superiore. Questi processi non solo migliorano l'estetica dei prodotti finiti, ma anche le loro funzionalità e durabilità, rendendoli desiderabili e duraturi nel tempo.

Le metodologie tradizionali, come lucidatura, incisione, smaltatura e placcatura, hanno a lungo costituito il nucleo delle operazioni di finitura. Tuttavia, l'avvento della AM ha portato a significativi cambiamenti nel panorama dell'industria orafo. Questa tecnologia innovativa ha rivoluzionato non solo la progettazione e la prototipazione dei gioielli, ma anche le tecniche di finitura impiegate.

Oggi, oltre ai metodi tradizionali, esistono anche altre metodologie per raggiungere gli stessi obiettivi, classificate in base al loro specifico meccanismo d'azione sulle superfici trattate. Questi includono l'abrasione meccanica, tecniche fisiche come laser, nonché approcci chimici ed elettrochimici. L'integrazione di queste nuove tecnologie con le tecniche tradizionali ha creato un panorama dinamico e in continua evoluzione nel settore orafo (Belkin, Kusmanov and Parfenov, 2020).

3.1 Tecniche di finitura meccaniche adottate in campo orafo

3.1.1 Lucidatura

La lucidatura è una fase critica nel processo di finitura dei gioielli, mirata a ridurre graffi e imperfezioni sulla superficie dei pezzi in metalli preziosi, ripristinandone l'aspetto originale. Questo processo si articola in tre fasi principali: levigatura, pulitura e lucidatura.

Nella fase di levigatura, vengono utilizzati abrasivi a grana grossa per rimuovere graffi profondi e difetti superficiali. Successivamente, la fase di pulitura impiega abrasivi più fini per perfezionare la superficie, eliminando le tracce lasciate dalla levigatura. Infine, la fase di lucidatura utilizza spazzole delicate in feltro, su cui viene applicata una pasta abrasiva fine, comunemente chiamata rossetto.

La scelta delle spazzole è fondamentale per garantire una finitura uniforme e priva di difetti. L'artigiano si avvale di spazzole di varie forme, come coni, cilindri e funghi, per raggiungere e lucidare efficacemente tutte le parti del gioiello, comprese le aree difficili da trattare. Attraverso

un'attenta applicazione della pasta abrasiva e un controllo preciso della velocità e della pressione, la lucidatura consente di ottenere superfici altamente riflettenti e prive di imperfezioni. Questa tecnica non solo migliora l'estetica del gioiello, ma ne aumenta anche la durata, proteggendo la superficie dai danni futuri.

La tecnologia moderna ha introdotto nuove attrezzature e materiali abrasivi che migliorano l'efficienza e la qualità della lucidatura. Macchine lucidatrici avanzate permettono un controllo più preciso dei parametri di lavorazione, riducendo il rischio di errori e migliorando la consistenza dei risultati. Grazie a questi sviluppi, i gioielli realizzati in metalli preziosi possono recuperare quasi completamente il loro aspetto originale, combinando l'abilità artigianale con le tecnologie più avanzate (Fletcher and Cooper, 2018).

Come con la maggior parte dei processi industriali, la lucidatura meccanica può certamente presentare dei suoi limiti:

- Possono esserci restrizioni sulla complessità delle superfici che possono essere lavorate.
- Gli abrasivi possono penetrare nella struttura metallica se la tecnologia non è utilizzata correttamente.
- Molti dei materiali e dei prodotti chimici tradizionalmente utilizzati nella lucidatura meccanica possono avere effetti dannosi sull'operatore e/o sull'ambiente se non gestiti correttamente.
- È una tecnologia che richiede tempo e risorse, spesso necessitando di interventi multipli da parte degli operatori, con cambi frequenti di mezzi e paste abrasive.
- Il controllo del processo può rivelarsi complesso, richiedendo un alto livello di esperienza, conoscenza e comprensione da parte dell'operatore.

3.1.2 Centrifugal Disc Finishing

Il *centrifugal disc finishing* (CF) è un processo di finitura di massa sviluppato per il trattamento superficiale di superfici metalliche, specialmente quelle in metalli preziosi nel settore orafo.

Questo processo avviene all’interno di una vasca aperta sia nella parte superiore che in quella inferiore, dove un disco rotante, separato dalle pareti della vasca, crea un effetto di levigatura abrasiva grazie alla sua elevata velocità di rotazione. Rispetto ai tradizionali sistemi di finitura come quello della vibro-finitura, il CF può essere fino a 20 volte più efficiente, grazie alla sua

capacità di creare un effetto di finitura intensivo attraverso il contatto diretto tra i gioielli e il mezzo abrasivo.

Il CF può essere eseguito come processo a secco, bagnato o in una combinazione dei due, e può utilizzare opzioni di singolo o multiplo tamburo. Durante il funzionamento, le forze centrifughe sollevano rapidamente la massa composta da pezzi di lavoro e mezzo abrasivo verso l'alto e verso l'esterno della vasca, per poi rallentarla grazie alle scanalature delle pareti della camera di lavorazione. Questo ciclo crea un movimento a vortice all'interno della camera, migliorando l'efficienza del processo di finitura.

Figura 9: Macchina per Centrifugal Disc Finishing (ripresa da Fletcher and Cooper, 2018)

3.1.3 *Drag Finishing*

Il processo di *drag finishing* (DF) è una variante del CF. I gioielli vengono montati su dei supporti speciali e trascinati in un movimento circolare ad alta velocità attraverso un contenitore riempito con mezzi di levigatura o lucidatura appropriati. Questo movimento crea elevate pressioni di contatto tra i pezzi e i mezzi, producendo risultati eccellenti in tempi molto brevi, come l'arrotondamento di alta precisione dei bordi o una finitura a specchio. La caratteristica distintiva del DF è che le parti sono montate individualmente sulle postazioni di lavoro del carosello, garantendo una finitura di massa senza impatti. Il DF è un processo di lucidatura esclusivamente a secco e non viene utilizzato per la sbavatura. A seconda della dimensione della macchina, il carosello può avere da 4 a 12 postazioni di lavoro, ognuna delle quali può contenere uno o più pezzi. A differenza dei sistemi convenzionali di finitura di massa, dove i pezzi sono liberi di muoversi nei mezzi, nel DF i pezzi sono fissati individualmente alle postazioni di lavoro, impedendo il contatto tra loro e quindi evitando graffi o danni alla superficie finita. Inoltre, il DF è generalmente più veloce del CF perché sia i mezzi che i pezzi ruotano ad alta velocità.

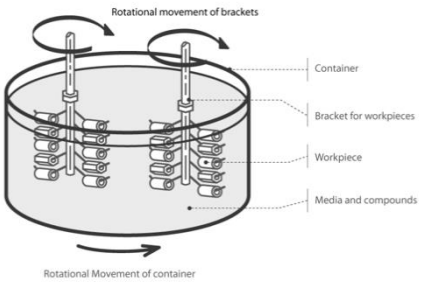

Figura 10: schema macchina per Drag Finishing (ripresa da Fletcher and Cooper, 2018)

3.1.4 *Stream Finishing*

Lo *stream finishing* (SF), noto anche come lucidatura a immersione, rappresenta un concetto relativamente nuovo e una variante del DF. Questo processo si caratterizza per tempi di lavorazione brevi e la possibilità di essere facilmente automatizzato, grazie all'uso di varianti del cambio utensile automatico presenti in molte tecnologie CNC. Nei test effettuati su gioielli in metalli preziosi, lo SF ha dimostrato un'eccellente affidabilità e ripetibilità, riuscendo a produrre una finitura di prima classe, quasi a specchio, nelle condizioni appropriate. Originariamente sviluppato per smussare le punte di trapano appena lavorate, questo processo è stato successivamente adattato con successo per la lucidatura dei gioielli nelle parti prodotte con AM.

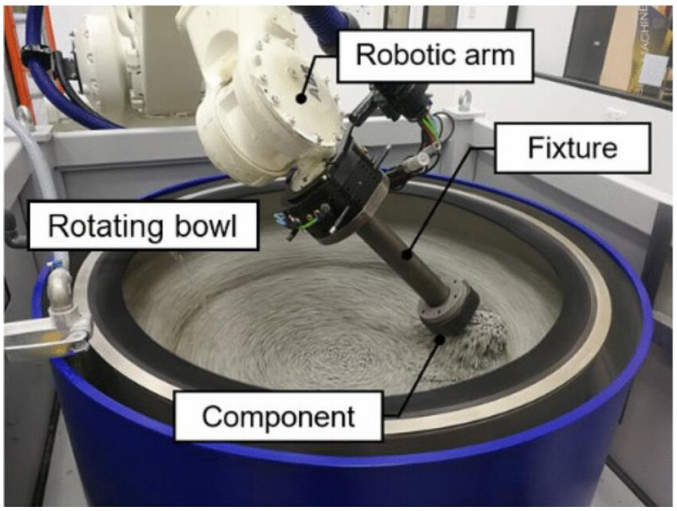

Figura 11: Tipico set-up per Stream Finishing (ripresa da Fletcher and Cooper, 2018)

3.1.5 *Tumbling* (o *Barreling*)

Il *tumbling* o *barreling* è una tecnologia consolidata ampiamente utilizzata nell'industria dei gioielli. In questo processo, i gioielli da lucidare vengono inseriti all'interno di un tamburo insieme a mezzi di lucidatura come proiettili di acciaio o aghi. Il tamburo viene quindi fatto ruotare, sfruttando la forza di gravità per far cadere i gioielli e i mezzi di lucidatura all'interno.

Il lato negativo di questo processo è che il pezzo in lavorazione viene effettivamente lucidato solo durante metà del ciclo di rotazione. Mentre il mezzo di lucidatura sta risalendo prontamente per ricadere sotto l'azione della gravità, il pezzo non viene strofinato o lucidato dal mezzo di lucidatura.

Dal punto di vista del processo, il *tumbling* o *barreling* è più accuratamente descritto come un metodo di brunimento piuttosto che come un processo di lucidatura che rimuove materiale metallico. Questo perché il principale risultato ottenuto è una superficie liscia e brillante, piuttosto che una rimozione significativa di materiale.

L'efficienza del sistema a tamburo nel rimuovere bave o lucidare dipende da diversi fattori, ad esempio la velocità di rotazione del tamburo; se questa risulta essere troppo elevata, le parti potrebbero diventare incontrollabili all'interno del tamburo, rischiando danni o compromettendo l'efficacia del processo. D'altro canto, una velocità troppo bassa prolunga il tempo necessario per completare il ciclo senza però danneggiare le parti.

Per migliorare le prestazioni a velocità più elevate, è necessario aggiungere più acqua e composti chimici al tamburo (se il processo è umido). Questo aiuta ad aumentare la coesione della massa di lavoro e a ridurre l'impatto dei mezzi di lucidatura sulle parti, evitando danni. Tuttavia, è importante trovare un equilibrio, poiché una rotazione troppo veloce può compromettere la capacità delle parti di scivolare liberamente all'interno del tamburo, riducendo l'effetto di levigatura desiderato.

Il successo del *tumbling* o *barreling* dipende dall'ottimizzazione di parametri cruciali come il diametro del tamburo, la velocità di rotazione, il carico delle parti e il livello dell'acqua nel tamburo. Questa ottimizzazione è fondamentale per garantire una finitura di qualità senza danneggiare le parti, assicurando allo stesso tempo un ciclo di lavorazione efficiente.

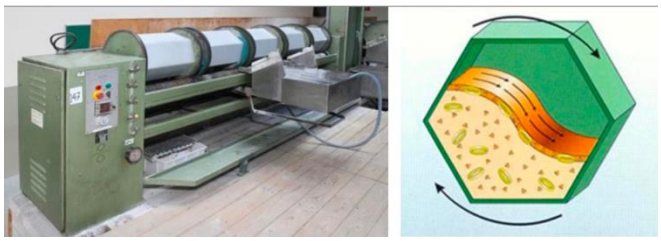

Figura 12: Macchina per Tumbling e schema illustrativo funzionamento (ripresa da Fletcher and Cooper, 2018)

3.1.6 Centrifugal Tubling

A volte conosciuto come *tumbling* planetario, questo è un processo di smussatura/lucidatura ad alta energia e alta velocità che utilizza un sistema di *barreling* planetario. Viene tipicamente utilizzato quando altre tecnologie più basilari non soddisfano i requisiti di velocità e finitura. A differenza del processo di *tumbling*, in questa tecnologia il pezzo in lavorazione è continuamente abraso e lavorato dal mezzo di lucidatura durante tutte le fasi del suo ciclo di lavorazione.

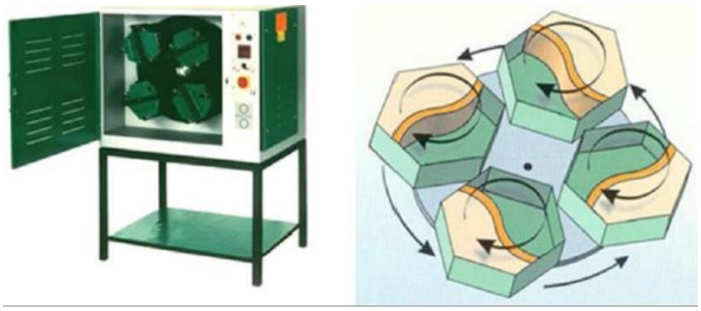

Figura 13: Macchina per Centrifugal Tumbling e schema illustrativo funzionamento (ripresa da Fletcher and Cooper, 2018)

3.1.7 Vibratory Bowl Finishers

I processi vibratori sono specificamente progettati per essere utilizzati quando sono richieste finiture di alta qualità e lucentezza. Il mezzo di lucidatura nella vasca è di solito in plastica o ceramica e contiene normalmente ossido di alluminio o altri abrasivi incorporati al suo interno. Mentre il mezzo gira nella macchina, il materiale della matrice si consuma lentamente, esponendo nuovi abrasivi a contatto con il corpo da lucidare. Allo stesso tempo, acqua e composto (sapone) circolano attraverso la macchina per mantenere pulita la superficie del mezzo. Se l'acqua non viene mantenuta pulita o non si utilizza il composto, la matrice abrasiva si ricopre di uno strato lucido e la sua capacità di lucidare diminuisce notevolmente. È quindi

importante pulire spesso l'acqua nella macchina e utilizzare il composto giusto per ottenere i migliori risultati.

Nel tamburo vibratore, il mezzo abrasivo si muove come un'unica entità, garantendo la sicurezza di gioielli estremamente fragili grazie all'assenza di azioni di strappo o di forze disomogenee che potrebbero causare piegamenti o deformazioni dei pezzi. Nonostante sembri che le particelle sfreghino i pezzi, studi hanno dimostrato che il principale meccanismo di rimozione del materiale nella finitura vibratoria è l'erosione generata dagli impatti relativamente normali delle particelle sui pezzi. Questi impatti avvengono alla stessa frequenza delle vibrazioni e con velocità di impatto inferiori a 1 m/s.

Figura 14: Differenti tipi di macchine per Vibratory Bowl Finishers(ripresa da Fletcher and Cooper, 2018)

3.1.8 Confronto tra tecniche di lucidatura meccaniche

Nella lavorazione orafa, le tecniche di finitura e lucidatura rivestono un ruolo fondamentale per assicurare la qualità e l'estetica del prodotto finale. In questo contesto, si distinguono due principali approcci: la finitura e lucidatura meccanica e quella manuale. Nel grafico 4 è possibile notare un confronto tra la finitura/lucidatura meccanica e quella manuale. I dati rappresentati indicano chiaramente che, a partire da un livello di avanzamento iniziale ("*start*"), i processi di preparazione manuale ("*hand prep*"), meccanica ("*mech*") e la rifinitura manuale ("*hand finish*") mostrano un progressivo aumento del progresso fino a raggiungere l'obiettivo prefissato. Il grafico evidenzia come il progresso sia più rapido nei passaggi meccanici rispetto a quelli manuali. Questo indica che l'uso di macchinari per la finitura e lucidatura non solo aumenta l'efficienza del processo, ma consente anche di raggiungere gli obiettivi in tempi più brevi rispetto alla lavorazione manuale.

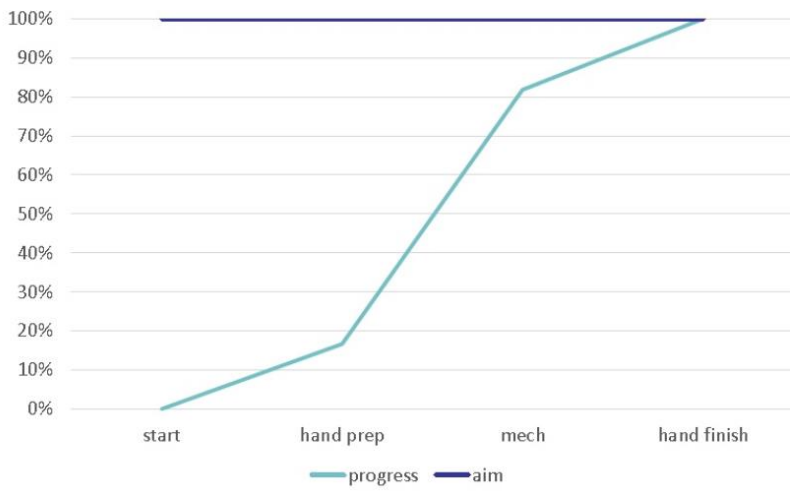

Grafico 4: Confronto tra finitura/lucidatura meccanica rispetto a quella manuale (ripreso da Fletcher and Cooper, 2018)

Nel grafico 5 sono confrontati i diversi tempi di processo delle varie tecniche di finitura meccanica utilizzate in campo orafo precedentemente descritte: vibrazione ("*vibro*"), *barrelling*, CF, DF, e SF. È evidente che la tecnica di vibrazione richiede il maggior tempo di processo, seguita dal *barrelling.* Le tecniche CF, DF, e SF, invece, mostrano tempi di processo significativamente inferiori.

Questi risultati suggeriscono che, mentre alcune tecniche meccaniche come la vibrazione e il *barrelling* sono più *time-intensive*, altre offrono una maggiore efficienza temporale. Questo è un fattore cruciale da considerare nella pianificazione del processo produttivo, poiché una riduzione dei tempi di finitura può portare a un aumento della produttività complessiva.

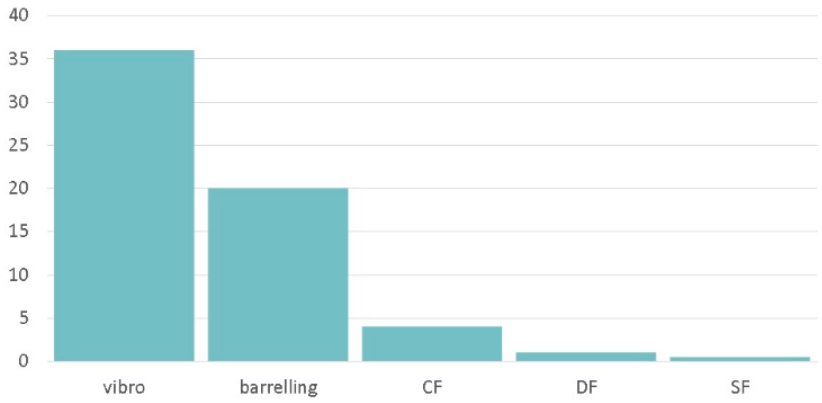

Grafico 5:Tempo di processo in ore per le differenti tecniche di finitura meccanica analizzate (ripreso da Fletcher and Cooper, 2018)

3.2 Tecniche di finitura innovative introdotte nel campo orafo

Nella lavorazione orafa, le tecniche di finitura e lucidatura sono cruciali per garantire la qualità e l'estetica del prodotto finale. Oltre ai metodi tradizionali meccanici e manuali, l'innovazione tecnologica ha introdotto una serie di tecniche di finitura all'avanguardia, alcune delle quali sono ancora in fase sperimentale. Queste nuove tecnologie promettono di migliorare l'efficienza e la precisione del processo di finitura, offrendo risultati superiori rispetto ai metodi tradizionali.

3.2.1 Lucidatura Laser

La lucidatura laser rappresenta una tecnica innovativa nel campo della manifattura additiva per il settore orafo, risulta essere un'ottima tecnologia per ottimizzare l'estetica e la funzionalità dei gioielli. Questo processo sfrutta un raggio laser che fonde il metallo sulla superficie del pezzo, facendo fluire il materiale dalle creste alle valli grazie alla tensione superficiale nella fase liquida. Il risultato non è la rimozione del materiale, ma la sua redistribuzione, ottenendo così una superficie liscia e brillante.

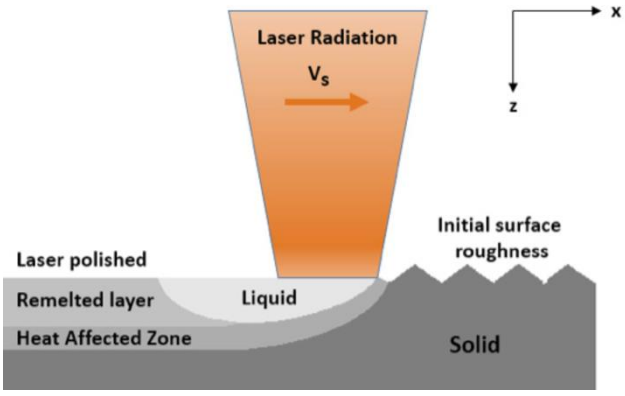

Grafico 6:Principio base della lucidatura tramite raggi laser (ripreso da Fletcher and Cooper, 2018)

L'utilizzo di laser a impulsi nanosecondi permette di regolare i parametri di lavorazione per ottenere superfici lucidate con caratteristiche diverse. Tecniche analitiche avanzate, come la microscopia elettronica a scansione (SEM), la diffrazione a raggi X (XRD) e la microscopia laser confocale, sono impiegate per valutare la composizione delle fasi, i livelli di ossidazione e la rugosità superficiale. Studi recenti hanno dimostrato che la lucidatura laser subacquea assistita da ultrasuoni (UWP) riduce significativamente la rugosità superficiale rispetto ad altri metodi, migliorando così la qualità e le proprietà meccaniche del gioiello.

Questa tecnologia è particolarmente vantaggiosa nel contesto orafo, dove è necessario lucidare superfici intricate e difficili da raggiungere. Ad esempio, l'uso di attrezzature di saldatura laser a bassa potenza e frequenza di impulso può mantenere intatta la struttura del pezzo, conferendo al contempo una finitura lucida e brillante. L'integrazione della lucidatura laser con le tecniche tradizionali di finitura offre nuove possibilità creative, migliorando l'efficienza produttiva, riducendo i costi e i tempi di lavorazione, e garantendo una qualità superiore dei gioielli finali (Li *et al.*, 2023).

È bene evidenziare che nel settore orafo risulta essere essenziale preservare l'integrità dei dettagli del design dei gioielli durante la fase di lucidatura. La lucidatura a laser, se non gestita con attenzione, può compromettere la definizione dei dettagli fini e delle superfici incise, soprattutto su materiali delicati come l'oro e l'argento.

L'efficienza e la ripetibilità della lucidatura a laser dipendono dalla corretta programmazione dei parametri del laser e dalla capacità degli operatori di adattare il processo alle specifiche esigenze del materiale e del design.

Un'altra sfida nel settore orafo è rappresentata dalla varietà dei materiali trattati e delle loro caratteristiche. Mentre alcuni metalli possono beneficiare della lucidatura a laser per migliorare la loro brillantezza e resistenza alla corrosione, altri possono richiedere trattamenti preliminari o tecnologie alternative per ottenere risultati ottimali.

Inoltre, non si può trascurare l'aspetto economico e della sicurezza: l'acquisto di apparecchiature laser e la necessità di formazione specializzata possono costituire un onere significativo per le aziende orafo, soprattutto per quelle di dimensioni ridotte e medie.

3.2.2 Electropolishing

L'elettrolucidatura è un processo elettrochimico utilizzato per rimuovere materiale da superfici metalliche mediante una corrente elettrica esterna. Questo metodo è impiegato per lucidare, passivare e smussare le superfici, migliorando la loro qualità estetica e funzionale. Durante il processo, il pezzo da lavorare, che funge da anodo, viene immerso in un elettrolita appositamente formulato per il metallo da lucidare. La corrente elettrica applicata rimuove il materiale dall'anodo, riducendo la rugosità superficiale e producendo una superficie altamente riflettente e priva di contaminazioni.

L'elettrolucidatura è l'opposto della galvanizzazione e si realizza in una cella elettrolitica composta da un elettrolita e due elettrodi (un catodo e un anodo). L'elettrolita è solitamente una soluzione acquosa o un altro solvente contenente ioni metallici. Quando viene applicata una tensione esterna agli elettrodi, l'elettrolita trasporta gli ioni metallici dall'anodo al catodo, dove avvengono reazioni di ossidazione e riduzione.

Sebbene l'elettrolucidatura dei metalli sia praticata da quasi cento anni, la sua applicazione nel settore orafo è stata limitata a causa di problemi di sicurezza e controllo. Numerosi brevetti descrivono l'elettrolucidatura dell'argento, che spesso richiede l'uso di cianuri e/o tiocianati e un rigoroso monitoraggio della chimica dell'elettrolita per ottenere risultati ottimali.

Una delle principali limitazioni dell'elettrolucidatura convenzionale è la rimozione irregolare del metallo. La corrente tende a rimuovere più metallo dalle sporgenze e dagli spigoli vivi, dove la densità di corrente è maggiore, rispetto alle aree piatte e alle valli. Questo può essere problematico per gli articoli di gioielleria, poiché gli spigoli e gli angoli possono diventare smussati, alterando il design originale del pezzo. Questo fenomeno si verifica anche nella galvanizzazione, dove il metallo si deposita maggiormente nelle aree elevate e sugli spigoli vivi.

Nell'elettrolucidatura dell'argento sterling, l'oggetto da lucidare è posizionato come anodo nella cella elettrolitica. Gli ioni di argento e rame vengono rimossi dall'anodo, passando attraverso l'elettrolita e depositandosi infine sul catodo come ossidi di argento e rame.

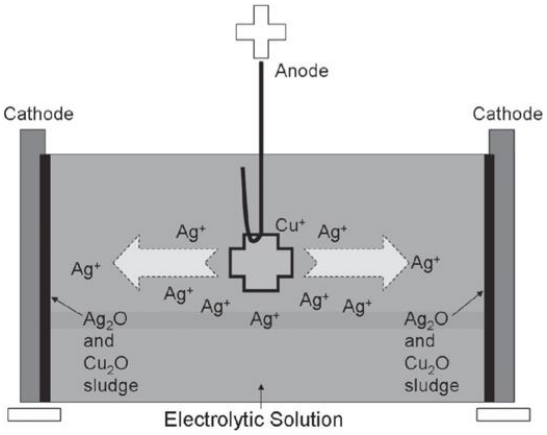

Grafico 7:Elettrolucidatura dell'argento (ripreso da Fletcher and Cooper, 2018)

In risposta alla crescente domanda di processi di finitura sicuri ed efficienti nel settore orafo, sono stati sviluppati numerosi brevetti per macchine per elettrolucidatura, incluse quelle di dimensioni ridotte adatte all'uso in laboratori.

Nel contesto dell'elettrolucidatura, è importante considerare che, nonostante i suoi benefici, spesso non è sufficiente come unico processo di finitura superficiale. Questo perché l'elettrolucidatura presenta alcune limitazioni e svantaggi che possono richiedere l'integrazione con processi meccanici preliminari.

Uno dei principali svantaggi dell'elettrolucidatura è la sua tendenza a rimuovere materiali in modo irregolare. Questo fenomeno è accentuato sulle sporgenze e sugli spigoli vivi, dove la densità di corrente è più alta, portando a un appiattimento delle superfici e a una perdita di dettagli dell'oggetto originale. Inoltre, le superfici con geometrie complesse o aree di difficile accesso possono non ottenere un livello uniforme di lucidatura, compromettendo l'estetica finale del pezzo.

Un altro aspetto da considerare è la necessità di un controllo rigoroso della chimica dell'elettrolita. I processi di elettrolucidatura richiedono l'uso di soluzioni chimiche specifiche per il tipo di metallo trattato, con una composizione e una temperatura dell'elettrolita che devono essere monitorate attentamente per garantire risultati ottimali. Questo può aumentare la complessità operativa e i costi associati alla gestione delle sostanze chimiche.

Per superare queste limitazioni, è comune integrare l'elettrolucidatura con processi meccanici preliminari, come la smerigliatura o la levigatura. Questi processi meccanici preparano la superficie rimuovendo le asperità più grossolane e uniformando la rugosità iniziale del materiale. Pertanto, nel settore orafo, l'elettrolucidatura è spesso integrata con altri metodi di finitura per superare le limitazioni intrinseche del processo e garantire che i gioielli finiti soddisfino gli standard di qualità estetica e funzionale richiesti dal mercato. Questa combinazione di tecniche permette di ottenere superfici lucide, durevoli e di alta precisione, mantenendo allo stesso tempo l'integrità e il design distintivo dei gioielli artigianali (Del Curto *et al.*, 2014) (Swain and Anopol Ltd, 2010).

3.2.3 Electro-Mechanical Finishing

La finitura elettromeccanica (EMF) è nata per rispondere alla necessità di sviluppare un metodo di finitura superficiale che fosse efficace, controllabile e capace di produrre risultati di alta qualità su materiali delicati come i metalli preziosi e le leghe. Le tecniche tradizionali di

finitura, come la lucidatura manuale o meccanica, spesso comportano l'uso di abrasivi che possono danneggiare o alterare la superficie dei materiali più morbidi o complessi.

Con l'introduzione della finitura elettromeccanica, è stato possibile creare un processo che combinasse l'elettrolisi con l'azione meccanica di particelle plastiche non abrasive. Questo approccio consente di controllare con precisione la rimozione del materiale e di ottenere superfici molto lisce e uniformi senza compromettere l'integrità del pezzo lavorato. Inoltre, la capacità di regolare la tensione e altri parametri del processo permette di adattare la finitura alle specifiche esigenze del materiale e del risultato desiderato.

Il processo inizia con la preparazione dei pezzi da lavorare, che vengono sospesi su supporti di ganci di titanio all'interno del sistema di finitura.

Questi supporti, insieme ai pezzi da lavorare, vengono immersi in una soluzione elettrolitica specifica. Questa soluzione è generalmente composta da acqua deionizzata, olio minerale e un tensioattivo che stabilizza l'emulsione.

All'interno della soluzione elettrolitica si trovano anche particelle di plastica non abrasive a forma di lenticchia, di solito fatte di PVC, con dimensioni di circa 3 mm di diametro e 1,6 mm di altezza.

La macchina è dotata di un sistema di regolazione della tensione che controlla la corrente elettrica applicata durante il processo. Questa tensione può essere variata da un massimo di 10 volt (il livello più aggressivo) a valori inferiori, fino a 1 volt alla volta, per rallentare il processo e migliorare la qualità superficiale.

Quando la corrente elettrica passa attraverso la soluzione elettrolitica, si attivano reazioni chimiche che formano uno strato gelatinoso sulla superficie del pezzo metallico. Questo strato gelatinoso aiuta a proteggere il pezzo dalla degradazione eccessiva del metallo durante il processo.

Durante il movimento dei pezzi sospesi all'interno della soluzione elettrolitica, il media plastico non abrasivo disturba lo strato gelatinoso in modo casuale. Questo disturbo permette alla superficie metallica di essere esposta alla soluzione elettrolitica, facilitando la rimozione controllata del metallo.

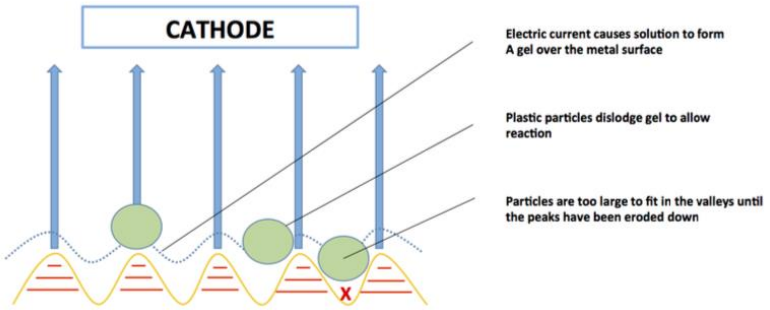

Grafico 8: principio di funzionamento dell'EMF (ripreso da Fletcher and Cooper, 2018)

DLYTE Inc. ha consolidato la sua leadership nel settore della finitura elettromeccanica (EMF) grazie alla sua capacità innovativa e alla protezione brevettuale delle sue soluzioni avanzate. Il processo di *electro-mechanical finishing* (EMF) implementato dalle macchine DLYTE rappresenta un esempio chiaro di questa innovazione tecnologica.

La capacità delle macchine DLYTE di controllare con precisione la tensione e la corrente elettrolitica è fondamentale per garantire risultati ottimali senza compromettere la qualità del pezzo lavorato. Questo processo è particolarmente vantaggioso per applicazioni che richiedono finiture esteticamente impeccabili e funzionalmente superiori, come quelle nei settori della gioielleria di lusso, dell'orologeria di precisione e delle protesi dentali (NARCIS GUASCH PIRIZ, GAREL BUÑUEL, and TORDERA XANDRI, 2019).

La finitura elettromeccanica (EMF) offre numerosi vantaggi tecnologici nel trattamento superficiale dei metalli, ma presenta anche alcuni svantaggi da considerare.

Uno dei principali svantaggi è rappresentato dai costi iniziali elevati associati all'acquisto e all'installazione delle attrezzature necessarie per eseguire il processo EMF. Questo può rappresentare una sfida significativa per le piccole e medie imprese o i laboratori con risorse finanziarie limitate.

Inoltre, il processo EMF richiede una conoscenza tecnica dettagliata e una formazione specifica per essere eseguito correttamente. Gli operatori devono essere capaci di gestire l'equipaggiamento complesso, le soluzioni elettrolitiche e controllare le variabili del processo, il che può implicare una curva di apprendimento pronunciata per chi è meno esperto.

La manutenzione delle macchine EMF è un altro aspetto critico. Queste richiedono pulizia regolare delle parti, sostituzione dei media plastici non abrasivi e gestione delle soluzioni

elettrolitiche, il che comporta tempo e risorse aggiuntive per mantenerle in condizioni ottimali di funzionamento.

Dal punto di vista ambientale, le soluzioni elettrolitiche utilizzate nel processo EMF possono contenere sostanze chimiche nocive se non gestite correttamente. È essenziale un adeguato smaltimento dei rifiuti e il rispetto delle normative ambientali per minimizzare l'impatto sulla salute e sull'ambiente.

Non tutti i materiali metallici possono essere trattati con la stessa efficacia utilizzando la finitura elettromeccanica. Materiali particolarmente duri o con caratteristiche superficiali specifiche potrebbero non ottenere risultati soddisfacenti o richiedere approcci di preparazione della superficie più complessi, limitando l'applicabilità del processo EMF.

Infine, il tempo di processo necessario per completare la finitura EMF può essere più lungo rispetto ai metodi di finitura tradizionali, a seconda della complessità del pezzo e delle specifiche del lavoro. Questo può influenzare i tempi di consegna e la capacità produttiva globale dell'azienda.

3.2.4 *Plasma Electrolytic Polishing* (PEP)

Oltre alle tecniche tradizionali, come l'elettrolucidatura convenzionale che utilizza elettroliti liquidi, oggi sono state sviluppate anche tecniche di elettrolucidatura avanzate, tra cui l'elettrolucidatura al plasma (PEP).

L'elettrolucidatura al plasma è una delle innovazioni più significative in questo campo. Questa si basa sul principio fisico secondo il quale la materia transita tra i vari stati tramite l’applicazione di energia. Il plasma risulta essere il quarto stato della materia quando, grazie ad un’applicazione di energia ad un gas questo si ionizza e si trasforma in plasma.

Utilizzando un ambiente gassoso ionizzato anziché un elettrolita liquido, questo metodo consente un controllo più preciso e uniforme sulla rimozione del materiale dalla superficie metallica. Durante l'elettrolucidatura al plasma (PEP), il pezzo di lavoro è polarizzato anodicamente in un ambiente dove è presente un elettrolita. L'alta densità di corrente applicata all'elettrodo attivo provoca una notevole generazione di calore. Questo calore, a sua volta, crea uno strato di gas isolante tra il pezzo di lavoro e l'elettrolita. Questo strato di gas è cruciale

perché interrompe il flusso diretto di corrente elettrica e, una volta ionizzato, facilita la formazione di scariche al plasma o filamenti.

Le scariche al plasma sono intense scariche di corrente elettrica che si formano nel gas ionizzato tra il pezzo di lavoro e l'elettrolita. Queste scariche sono in grado di rimuovere materiali dalla superficie del pezzo di lavoro polarizzato anodicamente. Durante questo processo, i picchi superficiali vengono gradualmente ridotti e la superficie del materiale viene notevolmente migliorata, risultando più liscia e brillante.

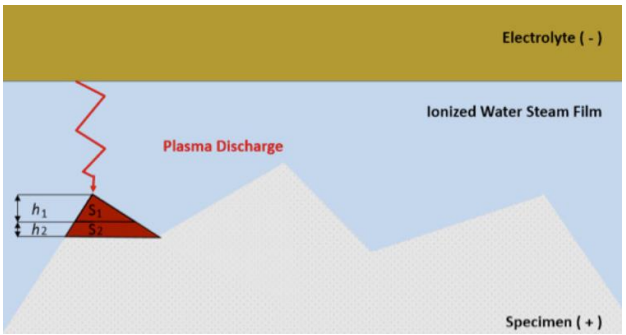

Grafico 9: Schema PEP (ripreso da Fletcher and Cooper, 2018)

I vantaggi dell'elettrolucidatura al plasma includono la capacità di trattare una vasta gamma di materiali metallici con precisione, efficienza e minimo impatto ambientale. Questa tecnologia non solo migliora la finitura superficiale, ma anche riduce i tempi di lavorazione e l'uso di sostanze chimiche aggressive, contribuendo a un ambiente di lavoro più sicuro e sostenibile.

Le macchine per elettrolucidatura al plasma, come quelle sviluppate con tecnologia PEP, rappresentano un passo avanti nel settore orafo, offrendo soluzioni avanzate per la produzione di gioielli e componenti metallici di alta qualità. Queste innovazioni non solo soddisfano le esigenze di finitura estetica e funzionale, ma anche le crescenti aspettative di efficienza e sostenibilità nel processo produttivo.

Nonostante ciò, anche questa tecnologia porta con sé diverse sfide e considerazioni da tener presente. Il primo aspetto da considerare è il costo iniziale elevato associato all'adozione di questa tecnologia. L'acquisto delle apparecchiature necessarie per il PEP, insieme alle attrezzature di laboratorio e di sicurezza correlate, può rappresentare un investimento significativo per le aziende, il che potrebbe non essere adeguato al settore orafo, dove prevalgono soprattutto micro e piccole imprese.

Dal punto di vista della sicurezza, l'uso di tensioni elevate e l'elettrolisi comporta rischi significativi che richiedono una gestione attenta. È fondamentale adottare misure precauzionali rigorose per proteggere gli operatori e assicurare un ambiente di lavoro sicuro. Tutto questo è dato dal fatto che il processo di PEP presenta una notevole complessità operativa. È cruciale comprendere e ottimizzare diversi parametri critici come la composizione dell'elettrolita, i livelli di tensione e altri aspetti del processo per garantire risultati ottimali. Questo implica la necessità di una formazione specializzata e una scrupolosa gestione delle condizioni sperimentali.

Adattare il PEP a diversi materiali e geometrie tipiche dell'AM può essere una sfida ulteriore. È necessario modificare le condizioni di processo in base alle caratteristiche specifiche del materiale e della geometria del pezzo da lavorare.

Infine, nonostante i progressi significativi, vi è ancora una scarsità di ricerca scientifica approfondita e accessibile sul PEP, specialmente per quanto riguarda l'applicazione su materiali diversi da acciaio inossidabile e titanio.

4 Progettazione del componente

4.1 Scelta del componente

Per approfondire e dimostrare quanto analizzato nei capitoli precedenti, è stata pianificata una fase sperimentale che prevede l'implementazione di una fase di progettazione e realizzazione del componente utilizzando la tecnologia PBF. La scelta del settore orafo come campo di applicazione è stata motivata dalle esigenze di precisione e dettaglio che caratterizzano questo ambito, rendendolo un banco di prova ideale per testare le capacità di questa nuova tecnologia produttiva.

La scelta di un gioiello come componente da realizzare non è stata casuale. Il settore orafo richiede un'estrema precisione e la capacità di riprodurre dettagli complessi su scala ridotta. Queste caratteristiche rendono il gioiello un candidato perfetto per testare i limiti e le potenzialità della tecnologia macro PBF-LB/M. Per spingere ulteriormente i limiti della tecnologia, il componente doveva presentare alcune caratteristiche specifiche:

-Parti mobili: una delle sfide principali nella progettazione del gioiello era l'inclusione di parti mobili. Questo richiede una precisione elevatissima nella produzione per garantire che gli elementi mobili possano muoversi liberamente senza compromettere l'integrità strutturale del componente. La tecnologia è stata messa alla prova per verificare se può raggiungere le tolleranze necessarie per queste parti.

-Spigoli pronunciati: il gioiello è stato progettato con spigoli di varia intensità, dai più arrotondati ai più netti. Questo è stato fatto per valutare la capacità della tecnologia di riprodurre fedelmente dettagli geometrici diversi. La riproduzione precisa degli spigoli è cruciale nel settore orafo, dove ogni dettaglio contribuisce all'estetica e al valore del prodotto finale.

-Geometria complessa con dettagli articolati: il design del gioiello presenta una geometria molto complessa con dettagli minuti. Questo livello di complessità ha permesso di mettere alla prova la tecnologia nella gestione di forme intricate e dettagli minuziosi, garantendo al contempo la qualità e l'estetica del prodotto finale. Inoltre, la dimensione ridotta del gioiello ha rappresentato un'ulteriore sfida, testando la precisione e la risoluzione della tecnologia di produzione.

Il processo di progettazione del gioiello ha seguito diverse fasi, a partire da una fase cruciale di ricerca e ispirazione, che ha costituito il fondamento per lo sviluppo del design finale. Questa

fase è stata determinante per garantire che il design fosse all'avanguardia, sfruttando le potenzialità della tecnologia PBF-LB/M.

La fase di ricerca e ispirazione ha avuto come obiettivo principale l'acquisizione di conoscenze approfondite sui design e sulle tecniche di lavorazione dei gioielli attraverso una consultazione mirata di cataloghi online di prestigiosi marchi di moda e gioielleria. Questa ricerca è stata essenziale per identificare tendenze, stili e dettagli tecnici rilevanti nel settore orafo.

In particolare, sono stati analizzati i cataloghi digitali dei marchi leader nel settore della gioielleria per ottenere una panoramica delle soluzioni progettuali più avanzate.

Figura 15:Anello da cui è tratto il design dell'anello di test

Come concept iniziale, è stato scelto un anello rappresentativo di un noto marchio di gioielleria, noto per la sua complessità e i dettagli distintivi che caratterizzano il design. Questo pezzo è stato selezionato per la sua rilevanza e per le sue caratteristiche uniche, che lo rendono un candidato ideale per testare le capacità della tecnologia PBF-LB/M. L'anello, con le sue forme audaci e la struttura complessa, offre una sfida significativa per la produzione additiva, permettendo di esplorare come la tecnologia può gestire geometrie intricate e dettagli fini.

Successivamente, il design dell'anello è stato riprogettato per soddisfare le specifiche esigenze della tecnologia di produzione additiva. Questo processo di riprogettazione ha comportato l'adattamento delle geometrie e dei dettagli del pezzo originale per ottimizzare la produzione e garantire che il componente finale rispecchiasse le richieste di precisione e qualità imposte dalla tecnologia PBF. La riprogettazione ha incluso modifiche per migliorare la compatibilità con il processo di stampa additiva e assicurare la funzionalità e l'estetica del pezzo finale

Questa scelta iniziale e il successivo processo di riprogettazione hanno permesso di sviluppare un design che sfrutta appieno le potenzialità della tecnologia PBF-LB/M, rispondendo al contempo alle sfide tecniche ed estetiche del settore orafo.

4.2 Riprogettazione

Il processo è iniziato con la creazione del modello 3D dell'anello tramite il software CAD parametrico *SolidWorks*. Basandosi su un design di gioielleria esistente, sono state seguite queste fasi:

-Creazione della geometria

-Introduzione di nuove complessità: Per sfruttare appieno le capacità della macchina PBF-LB/M e testare la sua precisione, sono state introdotte parti mobili nel design.

-Ottimizzazione per PBF: Il design è stato ottimizzato per garantire la compatibilità con la tecnologia di produzione scelta. Questo ha incluso la progettazione di supporti temporanei e la definizione di spazi per la rimozione della polvere residua.

Il gioiello è composto da due elementi principali la ghiera dell'anello e i perni con punte coniche.

4.2.1 Ghiera

La ghiera dell'anello rappresenta il cuore del design. Progettata come un corpo cilindrico robusto, la ghiera funge da base per i perni mobili e offre una struttura solida e stabile. È stata concepita con un profilo ergonomico per garantire il massimo comfort all'indossatore, assicurando al contempo una vestibilità sicura e stabile.

Il design della ghiera include una serie di fori cilindrici che attraversano la sua struttura in direzione verticale. Questi fori sono progettati per ospitare i perni mobili e sono distribuiti lungo il perimetro della ghiera per garantire un equilibrio ottimale tra estetica e funzionalità. Ogni foro è stato modellato con tolleranze precise per permettere ai perni di muoversi fluidamente all'interno senza causare interferenze. La progettazione interna dei fori è stata attentamente eseguita per assicurare un movimento privo di attriti, facilitando un'operazione rotatoria agevole e senza problemi.

Per garantire la compatibilità e l'efficacia del design, sono state effettuate simulazioni dettagliate in *SolidWorks*. Queste simulazioni hanno permesso di testare le tolleranze dei fori

rispetto ai perni mobili, ottimizzando le dimensioni e le tolleranze per assicurare che non ci fossero interferenze tra le parti. Questo processo di ottimizzazione è stato essenziale per assicurare che il movimento dei perni fosse fluido e senza attriti, evitando qualsiasi problema prima della produzione finale.

La parte frontale della ghiera è arricchita da motivi floreali e geometrie in rilievo, che conferiscono al design un aspetto sofisticato e decorativo. I motivi floreali sono stati modellati con grande attenzione ai dettagli per creare un effetto tridimensionale che arricchisce l'estetica dell'anello e contribuisce a una sensazione tattile di lusso. È stata scelta una combinazione di geometrie differenti non solo per motivi estetici, ma anche per testare l'efficacia e la precisione della tecnologia PBF-LB/M. I motivi floreali, con il loro rilievo più contenuto, offrono una valutazione della precisione nella riproduzione di dettagli meno pronunciati, mentre le geometrie con spigoli più netti permettono di verificare la capacità della tecnologia di gestire forme complesse e dettagliati. Questo approccio ha garantito che il design fosse esteticamente ricco e funzionalmente solido, testando al contempo la capacità della tecnologia di produrre dettagli complessi con alta definizione.

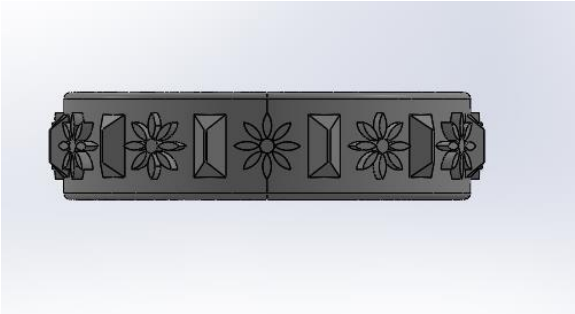

Figura 16: vista frontale ghiera riprogettata su SolidWorks

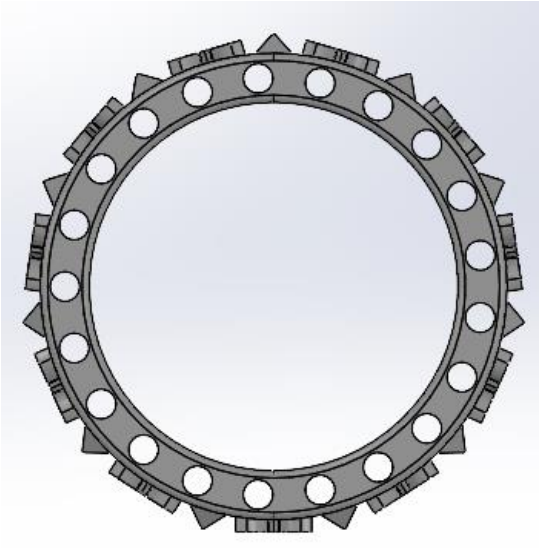

Figura 17: vista dall'alto ghiera progettata su SolidWorks

4.2.2 Perni cilindrici con basi coniche

I perni a basi coniche sono uno degli elementi distintivi e funzionali dell'anello, progettati per ottimizzare sia l'estetica che la performance del gioiello. Questi perni sono progettati per muoversi all'interno dei fori cilindrici della ghiera, e la loro progettazione è cruciale per il corretto funzionamento del meccanismo dell'anello.

Ogni perno è composto da una base cilindrica che si restringe verso la punta conica, permettendo un movimento rotatorio fluido e senza attriti all'interno dei fori della ghiera. La base cilindrica è progettata per adattarsi perfettamente ai fori, garantendo una connessione sicura ma consentendo anche il movimento necessario. La punta conica, invece, facilita la rotazione dei perni e aggiunge un elemento di design che contribuisce alla complessità e all'eleganza dell'anello.

Sono state effettuate simulazioni dettagliate per testare la compatibilità dei perni con i fori, assicurando che il movimento fosse fluido e senza attriti. Le tolleranze sono state ottimizzate per evitare qualsiasi interferenza che potesse compromettere la funzionalità dell'anello. Questo processo ha incluso l'analisi delle interfacce tra i perni e la ghiera, assicurando che il movimento rotatorio fosse agevole e che i perni potessero muoversi liberamente senza attriti o bloccaggi.

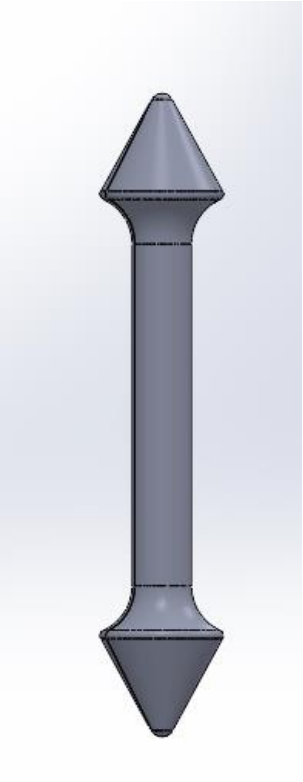

Figura 18: Perno cilindrico progettato su SolidWorks

Inoltre, la progettazione ha preso in considerazione il materiale utilizzato nella produzione con tecnologia PBF-LB/M.

4.2.3 Supporti per stampa PBF-LB/M

Durante la progettazione dei perni cilindrici con punte coniche per l'anello, è stato essenziale includere supporti temporanei alla base di ciascun perno (figura 19). Questi supporti sono stati integrati nel design per garantire la stabilità, la precisione e la funzionalità del componente finale, giocando un ruolo cruciale durante e dopo il processo di produzione additiva.

I supporti temporanei sono fondamentali nel processo PBF-LB/M in quanto utilizzando polvere fine non preriscaldata, non sarebbe in grado di sorreggere il peso della parte che viene fusa dal laser. Inoltre, permettono la dispersione del calore e la riduzione delle deformazioni indotte dagli stress termici essendo un processo a freddo con rapida solidificazione.

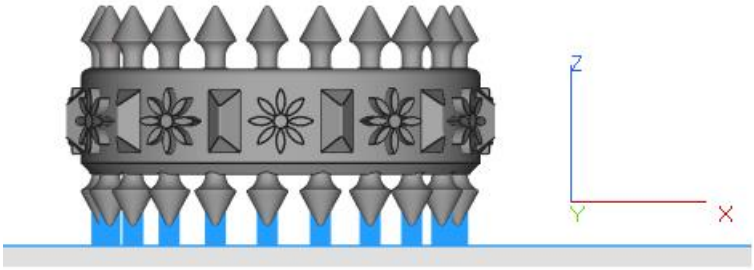

Figura 19: Messa in macchina dell'assieme con vista dei supporti

5 Stampa del componente

5.1 Macchina utilizzata, limiti e specifiche

Per la produzione dell'anello progettato è stata impiegata la macchina EOSINT M270 Dual Mode, un sofisticato sistema di stampa 3D che utilizza la tecnologia PBF-LB/M. Questa macchina è una macchina conosciuta per le sue capacità avanzate nella realizzazione di componenti metallici ad alta precisione e complessità. La EOSINT M270 è equipaggiata con un laser a fibra Yb (itterbio) da 200 W, progettato per offrire una risoluzione elevata e una precisione nella fusione della polvere metallica, con un diametro del fascio laser di circa 100 µm. Il laser opera con una lunghezza d'onda di circa 1.064 nanometri e una potenza regolabile, che consente un controllo accurato del processo di fusione per adattarsi alle esigenze specifiche dei materiali e dei dettagli del design.

Figura 20:EOSINT M270

La macchina dispone di un'area di costruzione di 250 x 250 x 215 mm, sufficientemente ampia per produrre oggetti di medie dimensioni con dettagli complessi, come l'anello progettato. All'interno di quest'area, la temperatura della piattaforma di costruzione è controllata in modo preciso tramite un sistema di riscaldamento integrato, che può essere regolato fino a 200°C per garantire condizioni ottimali durante il processo di stampa. Inoltre, la EOSINT M270 è dotata di un sistema avanzato di gestione del flusso d'aria che garantisce la stabilità della polvere durante la fusione, prevenendo difetti come la deformazione o la formazione di porosità.

Per la realizzazione dell'anello di test è stata utilizzata una polvere di acciaio maraging 1.2709, un materiale noto per le sue eccellenti proprietà meccaniche, che includono elevata resistenza e stabilità dimensionale. La polvere di acciaio 1.2709 impiegata nella EOSINT M270 è formulata con particelle di dimensioni variabili tra 20 e 50 micrometri, il che consente di ottenere un'elevata risoluzione dei dettagli e una definizione precisa dei componenti. Questo acciaio, pur essendo diverso dalla lega di alluminio AlSi10Mg comunemente utilizzata in altri contesti, condivide con essa alcune considerazioni critiche relative al processo PBF-LB/M, come la sensibilità alle variazioni termiche e l'importanza del controllo dei parametri di stampa.

Secondo Calignano et al. (2016), la macchina EOSINT M270, utilizzata per il processo PBF-LB/M, presenta specifiche caratteristiche tecniche che influenzano le capacità di produzione e i limiti geometrici delle parti realizzate. Il raggio laser della EOSINT M270 ha un diametro nominale di 100 µm, il che rappresenta una delle principali limitazioni nella definizione dei dettagli più fini nelle geometrie prodotte. In particolare, è stato dimostrato che le strutture con bordi affilati, come i parallelepipedi con base quadrata, non possono essere realizzate con dimensioni inferiori a 0,8 mm, poiché al di sotto di questa soglia si verificano imprecisioni significative nella forma e nella dimensione della parte finale. Questo limite è determinato dalla dimensione del pozzetto di fusione generato dal raggio laser e dalle proprietà di diffusione termica del materiale durante il processo di stampa.

La precisione e la rugosità superficiale delle parti prodotte sono strettamente legate ai parametri del file STL utilizzato per la stampa. In particolare, la tolleranza angolare e il controllo della deviazione del file STL influenzano la densità dei triangoli che compongono il mesh del modello, il che a sua volta determina la qualità della superficie e la fedeltà geometrica rispetto al modello CAD originale. È stato osservato che aumentando la complessità geometrica del modello si incrementa il numero di triangoli nel mesh, il che può causare errori nel software di preelaborazione e influire negativamente sulla qualità del prodotto finale.

Le strutture leggere, come quelle a reticolo con strut di diametro inferiore a 0,48 mm, sono tecnicamente realizzabili anche con l'acciaio 1.2709, ma richiedono un'attenta ottimizzazione dei parametri di stampa per evitare problemi di distorsione e perdita di definizione. Il diametro dello *strut* si riferisce al diametro delle sottili barre o colonne che formano la struttura di supporto o la griglia interna di un componente, in particolare nelle strutture reticolari. Queste strutture sono spesso utilizzate in applicazioni ingegneristiche e nella produzione additiva per ottimizzare il peso e la resistenza del componente. Durante il processo PBF-LB/M, il

cambiamento di fase del metallo da polvere a solido è accompagnato da una contrazione del volume e da gradienti termici significativi, che possono portare a deformazioni e difetti dimensionali nella parte stampata. Questi effetti termici sono particolarmente critici quando si utilizzano materiali come l'acciaio maraging 1.2709, che richiede un controllo preciso della temperatura per evitare distorsioni.

Inoltre, è stato dimostrato che la scelta dei parametri di conversione del modello CAD in file STL non solo influisce sulla qualità superficiale, ma rappresenta anche una restrizione per il software di preelaborazione. La densità di triangoli nel mesh deve essere bilanciata per evitare file troppo pesanti che potrebbero risultare difficili da gestire dal software e, allo stesso tempo, garantire una buona definizione geometrica. Con una macchina come la EOSINT M270, è possibile costruire strutture leggere con un diametro dello *strut* di 0,48 mm, ma le geometrie con una base quadrata inferiore a 0,8 mm non possono essere prodotte con una precisione accettabile.

L'anello di test, con la sua complessa geometria e la presenza di dettagli fini come punte coniche e motivi floreali, ha richiesto una macchina che potesse garantire precisione e fedeltà al design originale. La scelta della EOSINT M270 è stata dettata dalle sue specifiche tecniche avanzate, che la rendono particolarmente adatta per affrontare le sfide presentate da un progetto di questa natura.

5.2 Materiale utilizzato

Nel campo della produzione additiva, e in particolare con la tecnologia PBF-LB/M, l'acciaio è uno dei materiali più comunemente utilizzati grazie alle sue eccellenti proprietà meccaniche, alla sua disponibilità e alla sua compatibilità con il processo. L'acciaio è infatti in grado di offrire un'elevata resistenza meccanica, una buona lavorabilità e una stabilità dimensionale che lo rendono adatto a una vasta gamma di applicazioni, dai componenti industriali agli oggetti di precisione. Queste caratteristiche sono particolarmente rilevanti nella produzione additiva, dove la capacità di creare pezzi complessi e dettagliati senza compromettere la robustezza strutturale è cruciale. (Armbruster, Baum and GmbH, 2022) (Korium *et al.*, 2021)

Nella gioielleria, l'acciaio inossidabile, in particolare la lega 316L, è preferito per la sua eccellente resistenza alla corrosione, che deriva dall'alto contenuto di cromo e molibdeno. Questi elementi formano uno strato passivo di ossido di cromo sulla superficie del metallo, proteggendolo dalla ruggine e dall'ossidazione, anche in ambienti umidi o corrosivi. Questo

rende il 316L ideale per gioielli che devono mantenere la loro lucentezza e integrità nel tempo. Inoltre, il 316L è ipoallergenico, il che lo rende sicuro per il contatto prolungato con la pelle, minimizzando il rischio di irritazioni o reazioni allergiche. La combinazione di queste proprietà, insieme alla sua robustezza e alla capacità di essere lavorato in dettagli intricati, lo rende il materiale di riferimento per molti produttori di gioielli di alta qualità. La sua capacità di mantenere una finitura liscia e brillante, anche dopo processi di lavorazione complessi, lo rende particolarmente adatto per pezzi di gioielleria che devono durare nel tempo senza perdere il loro appeal estetico (Yuan, Li and Wang, 2013)

Nel nostro progetto, tuttavia, non avendo a disposizione il 316L, è stata fatta la scelta di utilizzare l'acciaio per utensili 1.2709, un materiale ampiamente utilizzato nella stampa additiva PBF-LB/M. L'acciaio 1.2709 è una lega maraging, caratterizzata da un alto contenuto di nichel e altre leghe come cobalto, molibdeno e titanio, che gli conferiscono una resistenza meccanica eccezionale. Questo materiale è stato sviluppato per applicazioni industriali ad alte prestazioni, come la produzione di utensili, componenti aerospaziali e parti soggette a stress elevati, dove sono richieste elevate durezza e resistenza alla trazione. La lega maraging 1.2709 è particolarmente apprezzata per la sua capacità di essere trattata termicamente, migliorando ulteriormente la resistenza e la stabilità del materiale. Dopo il trattamento termico di invecchiamento, l’acciaio 1.2709 può raggiungere una resistenza alla trazione superiore ai 2000 MPa, mantenendo al contempo una buona stabilità dimensionale, il che lo rende particolarmente adatto per la produzione additiva dove la precisione è essenziale. La sua capacità di mantenere una stabilità dimensionale anche sotto carichi elevati lo rende ideale per componenti che devono sopportare stress significativi senza deformarsi.

Un altro vantaggio del 1.2709 è la sua affidabilità durante il processo di fusione a letto di polvere. La sua composizione chimica è ottimizzata per garantire una buona fusibilità e una distribuzione uniforme durante la stampa, riducendo al minimo i difetti e garantendo una riproduzione fedele del design complesso dell'anello di test. Questo è particolarmente importante quando si lavora con geometrie intricate, dove anche piccole imperfezioni possono compromettere l'integrità strutturale o l'estetica del pezzo finale. Nonostante la sua minore resistenza alla corrosione rispetto all'acciaio inossidabile 316L, l'acciaio 1.2709 è stato scelto per questo progetto per la sua capacità di soddisfare le esigenze strutturali e dimensionali dell'anello, senza compromettere la precisione o l'integrità del pezzo durante il processo di stampa.

L'acciaio per utensili 1.2709, inoltre, è particolarmente adatto alla produzione additiva grazie alla sua bassa sensibilità alla formazione di cricche durante il processo di fusione laser. Questo è reso possibile dall'assenza di carbonio nella sua composizione, che migliora significativamente la saldabilità della lega. La microstruttura martensitica, ottenuta non attraverso l'uso di carbonio ma grazie all'aggiunta di nichel, conferisce all'acciaio 1.2709 una combinazione unica di elevata durezza e tenacità. Questa caratteristica lo rende ideale non solo per applicazioni industriali ad alte prestazioni, ma anche per componenti stampati in 3D che devono mantenere un elevato livello di dettaglio e stabilità strutturale.

Sebbene l'acciaio 1.2709 offra prestazioni meccaniche superiori, presenta alcuni limiti, in particolare per quanto riguarda la resistenza alla corrosione. Questo aspetto lo rende meno ideale rispetto al 316L in applicazioni dove l'esposizione ad ambienti corrosivi è frequente, come nella gioielleria. Tuttavia, la scelta dell'acciaio 1.2709 riflette la necessità di un materiale che offra non solo robustezza e durata, ma anche la capacità di gestire i complessi requisiti tecnici associati alla produzione additiva con tecnologia PBF-LB/M, soprattutto quando si tratta di pezzi complessi e strutturalmente esigenti (Turk *et al.*, 2019).

5.3 Risultato della stampa dell'anello

L'anello di test stampato, come visibile nella figura 21, presenta le caratteristiche geometriche previste dal progetto iniziale, con le punte coniche e i motivi floreali riprodotti sulla superficie esterna. Tuttavia, è stato necessario modificare i supporti per rendere l'anello più stabile durante la produzione. La conicità dei perni, infatti, richiede supporti "a punto" che durante il passaggio della stesura della polvere tramite una lama di acciaio tendono a rompersi evitando così la produzione della parte.

Figura 21:Anello as-built

La EOSINT M270 è stata scelta per la sua capacità di ottenere un'elevata risoluzione, grazie al raggio laser con un diametro nominale di 100 µm, e ha effettivamente riprodotto gran parte dei dettagli con un buon livello di precisione. Tuttavia, alcuni dei perni conici presentano deformazioni. Questa deformazione può essere attribuita alla complessità dell'ottimizzazione di un numero molto elevato di parametri di processo (circa 200) necessari per ottenere un'accuratezza adeguata a parti con geometrie cilindriche di 0,48 mm e rettangolari di 0,8 mm, come nel caso dell'AlSi10Mg.

L'anello, infatti, è caratterizzato dalla presenza di zone più massicce e di zone con pareti sottili sporgenti, che richiedono parametri di lavorazione differenti. L'ottimizzazione di oltre 200 parametri interconnessi può richiedere anni di lavoro per essere perfezionata. Per questo motivo, le aziende che producono componenti utilizzando la tecnologia PBF tendono ad acquistare dai produttori di polveri non solo il materiale, ma anche i parametri di processo ottimizzati, basati sulle specifiche caratteristiche dei componenti che intendono realizzare con questa tecnologia.

6 Tecniche di finitura testate

Una volta completata la stampa dei componenti metallici tramite la tecnica PBF-LB/M, si rende necessario intraprendere ulteriori processi di finitura per raggiungere i livelli di qualità superficiale richiesti dalle applicazioni finali, specialmente in settori esigenti come la gioielleria. Il pezzo appena stampato, noto come "*as-built*", deve essere successivamente ripulito dalla polvere non completamente fusa tramite il processo di pallinatura con microsfere. Le microsfere, spesso realizzate in vetro, metallo o ceramica, vengono scelte in base alle caratteristiche desiderate per la superficie finale. Questo processo può portare a dei problemi nel caso di piccoli dettagli. Per questo motivo sono state esplorate due tecniche di finitura: la burattatura in umido e la pallinatura con microsfere di vetro.

Figura 22: pezzo as-built rugosità iniziale

Questi processi di finitura superficiale hanno l'obiettivo di ripulire il pezzo e nel contempo di levigare la superficie del pezzo, riducendo la rugosità e conferendo al componente un aspetto più omogeneo e raffinato. La burattatura in umido utilizza un mezzo abrasivo combinato con acqua per rimuovere le asperità e levigare la superficie del pezzo, mentre la pallinatura impiega microsfere di vetro proiettate ad alta velocità per ottenere un effetto di lucidatura e compressione residua superficiale.

Tuttavia, sebbene questi trattamenti siano efficaci nel migliorare la finitura superficiale, essi possono avere un impatto significativo sull'integrità dei dettagli più fini del pezzo. Nei componenti di piccole dimensioni, come quelli destinati alla gioielleria, dove i dettagli decorativi e le geometrie intricate sono fondamentali, questi processi possono risultare in una perdita di definizione e precisione. La riduzione della nitidezza dei rilievi, l'alterazione degli spigoli vivi e la possibile cancellazione di micro-dettagli sono effetti collaterali che devono essere attentamente valutati.

6.1 Burattatura in umido

6.1.1 Descrizione del Processo di Burattatura in umido

La burattatura è un processo di finitura superficiale che viene utilizzato per migliorare la qualità delle superfici dei componenti metallici attraverso un'azione meccanica di abrasione. Nel caso specifico dell'anello realizzato in acciaio per utensili 1.2709, la burattatura è stata eseguita utilizzando la tecnica della burattatura in umido. Questo processo prevede diverse fasi preparatorie e operative che devono essere attentamente eseguite per garantire risultati ottimali.

Il pezzo viene immerso in un contenitore apposito, riempito con una miscela di particelle abrasive e acqua. Nel processo utilizzato per l'anello, la soluzione conteneva il 50% di acqua. L'acqua svolge una funzione fondamentale come lubrificante, riducendo l'attrito tra le particelle abrasive e la superficie del pezzo, oltre a controllare la temperatura durante l'operazione e facilitare la rimozione dei detriti.

Il contenitore, una volta caricato con il pezzo e il mezzo abrasivo, viene montato su una macchina che lo fa ruotare a una velocità predefinita. Nel caso specifico, il tamburo è stato fatto ruotare a una velocità di 220 giri al minuto. La rotazione genera un movimento continuo del mezzo abrasivo all'interno del contenitore, che sfrega costantemente contro la superficie del pezzo. Questa azione abrasiva meccanica è ciò che conferisce al componente una finitura più liscia, riducendo la rugosità e rimuovendo le particelle non completamente fuse rimaste sulla superficie dopo il processo di stampa additiva.

Il tempo di lavorazione è un altro fattore critico. Per l'anello in questione, il processo di burattatura è stato eseguito per una durata di cinque minuti. Questo intervallo di tempo è stato scelto per assicurare che l'azione abrasiva fosse sufficiente a levigare la superficie senza causare un'eccessiva rimozione di materiale o la perdita di dettagli fini.

Al termine del processo, l'anello viene rimosso dal contenitore e sottoposto a una nuova pulizia per eliminare eventuali residui di particelle abrasive e acqua. Il pezzo è quindi pronto per ulteriori lavorazioni o per la sua applicazione finale, con una superficie che ha beneficiato di un significativo miglioramento in termini di qualità e uniformità grazie alla burattatura in umido (Khorasani *et al.*, 2020).

6.1.2 Risultati Ottenuti dalla Burattatura

L'applicazione del processo di burattatura in umido sull'anello in acciaio per utensili 1.2709 ha prodotto risultati significativi in termini di miglioramento della finitura superficiale. Le analisi microscopiche hanno rivelato una riduzione della rugosità superficiale e la rimozione di particelle non completamente fuse, che erano presenti nello stato "*as-built*" (figura 23). In particolare, le immagini del pezzo post-burattatura mostrano che i rilievi decorativi presenti sull'anello, come i petali, risultano più definiti e privi di imperfezioni evidenti.

Figura 23:anello post burattatura in umido

Tuttavia, è stato osservato che il processo ha anche comportato una leggera perdita di nitidezza in alcune aree con spigoli vivi e dettagli sottili (figura 24). Questo effetto è attribuibile all'azione abrasiva del mezzo, che tende a smussare gli spigoli e a ridurre l'altezza dei rilievi superficiali. Pertanto, mentre la burattatura in umido si dimostra efficace nel migliorare l'uniformità della superficie e nella rimozione di difetti macroscopici, è necessario prestare attenzione alla preservazione dei dettagli fini, soprattutto quando si tratta di componenti con geometrie complesse o elementi decorativi delicati.

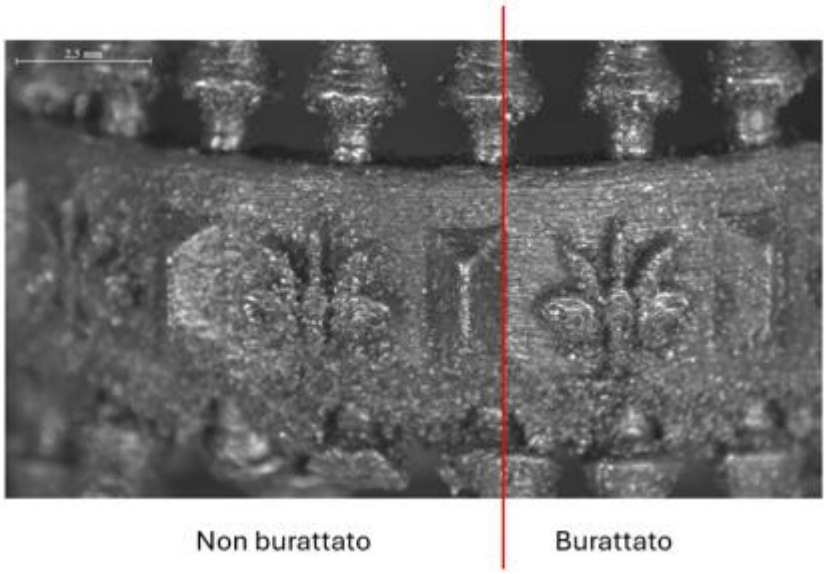

Figura 24: Confronto anello senza e con burattatura

6.2 Pallinatura

6.2.1 Descrizione del Processo di Pallinatura

La pallinatura, nota anche come *shot peening*, è una tecnica di finitura superficiale utilizzata per migliorare le proprietà meccaniche dei componenti metallici e, nel caso specifico del componente in acciaio per utensili 1.2709, per ripulire la superficie e ottimizzarne la qualità estetica. Questo processo prevede la proiezione di microsfere contro la superficie del pezzo ad alta velocità. Nel caso dell'anello prodotto tramite PBF-LB/M, sono state utilizzate microsfere di vetro, selezionate per la loro capacità di levigare la superficie in modo uniforme, senza compromettere i dettagli fini del pezzo.

Prima di avviare il processo di pallinatura, è fondamentale preparare adeguatamente il componente. Una superficie pulita garantisce che, l'energia cinetica delle microsfere, venga trasferita in modo ottimale, evitando che eventuali impurità possano ridurre l'efficacia dell'operazione.

Il processo di pallinatura viene eseguito accelerando le microsfere a velocità elevate mediante aria compressa, e dirigendole contro la superficie dell'anello a una pressione di 6 bar. L'impatto delle microsfere genera una deformazione plastica localizzata sulla superficie del metallo, inducendo uno stato di compressione residua. Questo strato compresso è particolarmente utile per migliorare la resistenza del materiale a cricche superficiali e altre forme di deterioramento.

Tuttavia, nel contesto di un gioiello come l'anello in acciaio 1.2709, tali miglioramenti meccanici non sono l'obiettivo principale, poiché il pezzo non è destinato a subire carichi ciclici elevati o stress meccanici significativi (Lesyk *et al.*, 2021).

Durante la pallinatura, la regolazione dei parametri operativi, come la pressione di proiezione delle microsfere, la durata del trattamento e l'angolo di impatto, è cruciale. Nel caso dell'anello, una pressione di 6 bar è stata scelta per equilibrare l'effetto di levigatura della superficie con la necessità di preservare i dettagli decorativi. Un'eccessiva pressione potrebbe infatti danneggiare i rilievi più fini, smussando eccessivamente gli spigoli e alterando l'estetica complessiva del pezzo.

6.2.2 Risultati Ottenuti dalla Pallinatura

L'analisi del pezzo pallinato con microsfere di vetro a una pressione di 6 bar (figure 25 e 26) mostra un significativo miglioramento nella qualità della superficie rispetto allo stato "*as-built*". La superficie appare visibilmente più liscia e uniforme, con asperità e imperfezioni superficiali, ancora presenti dopo la burattatura, ulteriormente levigate, contribuendo così a un'estetica complessiva migliorata del pezzo. La pallinatura ha efficacemente ridotto la rugosità, migliorando la riflettività della superficie e rendendola più omogenea.

Figura 25: Anello trattato con pallinatura

Figura 26: Anello trattato con pallinatura visione ravvicinata

Nonostante la riduzione della rugosità, si osserva un leggero appiattimento dei rilievi più fini. I dettagli decorativi, come i petali e gli altri elementi presenti sull'anello, hanno mantenuto la loro forma generale, ma con una nitidezza leggermente ridotta. Questo fenomeno è comune nella pallinatura, dove l'azione delle microsfere tende a smussare gli spigoli vivi. Tuttavia, la perdita di dettaglio è stata minima, il che suggerisce che i parametri di pallinatura, impostati a 6 bar di pressione, sono stati ben calibrati per bilanciare l'effetto levigante con la preservazione dei dettagli.

Inoltre, la pallinatura ha portato a una finitura molto più uniforme rispetto ai processi precedenti. La distribuzione delle microsfere sulla superficie ha eliminato eventuali differenze di finitura introdotte durante la burattatura, come dimostrato dall'assenza di variazioni di luminosità o texture sulla superficie del pezzo, segno che il processo ha contribuito a rendere omogeneo l'intero componente.

7 Conclusioni

L’ AM rappresenta una delle innovazioni più rivoluzionarie nel settore della produzione di gioielli, offrendo possibilità uniche che vanno oltre le capacità dei metodi di produzione tradizionali. La capacità di creare geometrie complesse, strutture leggere, e dettagli intricati direttamente da modelli digitali senza necessità di attrezzature speciali o costosi stampi rende l'AM particolarmente attraente per il settore orafo, dove la personalizzazione e l'originalità del design sono fondamentali. Tuttavia, come emerso dalla prova sperimentale condotta sull'anello in acciaio per utensili 1.2709, la piena realizzazione di questo potenziale richiede un'attenta considerazione di vari fattori critici, tra cui la precisione del processo, la scelta dei materiali, e le tecniche di finitura post-produzione.

L'uso della tecnologia PBF-LB/M a livello macroscopico per la realizzazione dell'anello ha messo in evidenza sia i punti di forza che le attuali limitazioni di questa tecnica. Da un lato, essa ha dimostrato una buona capacità di riprodurre dettagli di medie dimensioni, come i motivi floreali. Dall'altro, i dettagli più fini, come i perni conici, hanno subito deformazioni a causa delle loro dimensioni, che risultano inferiori a 0,48 mm nelle punte. Questi dettagli non avrebbero potuto essere costruiti correttamente, dato che le loro dimensioni sono inferiori al diametro del fascio laser utilizzato. Questo evidenzia la necessità di ottimizzare i parametri di processo per un materiale al fine di identificarne i limiti geometrici legati al processo stesso così da scegliere questi come punto di partenza nella progettazione di un componente per il settore orafo-gioielleria.

In questo contesto, l'adozione della tecnologia micro-PBF-LB/M emerge come una soluzione promettente per superare le limitazioni attuali. La micro-PBF-LB/M, con un diametro del laser ridotto (≤ 40 μm), uno spessore di strato più sottile (≤ 10 μm), consente di ottenere una risoluzione molto più elevata rispetto alla macro PBF-LB/M. Questo rende possibile la realizzazione di dettagli estremamente fini e precisi, come richiesto nel settore orafo, riducendo il rischio di deformazioni e migliorando la qualità complessiva del prodotto finale. Tuttavia, anche nella micro-PBF-LB/M si rende necessario l’ottimizzazione dei parametri di processo e l’individuazione dei limiti geometrici.

Oltre alla scelta della tecnologia e del materiale, le tecniche di finitura post-produzione svolgono un ruolo cruciale nel determinare l'aspetto estetico e la qualità superficiale del pezzo finito. Nel caso dell'anello in acciaio 1.2709, la burattatura in umido ha dimostrato di essere efficace nel ridurre la rugosità superficiale e nell'ottenere una finitura più omogenea. Tuttavia,

come osservato, questo processo ha comportato una leggera perdita di nitidezza nei dettagli più minuti, evidenziando la necessità di un controllo preciso dei parametri di finitura per bilanciare l'azione abrasiva con la preservazione dei dettagli.

La pallinatura con microsfere di vetro ha anch'essa migliorato la finitura superficiale, conferendo una superficie più liscia e uniforme. Questo trattamento ha inoltre introdotto uno strato di compressione residua che, sebbene meno rilevante nel contesto di un gioiello, contribuisce a migliorare la resistenza del materiale a cricche e altre forme di deterioramento meccanico. Tuttavia, anche in questo caso, è stato riscontrato un lieve appiattimento dei rilievi decorativi, sottolineando la necessità di ottimizzare continuamente i processi di finitura in base alle specifiche esigenze estetiche e funzionali del componente.

Alla luce di questi risultati, è chiaro che l'integrazione di tecnologie avanzate come la micro-PBF-LB/M, la selezione accurata dei materiali, e l'ottimizzazione delle tecniche di finitura post-produzione sono essenziali per sfruttare appieno le potenzialità della manifattura additiva nel settore orafo. La combinazione di questi elementi permette non solo di superare le attuali limitazioni in termini di precisione e qualità superficiale, ma anche di aprire nuove opportunità per la creazione di gioielli complessi, personalizzati e di altissimo valore estetico e funzionale.

In conclusione, sebbene la manifattura additiva rappresenti un notevole passo avanti per il settore orafo, il suo pieno potenziale può essere raggiunto solo attraverso un approccio integrato che consideri ogni fase del processo produttivo, dalla selezione del materiale alla scelta della tecnologia di stampa, fino alle tecniche di finitura. Solo così sarà possibile realizzare gioielli che non solo soddisfino, ma superino le aspettative in termini di precisione, qualità e bellezza.

Bibliografia

3D Hubs (2021) *Projected global additive manufacturing market growth between 2020 and 2026-Statista*. Survey. Worldwide. Available at: https://www-statista-com.ezproxy.biblio.polito.it/statistics/284863/additive-manufacturing-projected-global-market-size/.

Armbruster, C., Baum, A. and GmbH, M. (2022) 'C. Burkhardt, N. Brito, M. Mungenast Pforzheim University Pforzheim, Germany'.

Belkin, P.N., Kusmanov, S.A. and Parfenov, E.V. (2020) 'Mechanism and technological opportunity of plasma electrolytic polishing of metals and alloys surfaces', *Applied Surface Science Advances*, 1, p. 100016. Available at: https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2020.100016.

Castelo-Branco, I., Cruz-Jesus, F. and Oliveira, T. (2019) 'Assessing Industry 4.0 readiness in manufacturing: Evidence for the European Union', *Computers in Industry*, 107, pp. 22–32. Available at: https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.01.007.

Del Curto, B. *et al.* (2014) 'Engineering Processes for Jewellery Design', *The international journal of designed objects.*, 7(2), pp. 1–8.

Diamanti, M.V. *et al.* (2010) 'Production and Anodic Colouring of Newly-Designed Titanium Jewels'.

Dilberoglu, U.M. *et al.* (2017) 'The Role of Additive Manufacturing in the Era of Industry 4.0', *Procedia Manufacturing*, 11, pp. 545–554. Available at: https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.148.

Farshidianfar, M.H., Khajepour, A. and Gerlich, A.P. (2016) 'Effect of real-time cooling rate on microstructure in Laser Additive Manufacturing', *Journal of Materials Processing Technology*, 231, pp. 468–478. Available at: https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.01.017.

Ferreira, T. *et al.* (2012) 'Additive Manufacturing in Jewellery Design', in *Volume 4: Advanced Manufacturing Processes; Biomedical Engineering; Multiscale Mechanics of Biological Tissues; Sciences, Engineering and Education; Multiphysics; Emerging Technologies for Inspection and Reverse Engineering; Advanced Materials and Tribology*. *ASME 2012 11th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis*, Nantes, France: American Society of Mechanical Engineers, pp. 187–194. Available at: https://doi.org/10.1115/ESDA2012-82789.

Fletcher, D. and Cooper, F. (2018) ‘The Precious Project: Polishing and Finishing of Additive Manufacturing (AM) Jewelry’. Fletcher.

Frazier, W.E. (2014) ‘Metal Additive Manufacturing: A Review’, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23(6), pp. 1917–1928. Available at: https://doi.org/10.1007/s11665-014-0958-z.

Hernandez Korner, M.E. *et al.* (2020) ‘Systematic Literature Review: Integration of Additive Manufacturing and Industry 4.0’, *Metals*, 10(8), p. 1061. Available at: https://doi.org/10.3390/met10081061.

Khorasani, M. *et al.* (2020) ‘On the role of wet abrasive centrifugal barrel finishing on surface enhancement and material removal rate of LPBF stainless steel 316L’, *Journal of Manufacturing Processes*, 59, pp. 523–534. Available at: https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.09.058.

Korium, M.S. *et al.* (2021) ‘Direct Metal Laser Sintering of Precious Metals for Jewelry Applications: Process Parameter Selection and Microstructure Analysis’, *IEEE Access*, 9, pp. 126530–126540. Available at: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3112479.

Leong, K.F. *et al.* (1998) ‘Abrasive jet deburring of jewellery models built by stereolithography apparatus (SLA)’, *Journal of Materials Processing Technology*, 83(1–3), pp. 36–47. Available at: https://doi.org/10.1016/S0924-0136(98)00041-7.

Lesyk, D.A. *et al.* (2021) ‘Surface Shot Peening Post-processing of Inconel 718 Alloy Parts Printed by Laser Powder Bed Fusion Additive Manufacturing’, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 30(9), pp. 6982–6995. Available at: https://doi.org/10.1007/s11665-021-06103-6.

Lewandowski, J.J. and Seifi, M. (2016) ‘Metal Additive Manufacturing: A Review of Mechanical Properties’, *Annual Review of Materials Research*, 46(1), pp. 151–186. Available at: https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070115-032024.

Li, P. *et al.* (2023) ‘Study on surface quality of ultrasonic assisted underwater laser polishing’, *Journal of Materials Research and Technology*, 27, pp. 5761–5771. Available at: https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.11.088.

Nagarajan, B. (2019) ‘Development of Micro Selective Laser Melting: The State of the Art and Future Perspectives’.

NARCIS GUASCH PIRIZ, GAREL BUÑUEL, and TORDERA XANDRI (2019) ‘REMOVABLE ELECTRO-MECHANICAL DEVICE FOR BURNISHING AND SMOOTHING METAL PARTS’. Barcelona.

Prashanth, K.G. (2020) ‘Selective Laser Melting: Materials and Applications’, *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 4(1), p. 13. Available at: https://doi.org/10.3390/jmmp4010013.

Sefene, E.M. (2022) ‘State-of-the-art of selective laser melting process: A comprehensive review’, *Journal of Manufacturing Systems*, 63, pp. 250–274. Available at: https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.04.002.

Swain, J. and Anopol Ltd (2010) ‘The “then and now” of electropolishing’, *Surface World* [Preprint].

Turk, C. *et al.* (2019) ‘Advances in Maraging Steels for Additive Manufacturing’, *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte*, 164(3), pp. 112–116. Available at: https://doi.org/10.1007/s00501-019-0835-z.

Wannarumon, S. and Bohez, E.L.J. (2004) ‘Rapid Prototyping and Tooling Technology in Jewelry CAD’, *Computer-Aided Design and Applications*, 1(1–4), pp. 569–575. Available at: https://doi.org/10.1080/16864360.2004.10738300.

Wong, K.V. and Hernandez, A. (2012) ‘A Review of Additive Manufacturing’, *ISRN Mechanical Engineering*, 2012, pp. 1–10. Available at: https://doi.org/10.5402/2012/208760.

Yap, C.Y. *et al.* (2015) ‘Review of selective laser melting: Materials and applications’, *Applied Physics Reviews*, 2(4), p. 041101. Available at: https://doi.org/10.1063/1.4935926.

Yuan, J.P., Li, W. and Wang, C. (2013) ‘Effect of the La alloying addition on the antibacterial capability of 316L stainless steel’, *Materials Science and Engineering: C*, 33(1), pp. 446–452. Available at: https://doi.org/10.1016/j.msec.2012.09.012.