



ILARIA FORNO
Politecnico di Torino
TORINO, ITALY.

Ilaria Forno ha conseguito il titolo di Ingegnere dei Materiali al Politecnico di Torino. Sta ora svolgendo un Dottorato di Ricerca in Sistemi di Produzione e Design Industriale, sviluppando una tesi sponsorizzata dal Consorzio Prometeo, riguardante la microfusione dei metalli preziosi con una analisi di materiali e metodi

La metallurgia delle polveri è da tempo una tecnologia largamente utilizzata in diversi settori industriali che recentemente ha suscitato forte interesse nel mondo orafa, soprattutto sfruttandone la combinazione con tecniche di prototipazione rapida quali la sinterizzazione laser.

La sempre crescente disponibilità di leghe dalle caratteristiche avanzate, siano esse basate su metalli preziosi o non, fornite sotto forma di polveri apre le porte all'utilizzo di tecnologie di sinterizzazione alternative, mutuata da settori affini.

Questo lavoro si pone quindi come scopo l'analisi di diverse tecniche di sinterizzazione evidenziandone pregi e limiti, anche in funzione dei diversi materiali utilizzati.

Sinterizzazione: applicabilità di tecniche differenti di metallurgia delle polveri al settore orafa.

Ilaria Forno, Politecnico di Torino – DISAT / Marco Actis Grande - Consorzio Prometeo

INTRODUZIONE

Il settore della produzione orafa e di accessori moda ha visto, negli ultimi anni, un crescente interesse nei confronti di tecnologie innovative, mutuata da settori affini, che potessero portare ad un avanzamento tecnologico che fosse in qualche modo in grado di superare alcuni dei limiti insiti nella produzione tradizionale attraverso il processo di fusione a cera persa. Il desiderio di creare oggetti che sia dal punto di vista geometrico (filigrane, oggetti cavi, oggetti a giorno) sia dal punto di vista delle proprietà (densità, tolleranza dimensionale, proprietà metallurgiche e meccaniche) fossero impossibili o difficili da realizzare è stato il motore che ha portato il settore ad affacciarsi in maniera sempre più spinta al campo delle lavorazioni meccaniche, della prototipazione rapida e della metallurgia delle polveri. Si deve inoltre ricordare che a queste considerazioni relative al prodotto, vanno aggiunte quelle relative alla metodologia produttiva e di natura economica.

Considerando nello specifico il caso della metallurgia delle polveri, l'interesse verso questa tecnologia, tipicamente utilizzata da altri settori industriali, nasce da considerazioni di natura metallurgica e meccanica in via generale (possibilità di grandi innovazioni dal punto di vista compositivo e di proprietà) e, per specifici processi che saranno descritti nel seguito, di natura geometrica (complessità delle forme e rispetto di strette tolleranze dimensionali).

Prima di addentrarsi nel dettaglio delle diverse tecnologie produttive risulta però necessaria una breve disamina delle peculiarità della metallurgia delle polveri in linea generale, evidenziando caratteristiche comuni e differenze tra le metodologie di press and sintering, quelle di iniezione e quelle derivanti da un approccio di additive manufacturing.

Metallurgia delle polveri: caratteristiche generali .

La metallurgia delle polveri è un metodo di produzione di oggetti e di particolari metallici in forma solida partendo da polvere di materiali metallici come materiale grezzo. Questa famiglia di processi è molto ampia e complessa in virtù dell'elevato numero di parametri che possono identificare metodologie produttive differenti [1]. In particolare una prima classificazione può essere effettuata considerando la metodologia per la realizzazione della forma del componente finale, in quest'ottica possiamo dividere le diverse tecnologie in funzione del fatto che prevedano una fase di pressatura di polveri libere all'interno di uno stampo (tecnologie press and sintering) oppure che prevedano l'iniezione di una massa plastica di polveri e legante all'interno di uno stampo metallico (tecnologie Powder Injection Moulding, mutuata dal settore delle materie plastiche) o infine tecnologie additive (tecnologie Layer by layer o additive manufacturing). Parallelamente le stesse tecnologie possono essere classificate in base alla fonte di energia che porta al fenomeno di densificazione del compatto da agglomerato di polveri a solido (termica, fonte laser, scarica capacitiva, plasma), oppure in base all'eventuale necessità di miscelare la polvere con un legante

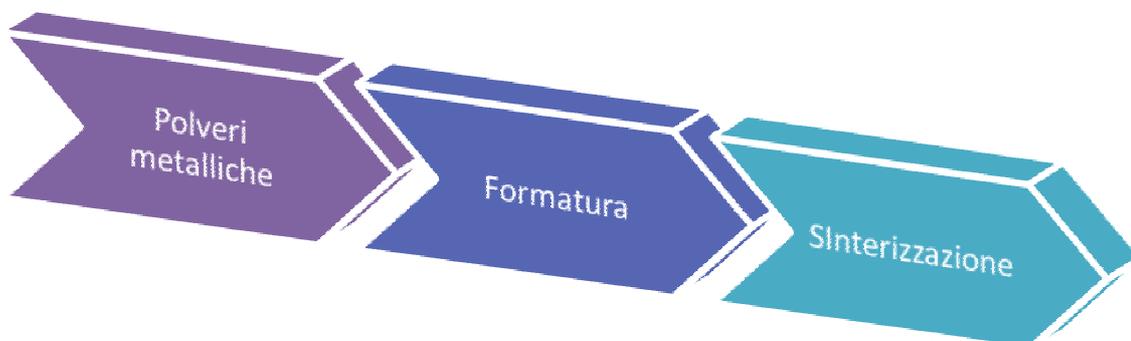


Figura 1 Fasi di processo delle tecnologie di Metallurgia delle Polveri

Come risulta essere scontato, l'unico punto sicuramente in comune tra queste tecnologie rimane il fatto che esse operino con polveri metalliche, occorre quindi fare un breve approfondimento sulle caratteristiche generali delle suddette polveri.

La produzione di polveri avviene, tranne che in alcuni casi eccezionali in cui si fa ricorso a comminazione da solido o a processi di natura chimica o elettrolitica, prevalentemente attraverso un processo detto di atomizzazione. Questo processo è condotto a partire da metallo allo stato fuso facendolo passare in maniera controllata attraverso un orifizio al termine del quale verrà disintegrato e solidificato ad opera di un getto d'acqua (atomizzazione in acqua) oppure ad opera di un flusso di gas. La differente interazione tra metallo fuso e mezzo raffreddante determina le peculiarità delle due tipologie di polvere, in particolare dal punto di vista morfologico le particelle prodotte attraverso atomizzazione in acqua avranno una forma irregolare e spugnosa mentre le particelle prodotte con atomizzazione in gas assumono una forma regolare e sferica in virtù delle elevate pressioni in gioco.

Oltre a differenze dal punto di vista morfologico, le polveri possono anche essere classificate in base alla metodologie di alligazione. Nel caso in cui si utilizzi una lega, l'alligazione può essere precedente all'atomizzazione (il metallo fuso contiene già tutti gli elementi leganti) oppure successiva, allo stato di polveri.

In metallurgia delle polveri il modo più facile per creare una lega è miscelare le polveri elementari in base alla percentuale stechiometrica, in peso, degli elementi leganti. Oltre alla maggiore comprimibilità delle miscele di polveri elementari rispetto alle polveri pre-legate, il principale vantaggio di usare la miscelazione come metodo di alligazione è che la composizione di una miscela di polvere può essere cambiata o corretta in maniera puntuale a valle del processo di atomizzazione. Tra i principali svantaggi di questo metodo si annovera la minore omogeneità del componente sinterizzato e l'inapplicabilità a taluni processi.

Altri processi prevedono l'alligazione a livello di particelle di polvere, è il caso delle polveri pre-legate per diffusione in cui, attraverso un trattamento termico, si crea un legame chimico, consolidato da processi diffusivi, tra la polvere del materiale metallico di base e le polveri degli elementi in lega. Si otterrà quindi una particella di metallo base con gli elementi delle particelle di legante saldate alla superficie sotto forma di satelliti.

Infine sono da annoverare le polveri totalmente pre-legate, esse sono ottenute in genere attraverso l'atomizzazione a partire dal fuso della lega in interesse. Particolari proprietà infine possono essere ottenute attraverso il ricorso a sistemi ibridi in cui polveri delle diverse metodologie vengono miscelate [2].

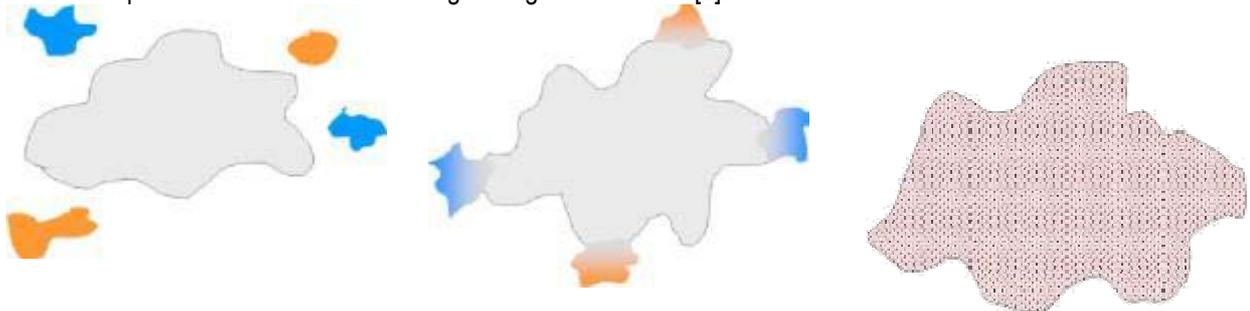


Figura 2 Schema di polveri miscelate meccanicamente, pre-legate per diffusione e totalmente prelegate

Alla fase di produzione delle polveri deve poi seguire un processo di formatura, ovvero una fase in cui alla massa libera di polvere metallica viene impartita una certa geometria. Questa fase, nel processo tradizionale, viene impartita attraverso l'utilizzo di uno stampo di geometria opportuna in cui il materiale viene pressato (processo press&sintering). Questo stesso processo prevede poi un numero elevato di varianti, atte a migliorare la densificazione del materiale in termini di compattazione e isotropia, esse possono prevedere l'applicazione di calore in fase di compattazione o l'utilizzo di equipaggiamenti che permettano l'applicazione di pressioni isostatiche (un esempio largamente utilizzato è l'Hot Isostatic Pressing). I processi di pressatura normalmente prevedono una fase di sinterizzazione termica che segue la fase di compattazione, esistono però casi in cui le due fasi avvengono simultaneamente sfruttando l'energia di campi elettrici per fare avvenire la sinterizzazione.[3]

Tra i processi alternativi alla formatura per compattazione si annoverano invece i processi di iniezione (Powder Injection Molding) e i processi additivi.

Infine è opportuno fare un accenno ai meccanismi di sinterizzazione. Tradizionalmente il processo di sinterizzazione è definito come *“Il trattamento di una polvere o di un compatto a temperatura inferiore al punto di fusione del componente principale, con lo scopo di incrementare la sua resistenza, mediante la creazione di legami tra le particelle”*.

In realtà questa definizione include al suo interno molto più del semplice trattamento termico di sinterizzazione, ma può essere ampliato a tutte quelle tecnologie che fanno ricorso a fonti di sinterizzazione alternative, quali laser, campi elettrici o plasma.

In linea generale il processo di sinterizzazione avviene per trasferimento di massa e la principale forza guida del processo è costituita dalla riduzione dell'energia libera superficiale. Termodinamicamente, il fenomeno può essere spiegato in termini di tensione superficiale: le particelle hanno superfici curve che la sinterizzazione cerca di eliminare; sulla superficie si concentra un'elevata quantità di energia che diminuisce drasticamente con la riduzione della

curvatura. Inoltre la pressione di vapore su aree concave è molto inferiore rispetto ad aree convesse. Durante la sinterizzazione termica il processo di densificazione è condotto, a causa delle forze trainanti sopra descritte, fondamentalmente secondo differenti meccanismi: Diffusione (superficiale, a bordo grano, volumica), Flusso plastico e fenomeni di evaporazione-condensazione.

Per questi processi giocano un ruolo fondamentale parametri quali tempo e temperatura di sinterizzazione e atmosfera in cui il processo viene condotto

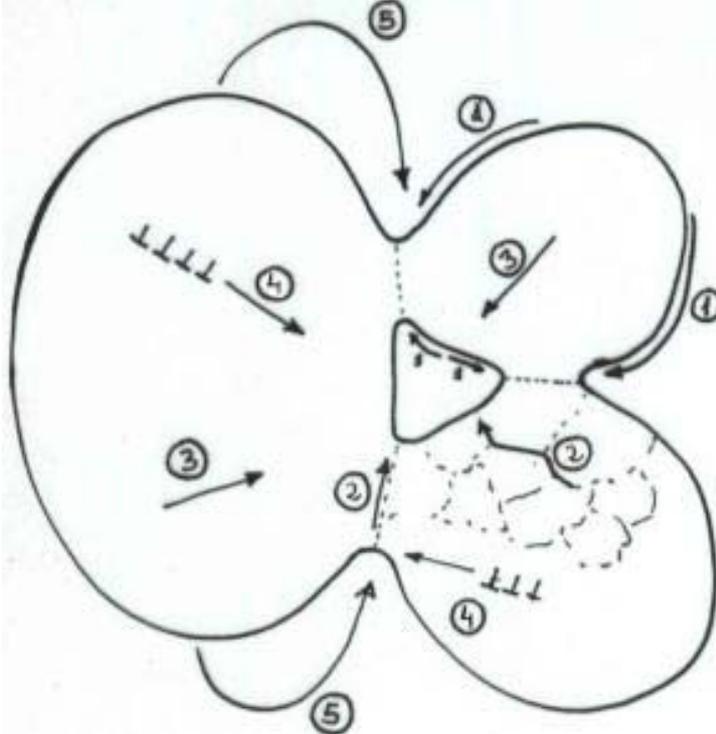


Figura 3 Schema esemplificativo dei processi di Diffusione (superficiale (1), a bordo grano (2), volumica (3)), Flusso plastico (4) e fenomeni di evaporazione-condensazione (5).

Nelle tecnologie assistite da campo, le condizioni sperimentali risultano essere più complesse e quindi pensabile che meccanismi più complessi possano essere coinvolti. La natura di tali meccanismi è però ancora oggetto di dibattito. In particolare la sinterizzazione è dovuta a :

- scarica ad arco
- migrazione elettroica
- diffusione indotta da campo elettrico
- Gradienti di temperatura
- Gradiente di pressione di carico
- modificazione della concentrazione dei difetti

Attraverso questi diversi processi le polveri libere tendono a formare delle zone di unione (colli di sinterizzazione) che accrescono fino a ridurre la porosità inter-particellare e quindi a raggiungere la densificazione. [4]

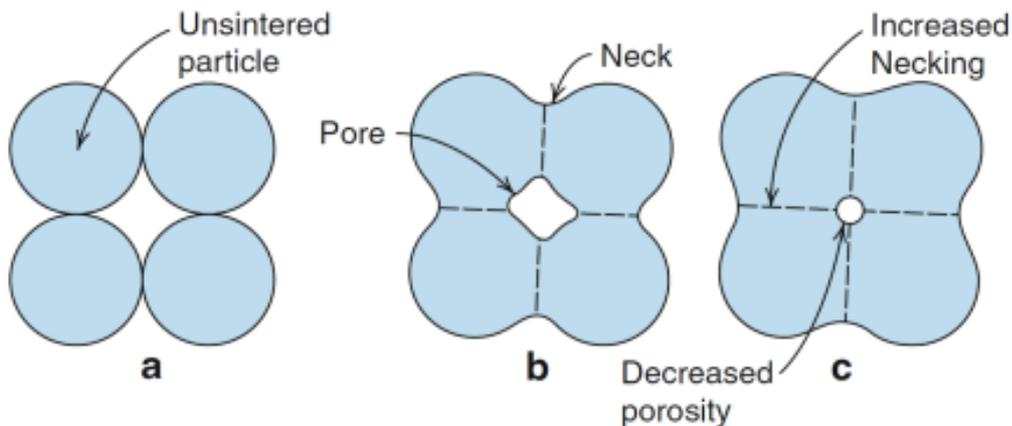


Figura 4 Processo di sinterizzazione da particelle libere (a), formazione di colli di sinterizzazione (b) e densificazione (c).

TECNOLOGIE PRESS AND SINTERING

Le tecnologie di pressatura e sinterizzazione termica sono largamente utilizzate per produrre un vasto numero di componenti metallici, la cui forma sia, dal punto di vista geometrico, principalmente è assial-simmetrica. La tipologia di questi solidi di estrusione è classificabile sostanzialmente in due categorie:

1. Componenti di difficile produzione mediante altri metodi, come ad esempio particolari realizzati in tungsteno, molibdeno o carburo di tungsteno. Inoltre cuscinetti porosi, filtri, materiali compositi e molti tipi di componenti magnetici dolci o duri che sono realizzabili soltanto mediante PM.
2. Componenti PM che offrono vantaggi economici rispetto ai componenti lavorati a macchina, colati o forgiati. Parti strutturali come innesti per applicazioni automobilistiche, elementi di collegamento, camme ed ingranaggi planetari sono solo alcuni esempi. Il cuore di tale produzione è rappresentato dai componenti a base ferro, ma sono anche prodotte significative quantità di pezzi in rame, ottone, bronzo ed alluminio, così come alcuni metalli più rari come il berillio ed il titanio

Seppur, dal punto di vista geometrico, queste tecnologie non siano di primario interesse per il settore dei metalli preziosi, alcune loro varianti meno tradizionali permettono di ottenere caratteristiche finali del prodotto altrimenti non ottenibili che possono rappresentare una sostanziale innovazione nel campo degli accessori moda.

Tecnologie FAST

Le tecnologie di sinterizzazione assistite da campo (Field Assisted Sintering Techniques), permettono di ottenere componenti in tempi molto brevi con caratteristiche meccaniche elevatissime. Il principio alla base di questa famiglia di tecnologie è il rapido apporto di energia alla polvere attraverso il supporto di un campo elettro-magnetico a frequenze relativamente basse (<500 Hz) [5], è proprio la rapidità del processo che porta a grandi vantaggi sia dal punto di vista della produttività sia dal punto di vista del controllo delle proprietà del pezzo.

Fanno parte di questa famiglia di tecnologie, per le quali i fenomeni fisici alla base della sinterizzazione sono ancora oggetto di studio, un grande numero di varianti, come la Spark Plasma Sintering, Electro Discharge Sintering e Capacitor Discharge Sintering.

Tra i fenomeni che avvengono in fase di sinterizzazione si annoverano diffusione atomica, interazione tra forze termiche, elettromagnetiche e meccaniche, eventualmente amplificate dalla porosità nei componenti, così come fenomeni plastici favoriti dal flusso di corrente attraverso materiali conduttivi (effetto elettro-plastico EPE) [6].

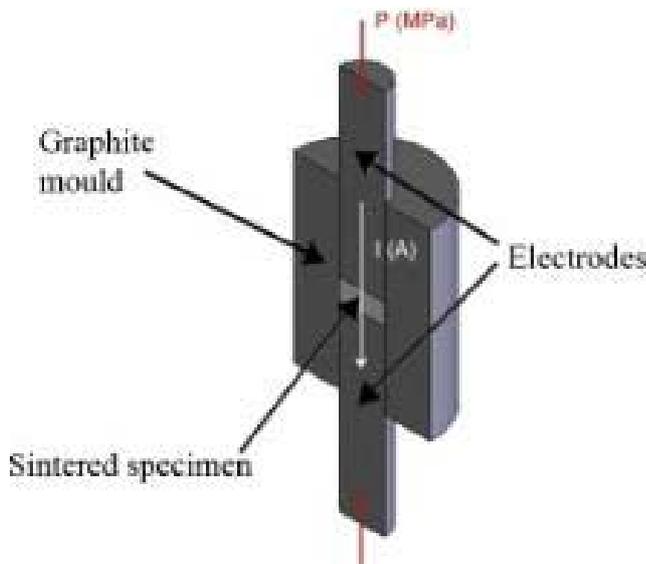


Figura 5 Schema di un apparecchiatura FAST in cui gli elettrodi fungono anche da punzoni di pressatura.

Tra queste tecniche particolare rilievo assume la tecnologia EPoS (Electron Power Sintering) . Derivata direttamente dalla Capacitor Discharge Sintering questa tecnologia permette di compattare a densità prossima a quella teorica un componente con un singolo impulso elettromagnetico di durata ridotta (30-100 ms) in contemporanea all'applicazione di una pressione assiale [7]. L'estrema rapidità di questa tecnologia inibisce i fenomeni di ricristallizzazione tipici dei processi termici permettendo di ottenere microstrutture estremamente fini e nano-strutturate con una ripetibilità e affidabilità molto maggiore che altre tecnologie. L'insostenibilità delle leggi della termodinamica in questo arco temporale permette inoltre di ottenere facilmente composti metastabili [8]

Le possibilità di applicazioni pratiche offerte da queste tecnologie innovative sono molteplici, in primo luogo quelle legate alla produzione di oggetti a densità teorica, con caratteristiche meccaniche estremamente interessanti senza bisogno di operazioni secondarie di deformazione plastica o di trattamenti superficiali. L'utilizzo di polveri d'oro 18K. Nano-strutturate permette, ad esempio, l'ottenimento di compatti a durezza elevata (prossimi a 300 HV), per applicazioni con resistenza ad usura e al graffio ottimizzata, fortemente superiore a quella tradizionale, senza ricorso a trattamenti secondari.

TECNOLOGIE AD INIEZIONE

MIM

"L'industria orafa si trova in una posizione privilegiata per l'adozione della tecnologia MIM dal momento che molti dei vantaggi di questa tecnologia sono fortemente amplificati in un settore, come quello orafa, dove il costo della material prima è elevato." Così scriveva J.T.Strauss nel 1996 invitando a considerare gli indiscutibili vantaggi offerti dall'applicazione del MIM al settore del gioiello. [9]

Le radici del MIM vanno ricercate circa 80 anni fa, quando apparvero i primi brevetti ed i primi articoli sul Ceramic Injection Moulding. [10]. Derivante dalla tecnologia di stampaggio a iniezione per le materie plastiche, il Metal Injection Moulding (MIM), prevede l'utilizzo di una pressa a iniezione, attraverso la quale una massa plastica, composta da un blend di polveri metalliche e legante polimerico ,viene fatta fluire all'interno di uno stampo metallico (mono o multi-impronta, semplice o complesso). L'iniettabilità all'interno dello stampo è garantita dall'aggiunta del legante, dato dalla miscela di diversi componenti plastici: polimeri, cere, additivi. La miscelazione delle polveri metalliche e dei leganti è condotta in miscelatori a caldo, in modo da ottenere una perfetta omogeneità della miscela ed è poi granulato.[11]

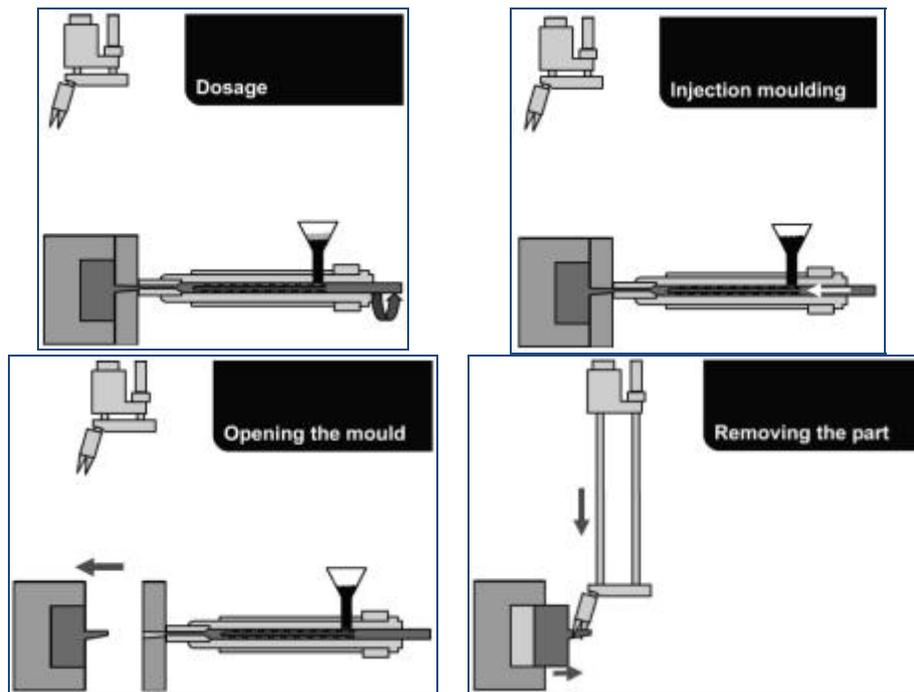


Figura 6 Schema di processo della Tecnologia di iniezione MIM, fase di miscelazione, iniezione, apertura dello stampo ed estrazione del pezzo.

Questo feedstock, (composta generalmente da 15-30% in volume di legante), riesce a fluire molto bene anche all'interno di cavità complesse e conferisce al manufatto finale precise caratteristiche geometriche in termini di finitura superficiale e di tolleranze geometriche derivanti dallo stampo metallico in cui viene iniettata. I compatti estratti dallo stampo devono poi seguire un processo di eliminazione del legante (per via termica o chimica) e in seguito in processo di densificazione sotto forma di sinterizzazione termica. Questo processo porterà alla densificazione finale del compatto metallico con un ritiro dimensionale isotropo e prevedibile. I forni di sinterizzazione sono ottimizzati per il processo MIM: sono equipaggiati in modo tale da trattare, rimuovendolo, la parte di legante che è ancora contenuto nei pezzi ed avere un'atmosfera sufficientemente pulita alla temperatura di sinterizzazione.

Grazie alla possibilità di produrre pezzi di piccole dimensioni e geometrie complesse, con densità prossime a quella teorica con buona finitura superficiale il MIM si pone in diretta concorrenza con tecnologie tradizionale nel settore orafa, quali la fusione a cera persa [12].

Tra le applicazioni di massa più interessanti si annoverano sicuramente le casse di orologio. Molti produttori di orologi nel mondo stanno oggi utilizzando il MIM per la fabbricazione delle casse e dei cinturini, anche in metallo prezioso, grazie alle tolleranze ottenute e al ridottissimo scarto di materiale (in confronto ad esempio con le lavorazioni per asporto di truciolo). L'introduzione del MIM ha permesso riduzioni di costo significative rispetto alla formatura a caldo e alla lavorazione meccanica. Inoltre, ha permesso di produrre in modo economico forme nuove che hanno innovato il design nell'industria degli orologi.

Altro settore, parente stretto di quello della gioielleria che utilizza il MIM è quello dell'occhialeria. Molti sono gli esempi di grandi produttori che utilizzano il MIM per produrre la componentistica per la produzione degli occhiali, anche con materiali "difficili" quale il titanio. Un esempio interessante è quello di un particolare snodo a molla per montature per occhiali Tag Heuer in 316L. Questo componente unifica design e funzionalità. Infatti, mostra eccellente funzionalità, combinata con un movimento dolce dei due pezzi MIM, flessibilità integrata e una superficie perfetta che è obbligatoria nell'esigente settore dell'ottica. Design innovativo: aspetto "pulito" - niente fessure, niente bordi, viti invisibili sulla montatura e integrazione perfetta con il design di quest'ultima.

TECNOLOGIE ADDITIVE MANUFACTURING

Da diversi anni le tecnologie di additive manufacturing sono di forte appeal per le applicazioni dell'industria orafa, sia come strumenti per il processo tradizionale (creazione di prototipi o di modelli master per la gommatura) sia come parte integrante dello stesso (fusione diretta di resine). La principale ragione di questo interesse è legata alla possibilità di produrre oggetti dalla geometria complessa, spesso anche molto sottili o cavi, senza dilungarsi nei passaggi del processo tradizionale.

I processi di additivi condotti su metallo, ed in particolare le tecnologie che rientrano nella famiglia del rapid manufacturing, risultano quindi essere di ulteriore interesse per un settore in cui la possibilità di produrre pezzi complessi, unici e fortemente personalizzabili è un indiscusso valore aggiunto [13], [14].

Tra le varie tecnologie di RM disponibili due in particolare incontrano l'interesse dell'industria orafa: le tecnologie selettive laser e le tecnologie di stampaggio.

SLS/SLM

Il forte interesse alla produzione di realizzare oggetti in metallo a partire dal disegno CAD, in tempi contenuti e senza necessità di passaggi intermedi è stato il motore per la forte attività di ricerca e di ottimizzazione per trasporre al settore orafa, le tecnologie a letto di polvere ampiamente impiegate per il settore aerospaziale e biomedico.

Si tratta di una serie di tecnologie, nelle loro diverse varianti costruttive [15], che prevedono la realizzazione di un oggetto tridimensionale a partire da polvere (in questo caso metallica) consolidando strati successivi di materiale grazie all'ausilio di un laser. I processi si suddividono a loro volta in diverse categorie, principalmente in funzione del processo di densificazione che viene attuato: si parla di Selective Laser Sintering (SLS) [16] quando le polveri non vanno a fusione ma vengono sinterizzate tra loro, e di Selective Laser Melting (SLM) [17] quando le particelle di polvere vengono fuse le une accanto alle altre a creare un compatto denso.

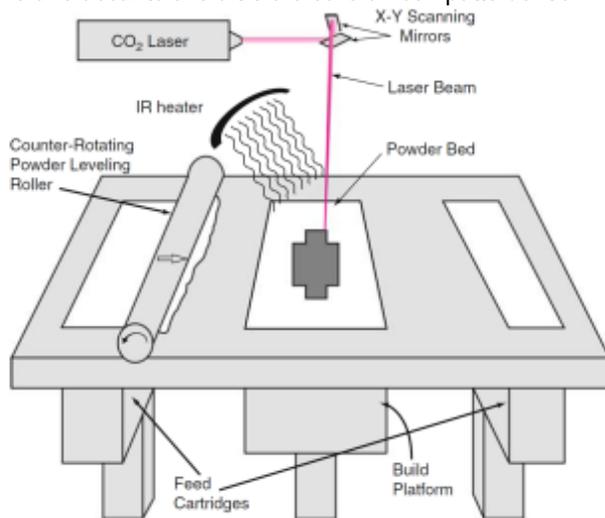


Figura 7 Schema costruttivo esemplificato delle tecnologie laser a letto di polvere

Entrambi i processi lavorano sfruttando la realizzazione di strati solidi successivi, consolidati via via dall'azione di un laser il cui percorso è generato a partire dal disegno CAD del modello che si vuole realizzare. Per molti aspetti le due tecnologie risultano essere analoghe e la loro ottimizzazione procede in parallelo (ottimizzazione delle dimensioni e della composizione delle polveri, generazione dei supporti, ri-uso del materiale non trattato termicamente).

Le due tecniche però differiscono in maniera sostanziale dal punto di vista metallurgico coinvolgendo fenomeni fisici differenti: trasformazioni di fase e flusso liquido per il processo SLM contro i fenomeni diffusivi del processo SLS. Se da un lato quindi, la SLM permette di ottenere, con opportuna scelta della distribuzione granulometrica della polvere e dei parametri di processo, densità molto elevate, la SLS permette di realizzare componenti con composizioni altrimenti difficilmente ottenibili o metalli duri a scapito della densità, che dovrà essere ottimizzata attraverso un trattamento termico secondario.

Fcubic

Parallelamente al processo a letto di polveri, un forte interesse è nato anche riguardo al processo denominato FCubic che unisce la semplicità realizzativa di una stampante 3D alle opportunità fornite dal processo di sinterizzazione [18]. Con questa tecnologia è possibile produrre, con un apparecchiatura simile alle stampanti 3D per prototipazione in materiale polimerico, componenti in polvere metallica mantenuti coesi da un sottile strato di legante polimerico. Questo compatto tridimensionale (al verde, e quindi senza proprietà meccaniche), dovrà poi seguire un ciclo di eliminazione del legante e di sinterizzazione termica analogamente a quanto avviene per il processo MIM.

Si possono così produrre componenti di geometria complessa, senza bisogno di generare supporti per la loro costruzione e la cui fase di sinterizzazione termica assicura il raggiungimento di densità elevate.



Figura 8 Esempio di accessorio moda di geometria complessa prodotto con la tecnologia FCubic

LIMITI

La possibilità di introdurre in maniera massiva le tecnologie di Metallurgia delle polveri nel campo orafa non può prescindere dalla considerazione di una serie di fattori e dal soddisfacimento di requisiti fondamentali, tipici del settore quali

- Finitura superficiale: questo fattore, critico per il settore, è favorito in quelle applicazioni che prevedono una formatura in stampo, il cui grado di finitura superficiale influenzerà in maniera significativa quella del componente finale. Lo studio e sviluppo di sistemi di finitura superficiali innovativi, adatti ai manufatti prodotti attraverso metallurgia delle polveri rappresenta inoltre un indiscutibile vantaggio per la diffusione di tutti i processi di metallurgia delle polveri.
- Densità finale del compatto: funzione dei parametri di processo è il fattore che viene principalmente considerato nella valutazione della metallurgia delle polveri come tecnologia alternativa.
- Produttività e Flessibilità: la possibilità di produrre direttamente da CAD, senza bisogno di costruire stampi o punzoni permette grande flessibilità produttiva, da contro, per la produzione di grandi lotti, la possibilità di fare affidamento ad uno stampo con strette tolleranze dimensionali permette di ottimizzare tempi e costi della produzione.
- Complessità geometrica: è funzione del tipo di processo e risulta essere uno dei fattori discriminanti tra i diversi processi.
- Proprietà meccaniche e Caratteristiche innovative: la possibilità di ottenere caratteristiche di durezza e resistenza ottimizzate o addirittura non confrontabili con quelle tradizionali è uno dei punti di forza del processo di metallurgia delle polveri in genere.

- Varietà dei leghe producibili: rimane ancora un limitazione se confrontata con il tradizionale processo di microfusione, destinata a venir meno con la diffusione ad ampio raggio delle tecniche MdP
- Investimento in apparecchiature differenti rispetto a quelle tradizionali del processo orafa.

CONCLUSIONI

La Metallurgia delle Polveri si dimostra essere una tecnologia sufficientemente versatile che, nelle sue forme più o meno innovative può soddisfare le diverse esigenze di un mercato, come quello orafa, sempre più variegato. L'applicazione della Metallurgia delle Polveri apre allora molteplici opportunità sia nella produzione di un elevato numero di oggetti tutti uguali, permettendo di ottenerli in tempi ristretti, senza bisogno di lavorazioni successive e con una minimizzazione del materiale di scarto (facendo ricordo a tecnologie con il Metal Injection Moulding o le tecnologie di Field Assisted Sintering Technology per cui è prevista la realizzazione di uno stampo metallico), sia nella realizzazione di piccolissimi lotti produttivi o di pezzi unici, anche a livello prototipale, come nelle tecnologie di Additive Manufacturing (FCubic e SLS\SMS).

Da queste poliedricità di questa famiglia di tecnologie nasce quindi l'interesse sostanziale all'ulteriore sviluppo delle polveri e all'ottimizzazione dei diversi parametri di processo, determinato dalla possibilità di sostituire con tecnologie della Metallurgia delle Polveri molte diverse tecniche del processo produttivo tradizionale

REFERENCES

- [1] Salak, A.: Ferrous powder metallurgy, Cambridge, 1995
- [2] Höganäs handbook for sintered components: 1. material and powder properties, Höganäs AB (2004)
- [3] Höganäs handbook for sintered components: 2. production of sintered components, Höganäs AB (2004)
- [4] Sanderow, H.I., Prucher, T.: Mechanical properties of diffusion alloyed steels: Effect of material and processing variables, P/M Conference 1994; 1-14; Toronto, May 1994
- [5] Conrad, H., "Enhanced phenomena in metals with electric and magnetic fields: I electric fields", Materials Transactions, 46 (6) (2005)
- [6] Orrù, R., et al., "Consolidation/synthesis of materials by electric current activated/assisted sintering", Materials Science & Engineering R, 63 (4-6) (2009)
- [7] Fais A. "Processing characteristics and parameters in capacitor discharge sintering", J.Mat.Proc.Tech., Vol.210, 15, 19 Nov. 2010
- [8] Fais A. "Fast sintering of nanocrystalline copper", Met.Mat.Trans.A, Vol.43 (5), pp. 1517-1521
- [9] Strauss J.T, "Metal Injection Moulding (MIM) for Gold Jewellery Production", Gold Technology, No 20, November 1996, p.17
- [10] German R.M. and Bose A., Injection Molding of Metals and Ceramics, Princeton, New Jersey, USA, 1997.
- [11] Merhar, "Overview of Powder Injection Molding", Metal Powder Report, May 1990, 339
- [12] Mulin H. et al, "Contribution to the development of 18 karat gold alloy shaped by MIM", 2010 PM International Conference Proceedings
- [13] Fischer-Buehner J., et al., "Rapid jewelry manufacturing by laser melting of precious metal powders (PLM): fiction or future?" *The Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology 2012*, ed. Eddie Bell.
- [14] Zito D., et al. "Laser Developments in Selective Laser Melting Production of Gold Jewelry " *The Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology 2012*, ed. Eddie Bell.

Town online sfs 2005

[15] Wang X et al T. "Limit of accuracy in laser fabrication with metal powder". *Front. Optoelectron. China* 2010, 3 (2), 190-193.

[16] Kumar S., "Selective Laser Sintering: A Qualitative and Objective Approach." *JOM* (2003 October).

[17] Khan M., et al., "Selective Laser Melting (SLM) of pure gold". *Gold Bulletin*, 43 (2).

[18] Cooper F., "Sintering and Additive Manufacturing: The New Paradigm for the Jewelry Manufacturer" *The Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology 2012*, ed. Eddie Bell.