

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA



FACOLTA' DI INGEGNERIA

DIPARTIMENTO DI TECNICA E GESTIONE DEI SISTEMI INDUSTRIALI

Tesi di Laurea Triennale

**Studio delle Leghe di Titanio ottenute
mediante
Additive Manufacturing**

Relatore:

Prof. Filippo Berto

Laureando:

Daniele Dalla Vecchia

ANNO ACCADEMICO 2015-2016

INDICE

SOMMARIO	3
INTRODUZIONE	5
CAPITOLO 1. <u>LEGHE DI TITANIO ED APPLICAZIONI</u>	7
1.1 LE LEGHE ALFA	8
1.2 LE LEGHE ALFA-BETA	9
1.3 LE LEGHE BETA	9
1.4 TRATTAMENTI TERMICI	10
1.5 METODI DI FABBRICAZIONE.....	12
1.6 APPLICAZIONI	14
CAPITOLO 2. <u>ADDITIVE MANUFACTURING:GENERALITA'</u>	17
2.1 FUSED-DEPOSITION MODELING	18
2.2 STEREOLITHOGRAPHY	19
2.3 MULTIJET-POLIJET MODELING	20
2.4 SELECTIVE LASER SINTERING	21
2.5 ELECTRON-BEAM MELTING	22
2.6 THREE-DIMENSIONAL PRINTING	23
2.7 LAMINATED-OBJECT MANUFACTURING	23
2.8 SOLID-GROUND CURING	24
2.9 LASER-ENGINEERED NET SHAPING	26
CAPITOLO 3. <u>ADDITIVE MANUFACTURING APPLICATO ALLE LEGHE DI TITANIO</u>	27
3.1 MICROSTRUTTURA	29
3.2 COMPORTAMENTO MECCANICO	32
3.3 COMPORTAMENTO A FATICA	35
CAPITOLO 4. <u>ANALISI ECONOMICA DELL'ADDITIVE MANUFACTURING</u>	43
CONCLUSIONI	47
BIBLIOGRAFIA	49

SOMMARIO

Il presente lavoro di tesi ha come obiettivo lo studio delle leghe di titanio ottenute per Additive Manufacturing. La trattazione è suddivisa in tre capitoli.

Il primo capitolo riguarderà la descrizione delle leghe di titanio, ovvero verranno discusse le proprietà e caratteristiche fisiche e meccaniche delle principali leghe di titanio in commercio, analizzando la struttura alle varie temperature, la resistenza a fatica, durezza ed altro ancora. Successivamente il capitolo verterà sugli ambiti in cui le suddette leghe si applicano.

Nel secondo capitolo si inizierà a parlare di *additive manufacturing* (AM) affrontando generalità e metodi all'avanguardia più impiegati nelle industrie. Data la recente scoperta di questo processo produttivo, i dati presentati di seguito proverranno da molte fonti, che rimarranno sempre e comunque il più possibile autorevoli.

Nel terzo capitolo si arriverà al vero tema della tesi: infatti, dopo aver introdotto sia le leghe di titanio che l'AM, si potrà procedere con l'applicazione del nuovo metodo produttivo ai materiali precedentemente descritti, cercando di vergere su punti di notevole importanza quali resistenza a fatica, lavorabilità, caratteristiche microscopiche e macroscopiche, indicando inoltre le differenze rispetto le lavorazioni tradizionali (quelle ottenute per asportazione di materiale).

INTRODUZIONE

Il lavoro che si andrà a svolgere in questa tesi consiste nel descrivere un tema come l'additive manufacturing, il quale credo possa diventare in un futuro immediato, il principale metodo di fabbricazione di componenti aventi particolari geometrie ed applicazioni, come per esempio quelli utilizzati nel settore biomedico, aeronautico, automotive e molti altri.

Dato che il mio corso di studi è comunque orientato alla Gestione Aziendale, non posso non pensare anche al risvolto economico che l'AM porterebbe all'interno degli stabilimenti produttivi, permettendo:

- diminuzione di costi legati ai macchinari quali torni, frese, centri di lavoro, ... sostituiti da un unico impianto.
- diminuzione di costi dovuti da sfridi di materiale (trucioli).
- possibilità di realizzare lotti ancora più piccoli, arrivando addirittura alla produzione singola senza elevati costi e lunghi tempi di set up.
- possibilità di prototipazione e successiva produzione all'interno dello stesso stabilimento.

Purtroppo, data l'assoluta novità del tema trattato, non si può disporre di moltissimi dati sperimentali in quanto essi sono ancora in fase di elaborazione e studio da parte di molti ricercatori. Il mio obiettivo sarà comunque quello di convincere il lettore che il futuro nella produzione di componenti, non sarà più legato alle tecniche di *subtractive manufacturing* dove il materiale viene asportato, ma di *additive manufacturing* dove, contrariamente al caso precedente, il materiale viene addizionato. Per fare ciò cercherò di far notare le differenze tra i due metodi di lavorazione, facendo emergere i benefici che l'AM può portare sia economicamente all'interno delle aziende, sia per quanto riguarda le caratteristiche del prodotto finito legate dunque al suo comportamento durante l'esercizio per il quale è stato progettato.

LEGHE DI TITANIO ED APPLICAZIONI

Il titanio non si trova allo stato puro in natura, bensì all'interno di alcuni minerali quali ilmenite (FeTiO_3) che si può osservare in *figura 1*, leucosene e perovksite (CaTiO_3), dove lo si trova sotto forma di titanati, all'interno del rutilo (TiO_2), in *figura 2*, ed anatase in *figura 3* dove appare come ossido.

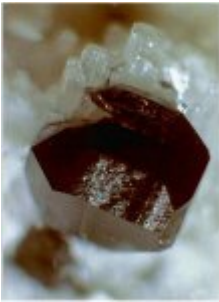


Figura 1



Figura 2

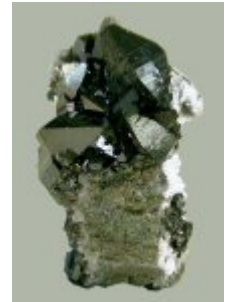


Figura 3

La fabbricazione del pigmento di TiO_2 avviene tramite l'estrazione e purificazione del diossido dal minerale e successivamente da una finitura composta da trattamento superficiale, essiccamento e macinazione. [1]

Il titanio presenta un comportamento allotropico, ovvero esiste in più forme cristalline: a temperatura ambiente presenta una cella esagonale compatta, comunemente indicata come fase α . Ad $885\text{ }^\circ\text{C}$ la cella esagonale α si trasforma in cubica a corpo centrato, chiamata anche fase β , stabile fino al punto di fusione. Nelle leghe a base di titanio, la temperatura della trasformazione allotropica è influenzata fortemente dalla presenza degli elementi di lega, i quali possono favorire la fase α , allargandone il campo di esistenza, oppure al contrario possono incrementare la fase β , abbassando la temperatura di trasformazione da CFC a CCC (*figura 4*). [2]

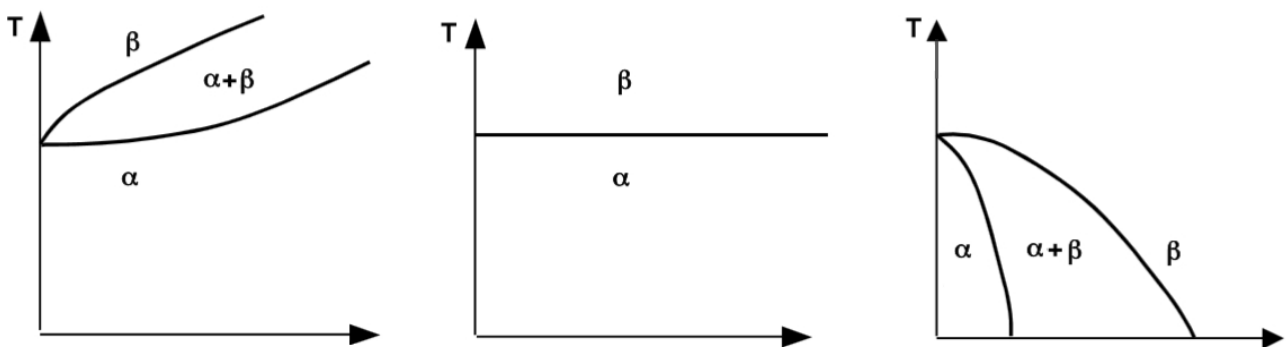


Figura 4 : a sinistra abbiamo l'effetto α -stabilizzante, al centro neutro ed a destra β -stabilizzante

Per fare un esempio, l'alluminio (Al) tende a stabilizzare la fase α , spostando la temperatura di trasformazione verso valori più alti (così come C, O, N), mentre il rame (Cu) ha effetto opposto, ovvero tende a diminuire la temperatura di trasformazione aumentando il campo di esistenza della fase β (così come H, Si, Cr, Nb, Fe, Mn, Mo, Ta e V).

Le leghe di titanio sono classificate in tre grandi categorie che si differenziano dalle fasi predominanti presenti nella microstruttura a T_{amb} .

Numero atomico	22
Massa atomica	47.90 g.mol ⁻¹
Elettronegativita' secondo Pauling	1.5
Densita'	4.51 g.cm ⁻³ at 20°C
Punto di fusione	1660 °C
Punto di ebollizione	3287 °C
Raggio di Vanderwaals	0.147 nm
Raggio ionico	0.09 nm (+2) ; 0.068 nm (+4)
Isotopi	8
Guscio elettronico	[Ar] 3d ¹ 4s ²
Energia di prima ionizzazione	658 kJ.mol ⁻¹
Energia di seconda ionizzazione	1323 kJ.mol ⁻¹
Energia di terza ionizzazione	2710 kJ.mol ⁻¹
Energia di quarta ionizzazione	4165 kJ.mol ⁻¹
Scoperta da	William Gregor nel 1791

Tabella 1

1.1 LE LEGHE ALFA

Le leghe α presentano una percentuale di fase β < 5%, mostrando una minore resistenza a corrosione a T_{amb} rispetto al titanio non legato, una resistenza meccanica relativamente bassa e difficilmente migliorabile attraverso trattamenti termici, in quanto la temperatura a cui avviene la trasformazione è pari a circa 1000°C (a causa della presenza massiccia di elementi α -stabilizzanti). Troviamo però fondamentalmente due metodi per migliorare le caratteristiche resistenziali della lega, ovvero mediante l'aggiunta di elementi come lo stagno (Sn) per indurire la matrice α oppure tramite l'introduzione di elementi β -stabilizzanti (come ad esempio Mo, Ta, V) ottenendo nella fase α la presenza di una piccola percentuale di β : questo tipo di leghe prende il nome di *leghe superalfa*. Uniche note positive sono la miglior resistenza ad ossidazione ad alte temperature, miglior saldabilità e duttilità rispetto gli altri tipi di leghe di Ti. [2]

1.2 LE LEGHE ALFA-BETA

Le leghe α - β , come si capisce dallo stesso nome, contengono sia elementi che stabilizzano la fase α sia elementi che stabilizzano la fase β , con una percentuale di quest'ultima compresa tra il 10 ed il 20%. Queste leghe sono le più diffuse in commercio (circa il 70% del Ti impiegato industrialmente è utilizzato per la fabbricazione di queste leghe) in quanto presentano un'alta resistenza meccanica, anche se a loro sfavore troviamo una bassa lavorabilità rispetto alle leghe α . Esse possono essere trattate termicamente per migliorare le caratteristiche di resistenza meccanica, anche se prima di sottoporre i componenti a trattamento termico, è necessario eseguire un'accurata pulizia, sgrassatura ed asciugatura in modo tale da poter evitare la contaminazione del materiale, con conseguenti pericoli di infragilimento e tendenza alla corrosione sotto sforzo. [2]

La lega Ti-6Al-4V è quella che trova il più largo impiego (circa il 45% della produzione complessiva).

1.3 LE LEGHE BETA

Le leghe β , ricche di elementi atti a stabilizzare la fase β appunto, possono presentare a temperatura ambiente unicamente questa fase solo se si opera con velocità di raffreddamento appropriate; a causa dell'elevato contenuto degli elementi β -stabilizzanti, queste leghe hanno densità maggiore (4,84 - 5,06 g/cm³) rispetto alle leghe α e α - β , di conseguenza, i valori del rapporto resistenza/densità sono inferiori rispetto a quelli delle altre leghe di Ti. Le leghe β sono instabili e la precipitazione di fase α nella fase β metastabile è un metodo usato per rinforzarle, portandole quindi ad avere una buona durezza, una buona lavorabilità a freddo (quando sono trattate in soluzione) e presentando inoltre un'alta resistenza quando invecchiate.

Poiché la struttura cubica del titanio in fase β contiene più piani di scorrimento rispetto alla forma esagonale α , la lega β è più facilmente deformabile. [2]

Dopo questa breve presentazione delle varie forme in cui possiamo trovare il Titanio in commercio, si procederà con una descrizione dei principali trattamenti termici e gli effetti che questi hanno su di esso, cercando di non soffermarmi troppo su questo tema in quanto è di secondaria importanza rispetto al vero scopo della mia tesi di ricerca.

1.4 TRATTAMENTI TERMICI

L'elevata reattività del titanio, soprattutto ad alte temperature, obbliga l'operatore che esegue il trattamento termico sul materiale a pulire, sgrassare ed asciugare precedentemente il componente; se non si rispetta questa procedura, può esserci una contaminazione del materiale con un conseguente rischio di fragilimento o tendenza alla corrosione sotto tensione.

Una volta eseguita questa procedura preliminare, si passa all'esecuzione del trattamento termico.

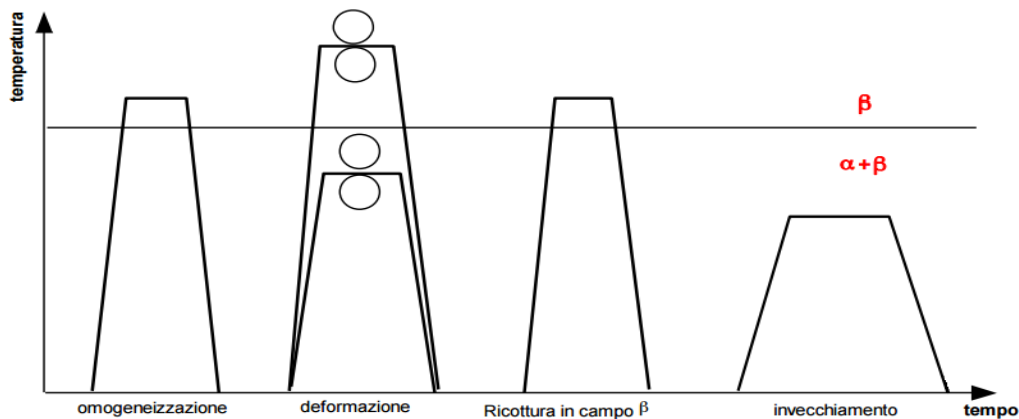


Figura 5: Grafici di vari TT [2]

1.4.1 DISTENSIONE

Uno dei trattamenti termici più comunemente adottati per le leghe di titanio, il quale comporta la riduzione degli effetti delle tensioni residue dovute ad eventuali lavorazioni precedenti (deformazione plastica, saldatura e TT) favorendo il mantenimento della stabilità geometrica e dimensionale del componente. Un parametro molto importante, che influenza la riduzione delle tensioni della lega di titanio è la temperatura di distensione che varia in base agli elementi presenti e che comunque non deve modificare l'effetto di trattamenti termici eseguiti precedentemente.[11]

1.4.2 RICOTTURA IN CAMPO β

La ricottura in campo β è una ricottura di ricristallizzazione (processo mediante la quale i grani deformati vengono sostituiti da una nuova serie di grani che vengono sottoposti a nucleazione e crescita finché non si consumano completamente i grani originali [19]). La scelta della temperatura di trattamento incide sulle dimensioni dei grani β ricristallizzati e di conseguenza sulle lamelle sviluppatesi al loro interno (anche la velocità di raffreddamento gioca un ruolo molto importante

sulle loro dimensioni). Per velocità di raffreddamento molto elevate si può avere una trasformazione di tipo martensitica con una microstruttura che assume una diversa morfologia ed un diverso reticolo cristallino in funzione del contenuto di elementi di lega. L'ottenimento di una struttura molto fine ed eventualmente la formazione di martensite, determina un incremento delle tensioni di snervamento e rottura e quindi della resistenza a fatica ad alto numero di cicli (in virtù del ridotto percorso libero delle dislocazioni). Diverso è l'effetto dimensionale della microstruttura sulla duttilità, che tende prima ad aumentare e quindi raggiunto un massimo, a diminuire al crescere della velocità di raffreddamento dalla temperatura di ricottura [20].

La ricottura è normalmente seguita da un trattamento d'invecchiamento al fine di ottenere la formazione del precipitato di rinforzo Ti-3Al nella fase α . [19]

1.4.3 RICOTTURA DUPLEX

Questo trattamento ha lo scopo di ottenere una struttura "bimodale" o "duplex" (da cui il nome del TT) costituita da globuli di fase primaria e da una struttura lamellare fine di fase α secondaria. Fondamentali, ancora più di quanto lo siano nella ricottura in campo β , sono i parametri relativi a tutte le fasi del processo a cui è sottoposto il materiale prima del trattamento termico: lamelle fini, infatti, permettono di ottenere nella struttura bimodale, grani equiassici di fase α primaria di minori dimensione e distribuiti in maniera più omogenea. I parametri da controllare durante la fase di deformazione plastica sono la temperatura ed il grado di deformazione a cui il materiale viene sottoposto: la temperatura, sempre al di sotto del β -transus, incide sulle percentuali relative di fase α e β presenti al momento della deformazione, mentre la deformazione di una struttura costituita da fase α oppure da fase β , inciderà sulla tessitura del reticolo cristallino della fase α che si svilupperà durante le successive fasi del trattamento termico [20]. Durante questo trattamento si ha la ridistribuzione degli elementi di lega verso le fasi che essi stabilizzano e questo può determinare una disomogenea composizione chimica del materiale, a livello microstrutturale, che condiziona il successivo trattamento d'invecchiamento (questo inconveniente può essere in parte ridotto mantenendo la frazione volumetrica di fase α primaria al di sotto del 15-20%). Il tempo di mantenimento in temperatura non influenza in maniera rilevante le dimensioni dei grani, in quanto la presenza contemporanea delle due fasi rende molto lento il processo d'ingrossamento, al contrario, la velocità di raffreddamento condiziona la microstruttura che si sviluppa dai grani di fase β ricristallizzata e deve essere sufficientemente elevata per ottenere una struttura lamellare, più o meno fine, od eventualmente una struttura costituita da fase β metastabile e/o martensite. Anche qui, il trattamento finale d'invecchiamento, ha come scopo quello di favorire la formazione del

precipitato di rinforzo Ti-3Al o lo sviluppo, dalla struttura martensitica o dalla fase β metastabile presente tra i globuli di fase α primaria, di una microstruttura estremamente fine costituita da fasi α e β stabili. La struttura bimodale, rispetto a quella lamellare, induce un moderato incremento della resistenza a snervamento ed a fatica a basso numero di cicli, ma un elevato aumento della duttilità.

1.4.3 RICOTTURA IN CAMPO $\alpha + \beta$

La ricottura in campo $\alpha + \beta$ ha come scopo l'ottenimento di una struttura costituita da grani di fase α primaria equiassici [20]. Rispetto a quanto riportato per le strutture bimodali (ottenute mediante la ricottura duplex), l'unico parametro del processo ad essere modificato è la velocità di raffreddamento dalla temperatura a cui è eseguita la ricottura di ricristallizzazione: se questa è sufficientemente lenta non si ha la formazione di una struttura lamellare fra i grani di fase α primaria presenti, ma si ha un loro ingrossamento. La dimensione dei grani può essere influenzata dalla microstruttura lamellare deformata di partenza e quindi dalla velocità di raffreddamento durante il trattamento di omogeneizzazione, oppure dalla temperatura a cui viene eseguita la ricottura di ricristallizzazione. Incrementando la temperatura del trattamento si riduce la frazione volumetrica di fase α presente nel materiale e questo favorirà, durante il raffreddamento, l'ingrossamento dei pochi grani α presenti; riducendola ad un valore opportuno, invece, è possibile ottenere una struttura costituita esclusivamente da grani di fase α ricristallizzati molto fini senza dover passare attraverso la ricristallizzazione dei grani di fase β . Il trattamento finale d'invecchiamento ha come unico scopo quello di promuovere la formazione dei precipitati di rinforzo Ti-3Al, come in precedenza. [19]

1.5 METODI DI FABBRICAZIONE

In questo paragrafo affronterò solamente la *forgiatura* in quanto ritengo sia uno dei processi che meglio sfrutta le potenzialità del titanio e che inoltre conosco meglio, in quanto ho avuto esperienze lavorative in un importante azienda che forgia componenti in titanio.



Figura 6: laminazione di un anello in titanio (Forgital Italy S.p.a.): www.forgital.com

1.5.1 FORGIATURA

La forgiatura è un metodo comune per ottenere componenti in titanio. La selezione del metodo di forgiatura ottimale dipende dalla complessità del disegno del prodotto finito, dalle proprietà meccaniche desiderate e soprattutto dalla microstruttura. Le leghe di titanio sono forgiate in una varietà di forme, con una vasta gamma di criteri di progettazione in base all'applicazione prevista: come classe di materiali, tuttavia, le leghe di titanio sono molto più difficili da lavorare rispetto le leghe di alluminio e le leghe di acciaio, pertanto i forgiati in lega di titanio sono realizzati con una qualità minore rispetto ad altri materiali (seppur lo studio e la progettazione del processo siano altrettanto precisi e complessi). La maggior parte dei forgiati in lega di titanio sono trattati termicamente dopo la forgiatura, con TT che vanno da semplici ricotture a processi con più stadi di di trattamento: tempra, invecchiamento, e/o ricottura (progettati per modificare la microstruttura della lega). Uno degli scopi principali della forgiatura a caldo (ovvero dove la temperatura del materiale è superiore ad un coefficiente pari a circa 0,6 moltiplicato per la temperatura di fusione del materiale stesso) è ottenere una combinazione di proprietà meccaniche che generalmente non esiste nelle classiche billette, ovvero si innalzano la resistenza alla trazione, la resistenza al creep, la resistenza alla fatica e la durezza. I processi di deformazione a caldo condotti durante la forgiatura costituiscono parte integrante della lavorazione termomeccanica complessiva di queste leghe per ottenere la microstruttura desiderata: la chiave del successo della forgiatura e del trattamento termico è la temperatura della curva di trasformazione β : più alta è la temperatura di lavorazione nella regione $\alpha + \beta$, più fase β è disponibile per la trasformazione durante il raffreddamento.

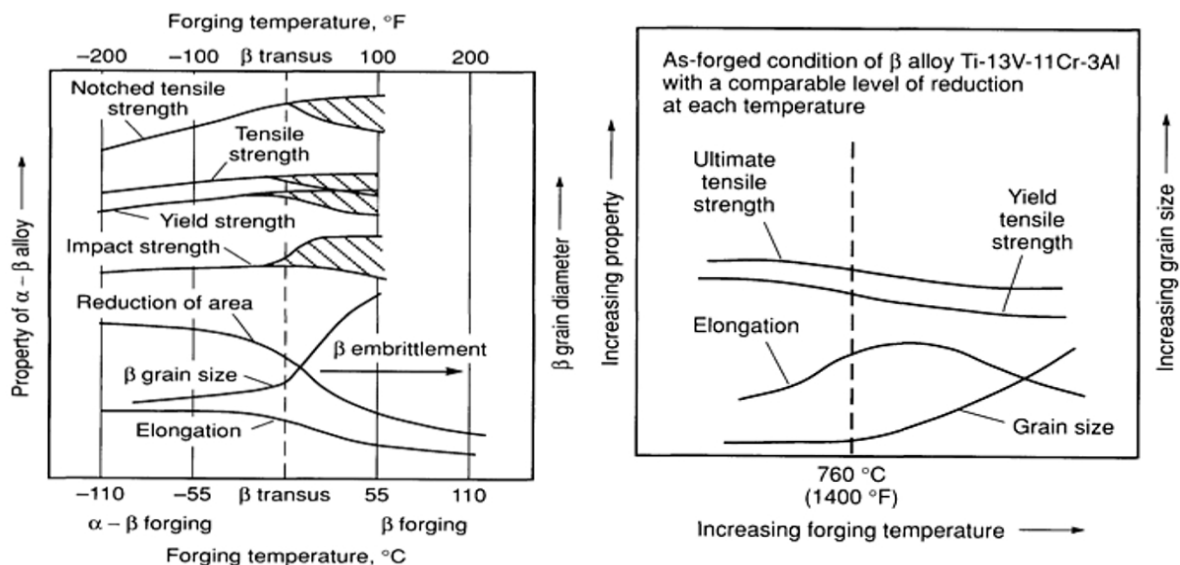


Figura 7: diagrammi proprietà-temperatura

1.6 APPLICAZIONI

Le applicazioni del titanio sono innumerevoli ma, come descritto nel paragrafo precedente, il settore aerospaziale è tra i principali ambiti in cui esso trova largo impiego, sia nelle strutture che nei componenti del motore di aerei, satelliti etc.. Per quanto riguarda le applicazioni che richiedono un'elevata resistenza a corrosione, troviamo un uso massiccio nell'industria chimica e petrolchimica come pompe e serbatoi di stoccaggio e nell'ingegneria marina in navi, sottomarini, piattaforme petrolifere e molto altro ancora, mentre nel settore della produzione di energia lo troviamo in scambiatori di calore a piastre, nei condensatori, nelle tubazioni che richiedono usi gravosi e nelle palettature delle turbine (un uso recente è quello del contenimento di rifiuti a bassa radioattività, come combustibili esauriti da centrali nucleari). Nel ramo della medicina, ovvero nel campo biomedico si utilizzano sempre più spesso componenti in titanio come protesi di ginocchia e filo per suture (Ti-15Mo-5Zr-3Al). Per quanto riguarda l'automotive, in questi anni si sono iniziati a studiare nuovi tipi di valvole e sospensioni che coinvolgono l'uso di questa lega, anche se devono ancora essere messi in commercio (eccetto nel settore delle corse automobilistiche). Nella figura sottostante si può notare come un tipico ciclo di vita del prodotto inizia con la sua introduzione nel mercato, seguita da diverse fasi, più o meno definite: crescita/sviluppo rapido, maturità e declino finale: si può osservare come il titanio sia ancora nella piena fase di crescita, ci aspettiamo dunque che nei prossimi decenni esso troverà sempre un più largo impiego comportando dunque un conseguente abbassamento dei suoi costi. [27]

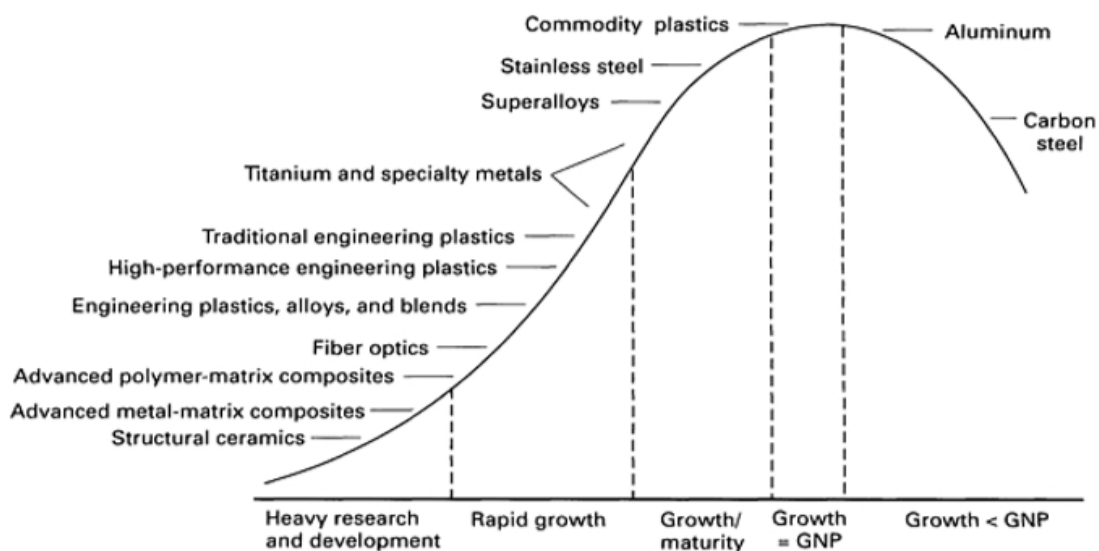


Figura 8: ciclo di vita dei principali materiali in commercio

In conclusione, il titanio avendo un comportamento allotropico, se viene sottoposto a trattamenti termici, subisce una modifica notevole alla microstruttura e conseguentemente alle sue proprietà meccaniche. I risultati ottenuti sono però fortemente influenzati dalle lavorazioni a cui il materiale è sottoposto prima di essere trattato termicamente. Le microstrutture tipiche di queste leghe sono: lamellare, bimodale ed equiassica (che corrispondono agli ultimi tre tipi di trattamenti termici esposti). Il comportamento a trazione ed a fatica del materiale è legato alle dimensioni delle lamelle ed alle dimensioni dei grani nelle strutture costituite da fase α equiassica, infatti le varie microstrutture, influenzando la lunghezza effettiva di scorrimento delle dislocazioni e/o la propagazione di eventuali cricche presenti, determinano la risposta del materiale alle sollecitazioni esterne. Tenendo presente l'influenza sulle proprietà meccaniche, si può comunque affermare che le microstrutture duplex forniscono la migliore combinazione tra resistenza meccanica, duttilità e tenacità a frattura, invece le strutture lamellari sono caratterizzate da una ottima tenacità, mentre le strutture costituite da fase α (completamente o parzialmente equiassica) mostrano una buona duttilità ed una discreta resistenza meccanica e tenacità. [19]

Concluso questo capitolo in cui ho cercato di introdurre il Titanio e le sue leghe, toccando i punti più importanti senza troppo approfondirli, si descriveranno ora i principali metodi di additive manufacturing che sono ad oggi presenti, cercando anche qui di essere il più chiaro possibile, accompagnando quindi le descrizioni letterarie da grafici e tabelle. Ho cercato di reperire informazioni da più fonti in modo tale da poter trovare i dati il più possibile realistici, che possano dunque essere affidabili. Nel prossimo capitolo quindi darò una breve descrizione dei metodi AM senza però applicarli alle leghe di Ti, argomento che verrà trattato nell'ultimo capitolo, ovvero il capitolo 3, in quanto ho ritenuto doveroso dare prima informazioni riguardanti sia il processo di studio che il materiale in esame.

ADDITIVE MANUFACTURING: GENERALITA'

L'*Additive Manufacturing* (AM) è una metodologia che, utilizzando tecniche produttive molto diverse tra loro, consente la realizzazione di oggetti (componenti, semilavorati o prodotti finiti) generando e sommando strati successivi di materiale (da cui il nome di AM): questo metodo innovativo ha rivoluzionato la produzione tradizionale, in cui invece si procede per sottrazione dal pieno (*subtractive manufacturing*) tramite operazioni quali tornitura, fresatura, etc.. Essa è nata per concretizzare lo sviluppo di un nuovo prodotto, tramite la costruzione del prototipo (che possa poi decretare la validità del progetto in via di sviluppo). Molte volte la preparazione del prototipo richiede molti mesi di intenso lavoro: scelta e settaggio dei macchinari, reperimento degli utensili per le lavorazioni e molte altre attività che implicano un conseguente aumento dei costi e dei tempi (in un mercato come quello odierno, se si lancia in produzione il prodotto prima di altri, aumentano le probabilità di ottenere un vantaggio competitivo rispetto alla concorrenza); si è quindi pensato un metodo per creare nuovi componenti cercando di contenere i due fattori principali che ho elencato precedentemente, ovvero i tempi ed i costi: la risposta a questa domanda è l'AM che ha introdotto la *prototipazione rapida* (*rapid prototyping*); successivamente questo nuovo metodo di produzione è stato introdotto anche per la produzione in serie. Tutte le operazioni di questo genere richiedono software sofisticati: un primo step è la produzione di un elaborato, per esempio in CAD, del componente, successivamente il programma crea un modello sovrapponendo delle "fette" tridimensionali di materiale (tutto ciò richiede comunque la presenza di un operatore che governi il processo). Dopo questa fase iniziale la macchina funziona autonomamente e senza il controllo umano: al termine della lavorazione (che va da pochi minuti ad alcune ore) un operatore si occupa di finire il materiale ovvero può adoperare una sabbiatura o lucidatura sul componente. Anche se quest'ultimo step può sembrare molto lungo, nel complesso, mediante AM si sono ridotti drasticamente i tempi di produzione. [13]

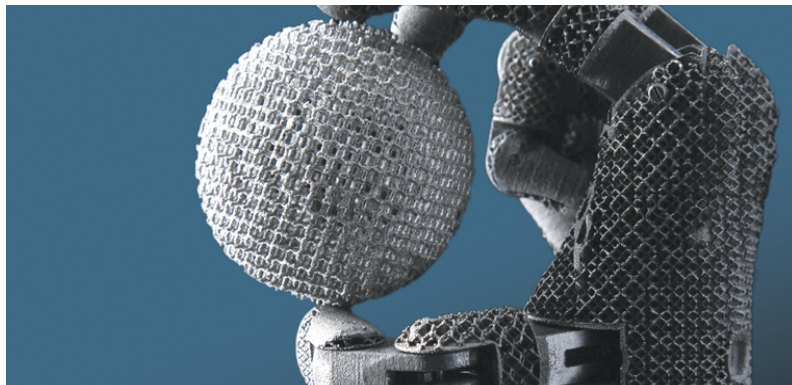


Figura 9: componenti ottenuti mediante additive manufacturing (ORNL)

Dopo questa breve introduzione, passo alla descrizione dei vari metodi di AM utilizzati:

- **Fused-deposition modeling**
- **Stereolithography**
- **Multijet (Polijet) modeling**
- **Selective laser sintering**
- **Electron-beam melting**
- **Three-dimensional printing**
- **Laminated-object manufacturing**
- **Solid-ground curing**
- **Laser-engineered net shaping**

2.1 FUSED-DEPOSITION MODELING

Il metodo FDM crea oggetti tridimensionali mediante il computer generando modelli i quali possono anche essere derivati da scansioni di tomografia computerizzata, risonanza magnetica o dati del modello creati da sistemi di digitalizzazione di oggetti 3D. FDM utilizza un piccolo estrusore a temperatura controllata per forzare un filamento di materiale termoplastico e depositare il polimero semi-fuso su una piattaforma, uno strato dopo l'altro. Il monofilamento è mosso da due rulli e agisce come un pistone per guidare il filo estruso semi-fuso. Al termine di ogni strato completato, la piattaforma di base si abbassa e lo strato successivo può essere depositato. Il percorso di deposizione ed i parametri per ogni strato sono designati in base al materiale utilizzato, le condizioni di fabbricazione, le applicazioni di tale componente e le preferenze del progettista. La tolleranza più stringente che può essere raggiunta è di 0,025 mm. [13-14]

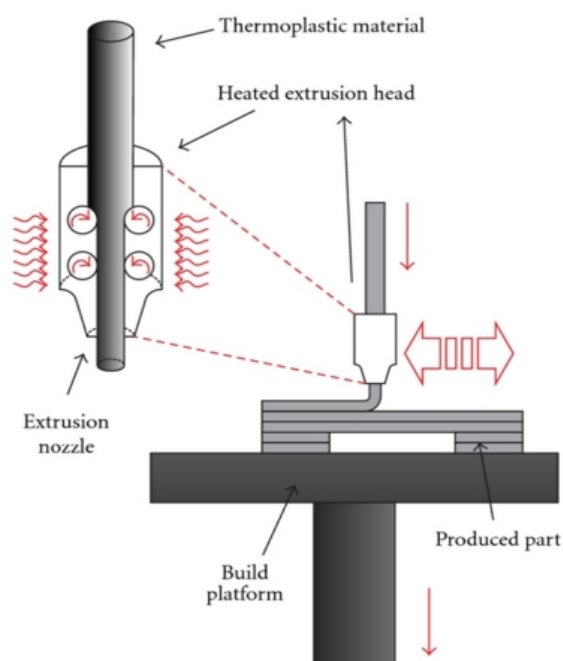


Figura 10: processo fused-deposition modeling (Hindawi Publishing Corporation)

2.2 STEREO LITHOGRAPHY

Questo processo si basa sul principio della polimerizzazione (indurimento) di un fotopolimero liquido. Una vasca, comandata mediante un meccanismo per cui la piattaforma può essere abbassata e sollevata, è riempita con un polimero liquido fotoinduribile (il liquido è una miscela di monomeri acrilici, oligomeri e un fotoiniziatore ovvero un composto che subisce una reazione fotoassorbente). Quando la piattaforma è nella sua posizione più alta ed è inoltre presente uno strato superficiale di liquido, un laser genera un fascio ultravioletto focalizzato su una superficie selezionata del fotopolimero e poi si sposta nel piano x-y. Il fascio indurisce il fotopolimero e quindi produce un corpo solido; successivamente la piattaforma viene poi abbassata a sufficienza per coprire il polimero solidificato con un altro strato di polimero liquido e la sequenza viene ripetuta. Si noti che come per FDM, la stereolitografia può utilizzare un materiale di supporto più diluito. Dopo il suo completamento, il componente viene rimosso e pulito mediante ultrasuoni e/o con un bagno di alcool. La tolleranza più stringente che può essere raggiunta dipende dalla nitidezza del fascio del laser, ma tipicamente è di circa 0,0125 mm. [13]

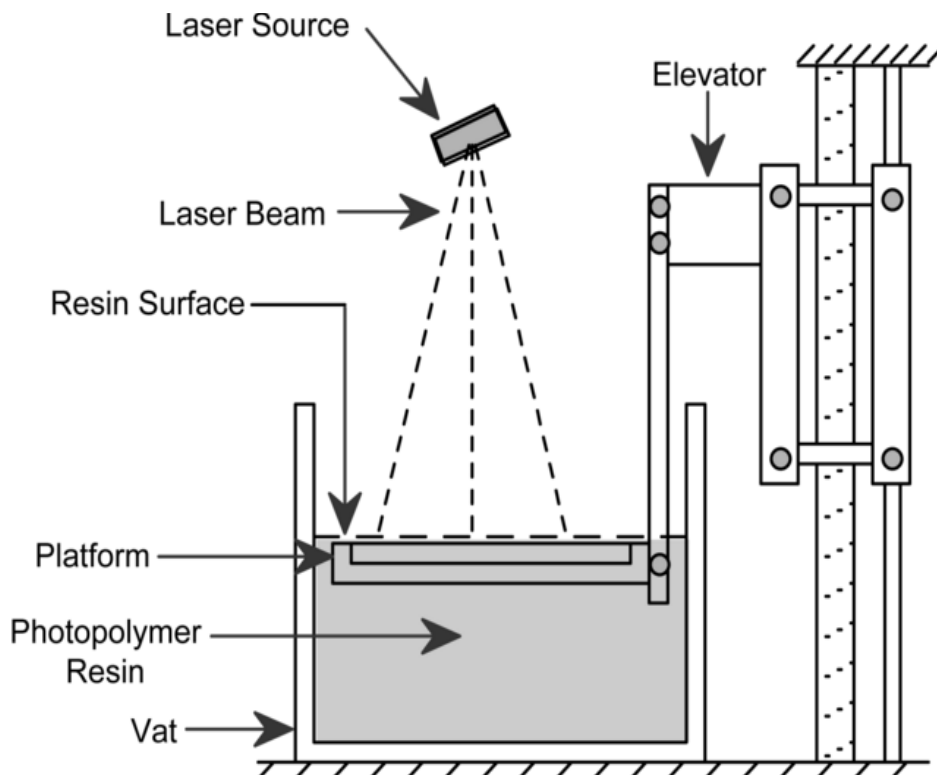


Figura 11: processo stereolitografia (SolidSmack)

2.3 MULTIJET-POLIJET MODELING

La modellazione Multijet è simile alla stampa a getto d'inchiostro, in cui le testine di stampa depositano il fotopolimero sul vassoio. Le lampade ultraviolette, a fianco dei getti, solidificano e induriscono ogni strato, eliminando così la necessità di indurimento successivo al processo che è necessario nella stereolitografia. Il risultato è una superficie liscia composta da strati sottili di dimensioni fino a 16 μm che può essere lavorata immediatamente dopo che il processo è completato; nel MJM vengono utilizzati due materiali differenti: un primo materiale è utilizzato per il modello reale, mentre una seconda resina simile al gel viene utilizzata per il supporto: ogni materiale è allo stesso tempo sparato e indurito, strato dopo strato (nel momento in cui il modello è completato, il materiale di supporto viene rimosso con una soluzione acquosa). I principali vantaggi sono la capacità di evitare la pulizia ed una miglior risoluzione grazie agli strati prodotti molto più sottili.

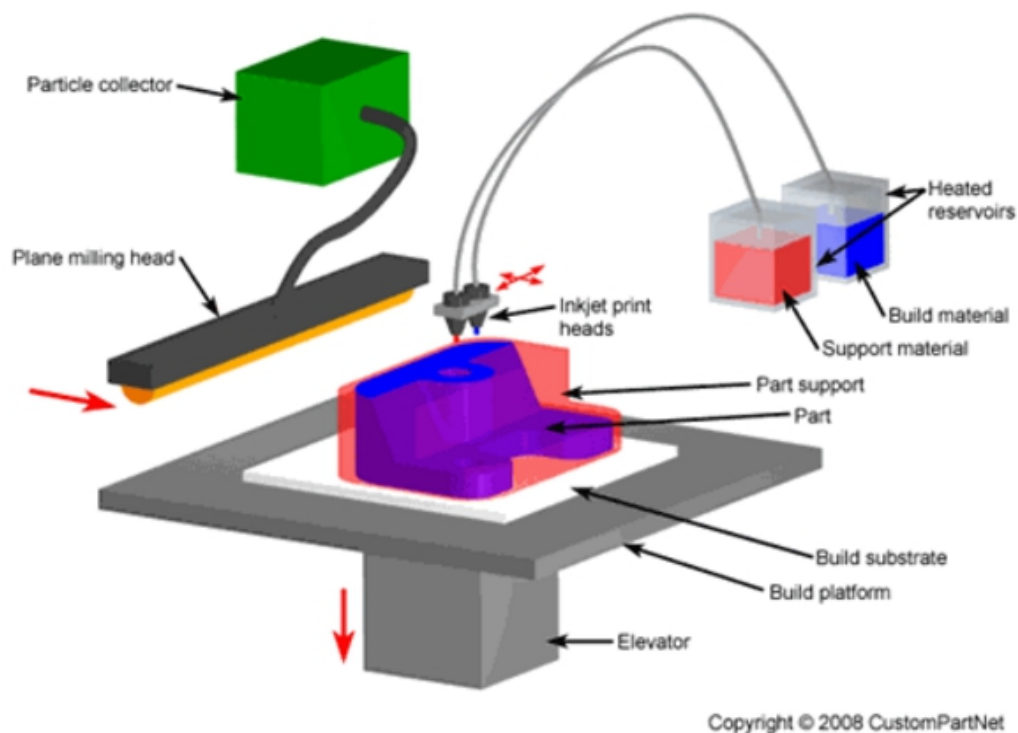


Figura 12: processo multijet modeling (CustomPartNet)

2.4 SELECTIVE LASER SINTERING

Selective laser sintering (SLS) è un processo di prototipazione rapida che permette di generare componenti 3D complessi mediante una solidificazione successiva di strati di materiale in polvere posti uno sopra l'altro. La solidificazione si ottiene tramite la fusione o sinterizzazione di aree selezionate degli strati di polvere successivi utilizzando l'energia termica alimentata attraverso un fascio laser (come si vede in *figura 13*). [15]

Il fondo della camera di lavorazione è dotato di due cilindri:

- Un cilindro di alimentazione della polvere, la quale è aumentata in modo incrementale attraverso un meccanismo a rullo;
- Un cilindro che si abbassa gradualmente mano a mano che il componente viene creato;

Innanzitutto, un sottile strato di polvere (tipicamente 0.1-0.3 mm di spessore) viene depositato nel cilindro di destra presente nella *figura 13* mediante un rullo, poi un raggio laser guidato da un computer di controllo del processo, utilizzando le istruzioni generate dal programma CAD tridimensionale della parte desiderata, è focalizzato in quello strato, tracciando e sinterizzando una particolare sezione trasversale in una massa solida (la polvere in altri settori rimane inalterata). Un altro strato di polvere viene quindi depositato: questo ciclo viene ripetuto più e più volte fino a quando l'intero particolare è stato prodotto. [13]

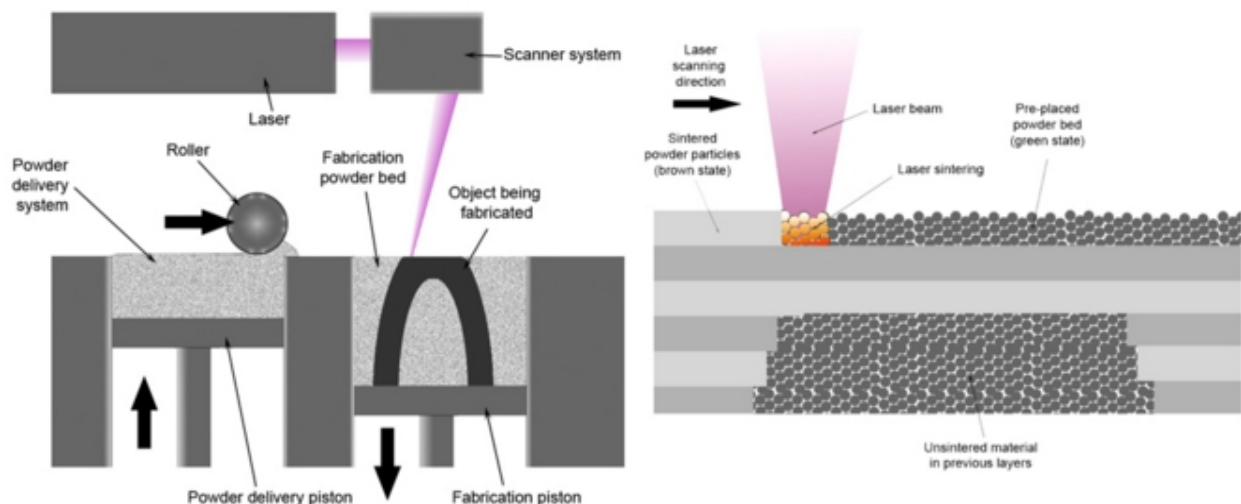


Figura 13: processo selective laser sintering (Wikipedia)

2.5 ELECTRON BEAM MELTING

Il processo EBM avviene in una camera in cui è stato creato il vuoto, costituita da un serbatoio con una piattaforma regolabile verticalmente ed un "sistema a rastrello" per l'applicazione della polvere. Nel cannone elettronico, posto sopra la piattaforma su cui è presente la polvere, gli elettroni sono emessi da un filamento di tungsteno ad alte temperature, accelerati da una tensione di circa 60 kV ad una velocità tra 0,1 e 0,4 volte la velocità della luce e concentrati dalle lenti elettromagnetiche ad alta energia. Gli elettroni colpiscono le particelle di polvere nella piattaforma e rilasciano la loro energia cinetica per lo più come energia termica: a seconda dell'energia del fascio elettronico, le particelle di polvere sono completamente fuse. Il processo EBM inizia con il preriscaldamento di uno strato di polvere, che viene omogeneamente applicato su una piastra, successivamente l'elettrone presente nel fascio, scioglie le particelle di polvere (inizialmente libere) in un solido compatto avente la forma desiderata. La piattaforma di processo con lo strato generato si abbassa di uno spessore dello strato, un nuovo strato di polvere viene applicato ed il processo è ripetuto. Successivamente, la parte viene raffreddata sempre sottovuoto oppure in una atmosfera in cui è presente elio. Una curiosità è che la pulizia delle parti create, viene fatta con la stessa polvere usata nella costruzione in modo tale che la polvere rimossa può essere riutilizzata per un nuovo processo. [16]

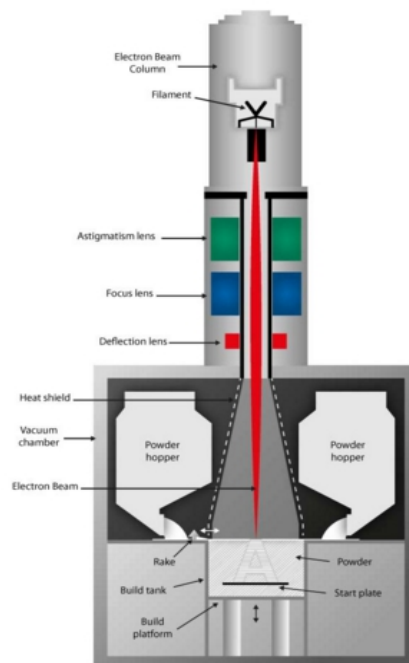


Figura 14: processo electron beam melting (Arcam AB)

2.6 THREE-DIMENSIONAL PRINTING

Nel processo di stampa tridimensionale (3DP), una testina di stampa deposita un materiale legante inorganico su uno strato di polimero (oppure polvere di ceramica, metallo). Un pistone che sostiene il letto di polvere si abbassa gradualmente e ad ogni passo, uno strato viene deposto e quindi fuso dal legante. La stampa tridimensionale consente una notevole flessibilità dei materiali e dei leganti utilizzati: le polveri comunemente utilizzate sono miscele di polimeri, sabbia di fonderia e parti metalliche. I componenti ottenuti tramite il processo 3DP sono alquanto porosi e quindi possono avere resistenze minori rispetto ad oggetti ottenuti mediante altri metodi di additive manufacturing. La sequenza di generazione del prodotto finito è poi seguita da una sinterizzazione per bruciare il legante e fondere parzialmente le polveri metalliche (come in uno stampaggio ad iniezione di polvere). I metalli più comunemente utilizzati in 3DP sono gli acciai inossidabili, l'alluminio ed il titanio, mentre i materiali infiltranti sono tipicamente il rame ed il bronzo, i quali forniscono una buona capacità di scambio termico e di resistenza all'usura. [13]

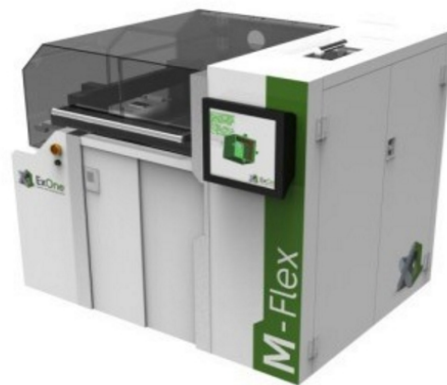


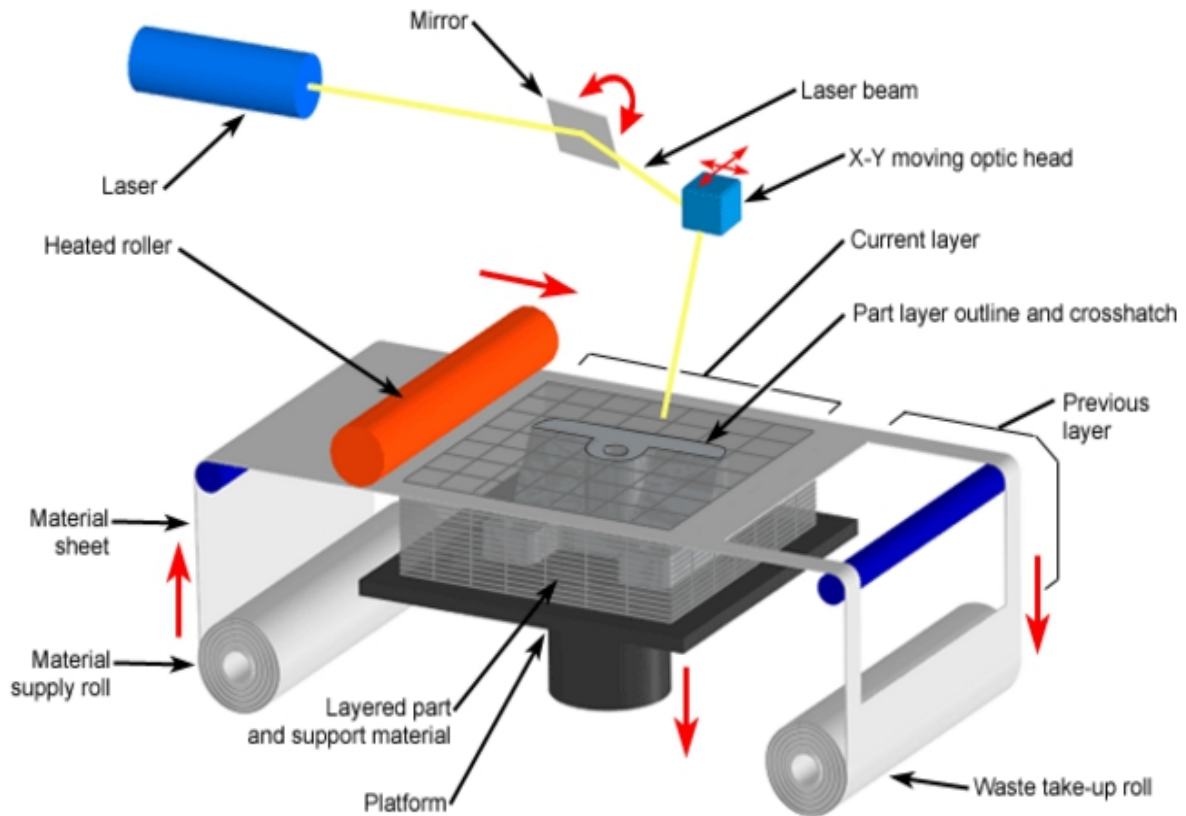
Figura 15: stampante 3D (modello M-Flex, Ex One)

2.7 LAMINATED-OBJECT MANUFACTURING

Il processo di LOM implica una fissazione di strati che sono legati adesivamente l'uno all'altro. Sono disponibili diverse varianti di questo processo: le versioni più semplici e meno costose coinvolgono l'utilizzo di software di controllo per produrre il prototipo ed un plotter da taglio (sono semplici macchine a controllo numerico che tagliano forme da fogli di vari materiali). [13]

La produzione di un oggetto laminato (LOM) è una delle tecniche di prototipazione additiva rapida (RP), dove una parte tridimensionale è costruita mediante una sequenza di strati: i due rulli bianchi rappresentati in figura, girando, preparano un strato su cui poi il laser può creare la sezione

desiderata (passando prima attraverso uno specchio per essere deviato nella direzione desiderata); proseguendo così si creano molti strati incollati l'uno all'altro da speciali additivi che reagiscono al calore ed alla pressione impressa dal rullo. Il pistone si abbassa e si ripete nuovamente il ciclo ovvero un altro foglio viene depositato, laminato e ritagliato dal laser. [17]



Copyright © 2008 CustomPartNet

Figura 16: processo laminated-object manufacturing (CustomPartNet)

2.8 SOLID-GROUND CURING

Questo processo è unico in quanto più "fette" di un componente sono fabbricate in una sola volta: come risultato, si ottiene una grande produttività rispetto a quella di altri processi di prototipazione rapida, tuttavia, l'SGC è uno tra i processi più costosi, di conseguenza la sua adozione è stata molto meno comune rispetto ad altri tipi di prototipazione rapida.

Fondamentalmente, il metodo consiste delle seguenti fasi:

- Il software crea una fetta alla volta e successivamente una maschera della stessa fetta è stampata su di una lastra di vetro mediante un processo di stampa elettrostatica simile a quella utilizzata nelle stampanti laser. E' necessaria una maschera perché l'area della sezione in cui si vuole avere il materiale solido, rimane trasparente;
- Mentre la maschera è in preparazione, un sottile strato di polimero fotoreattivo viene depositato sulla superficie di lavoro e si diffonde uniformemente;
- La fotomaschera è posta sopra il piano di lavoro ed una luce ultravioletta è proiettata attraverso la maschera. Laddove la maschera è chiara, la luce attraversa per indurire il polimero e provoca la "fetta" desiderata;
- La resina inalterata (ancora liquida) viene aspirata dalla superficie;
- La cera liquida (solubile in acqua) si diffonde in tutta l'area di lavoro, riempiendo le cavità precedentemente occupate dal polimero liquido non esposto. Poiché il pezzo è su una piastra di raffreddamento e l'area di lavoro rimane dunque fredda, la cera indurisce rapidamente;
- Lo strato viene quindi fresato in modo da ottenere lo spessore e la planarità corretta;
- Questo processo viene ripetuto strato dopo strato fino al completamento della parte.

L'SGC ha il vantaggio di permettere una elevata produzione. [13]

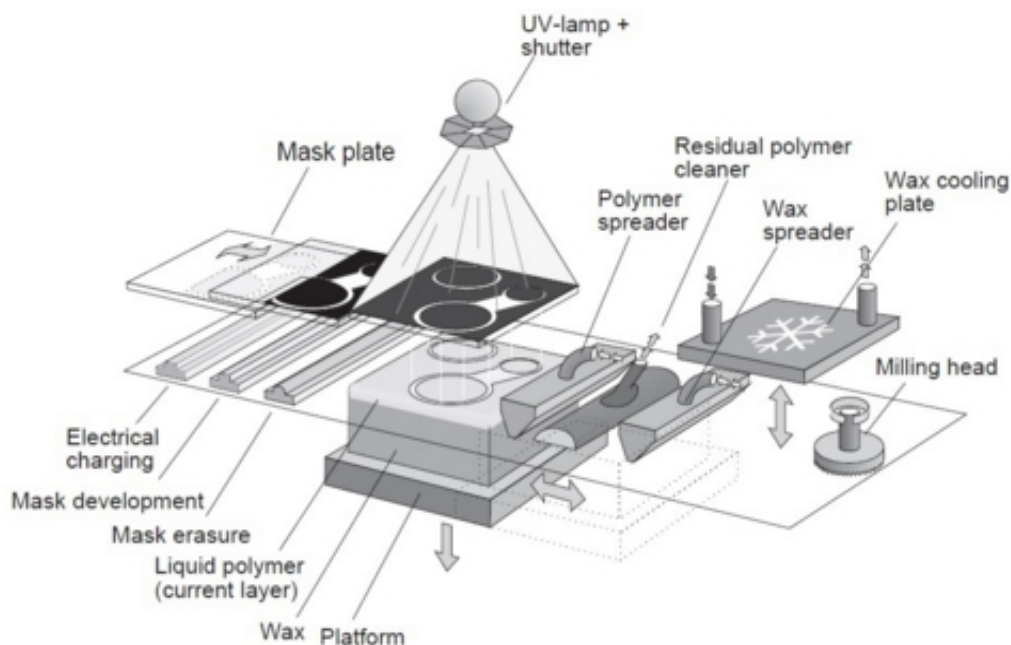


Figura 17: processo solid ground curing (Wikipedia)

2.9 LASER-ENGINEERED NET SHAPING

Il substrato di deposizione è allineato in base al punto di inizio desiderato del deposito: il dosatore di polvere alimenta l'ugello di erogazione della polvere, che crea un flusso di polvere che converge nel punto di deposito. Successivamente, il laser fornisce un fascio concentrato che viene consegnato sempre al punto di deposito: il fascio laser focalizzato scioglie la superficie del bersaglio e genera un piccolo bacino di materiale fuso; la polvere che viene sparata allo stesso punto viene assorbita nel bacino di fusione generando così un deposito che può variare da uno spessore di 0.127 mm ad uno di 1.016 mm, ampio da 1.016 mm a 4.064 mm. Il controllo del movimento per il deposito può essere programmato manualmente o può essere generato dal file CAD che viene elaborato dal software del sistema.

Si lavora molto spesso in atmosfera controllata (presenza di argon) contenente meno di 10 ppm di ossigeno. A causa dei piccoli bacini di fusione e dall'alta velocità di lavorazione, i depositi raffreddano molto velocemente (fino a 10.000 °C/s), generando dei grani avente struttura molto fine. [18]

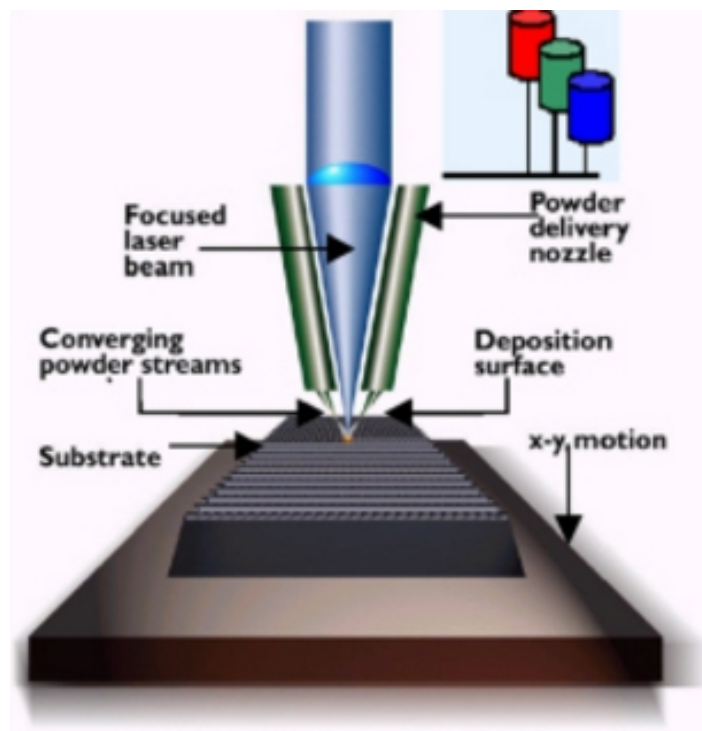


Figura 18: processo laser-engineered net shaping (RPM & Associated Inc.)

ADDITIVE MANUFACTURING APPLICATO ALLE LEGHE DI TITANIO

Le leghe di titanio sono tra i materiali più importanti in quanto fondamentali per lo sviluppo delle prestazioni in settori quali quello aerospaziale e quello biomedico, grazie alle ottime combinazioni di proprietà meccaniche con il comportamento alla corrosione. Tuttavia, il motivo principale per cui non si usa in quantità ancora maggiori è dovuto al prezzo elevato rispetto ad altri materiali (come molti tipi di acciai): nelle pubblicazioni degli ultimi anni, il prezzo oscillava attorno ai € 1.50 per libbra di TiO_2 e € 0.40 per libbra di $TiCl_4$ ed inoltre, il costo di estrazione rappresenta solamente una piccola frazione del costo totale di un componente fabbricato mediante metodi tradizionali, motivo per cui si sono cercati metodi alternativi di produzione che diminuissero i costi ma che allo stesso tempo permettessero proprietà meccaniche atte a mantenere standard comportamentali elevati. La risposta a questo problema è stata trovata grazie alle tecnologie AM. [21]

Structural metals	Consumption/year (10^3 metric tons)
Ti	50
Steel	700,000
Stainless steel	13,000
Al	25,000

Figura 19: consumo materiali annuo [21]

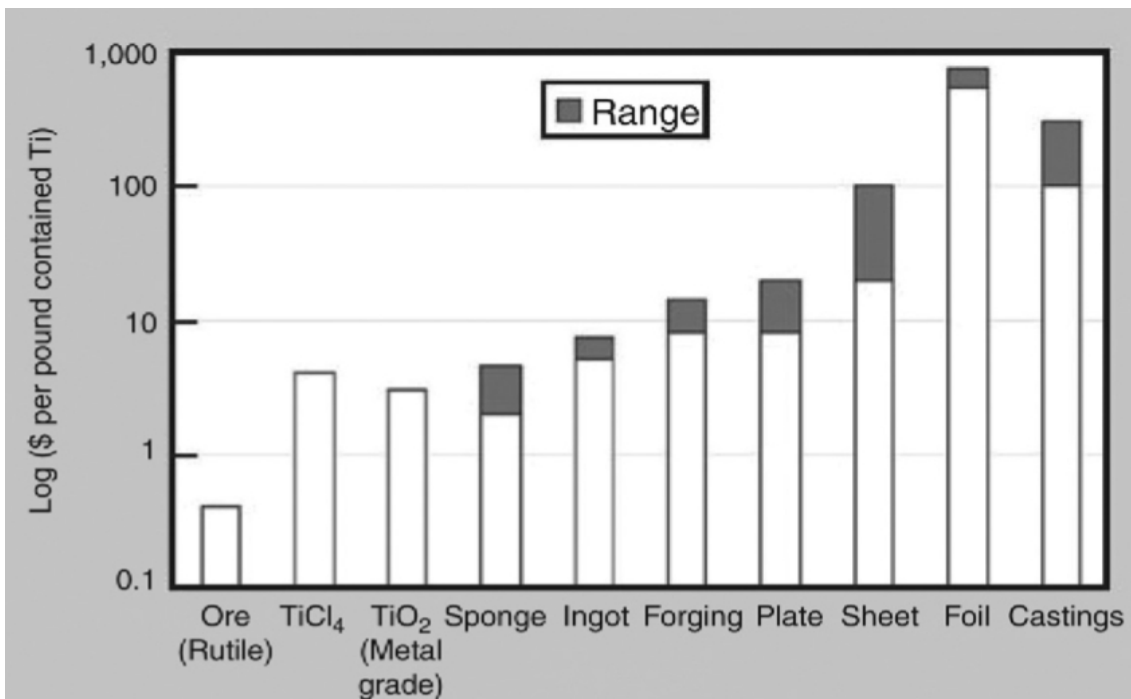


Figura 20: costo del titanio nelle varie forme [21]

La *tabella 2* riportata qui sotto, fornisce un confronto delle capacità, dei benefici e delle limitazioni delle più diffuse tecnologie AM utilizzate per la produzione dei componenti in titanio, mentre la *figura 21* le rapporta in termini di velocità di deposizione e di rugosità superficiale. Chiaramente, le tecnologie PBF offrono una migliore finitura superficiale dato che utilizzano una dimensione del raggio più piccola e minore spessore dello strato rispetto alle tecnologie DED, tuttavia, come conseguenza si ha che la velocità di deposizione è inferiore e quindi il processo risulta più lungo. Pertanto, se vogliamo attribuire un ambito di lavorazione per tipologia di processo AM, PBF è più adatto per componenti complessi, di piccole dimensioni che richiedono elevata precisione, mentre il processo DED è più adatto per la realizzazione di parti relativamente grandi ad una velocità di elaborazione elevata, ma con finitura superficiale grossolana.

Item	Laser based PBF (e.g., DMLS)	Electron beam based PBF (e.g., EBM)	Laser based directed energy deposition (e.g., DED)
Build envelop	Limited	Limited	Large and flexible
Beam size	Small, 0.1–0.5 mm	Small, 0.2–1 mm	Large, can vary from 2–4 mm
Layer thickness	Small, 50–100 µm	Small, 100 µm	Large, 500–1000 µm
Build rate	Low, cc/h	Low, 55–80 cc/h	High, 16–320 cc/h
Surface finish	Very good, Ra 9/12 µm, Rz 35/40 µm	Good, Ra 25/35 µm	Coarse, Ra 20–50 µm, Rz 150–300 µm, Depends on beam size
Residual stress	High	Minimal	High
Heat treatment	Stress relieve required, HIPing preferred	Stress relieve not required, HIPing may or may not be performed	Stress relieve required, HIPing preferred
Chemistry	ELI grade possible, negligible loss of elements	ELI grade possible, loss of Al need to be compensated in powder chemistry	ELI grade possible, negligible loss of elements
Build capability	Complex geometry possible with very high resolution Capable of building hollow channels	Complex geometry possible with good resolution Capable of building hollow channels	Relatively simpler geometry with less resolution. Limited capability for hollow channels, etc.
Repair/remanufacture	Possible only in limited applications (requires horizontal plane to begin remanufacturing)	Not possible	Possible (capable of adding metal on 3D surfaces under 5 + 1-axis configuration, making repair solutions attractive)
Feature/metal addition on existing parts	Not possible	Not possible	Possible. Depending on dimensions ID cladding is also possible
Multimaterial build or hard coating	Not possible	Not possible	Possible

Tabella 2 [21]

Un aspetto da sottolineare è riferito agli stati tensionali residui: mentre per i processi PBF e DED essi sono elevati e richiedono dunque un trattamento termico (che li annulla ma storce il componente in quanto la geometria dello stesso era tale con le tensioni residue, ma nel momento in cui le andiamo ad annullare, variano le dimensioni), il processo di EBM non crea questi stati tensionali e quindi non è necessaria l'esecuzione di alcun TT sul componente.

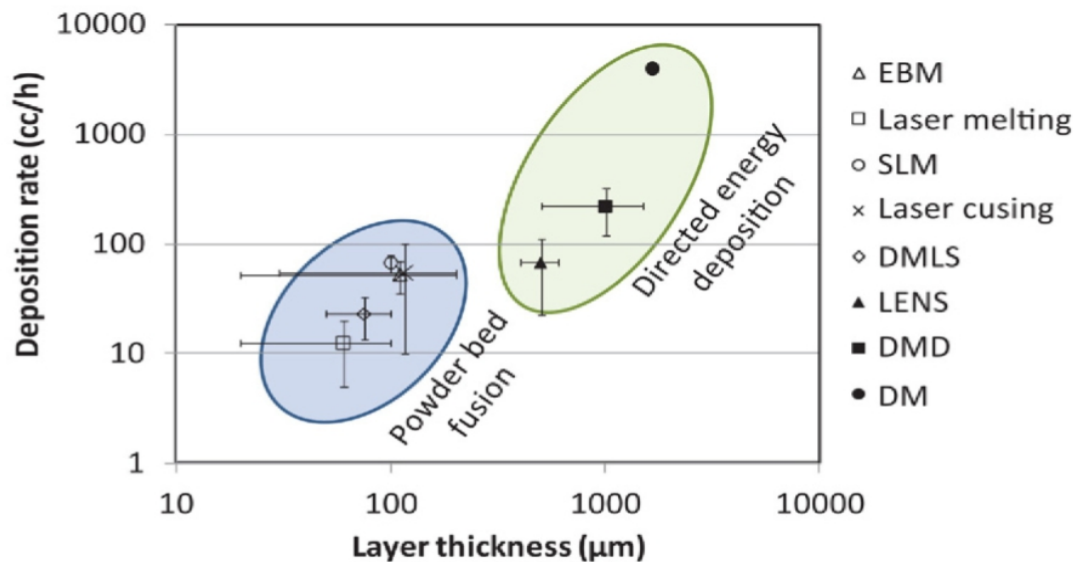


Figura 21: tabella comparativa sulla base di rugosità e velocità di deposizione [21]

3.1 MICROSTRUTTURA

La microstruttura dei componenti ottenuti tramite AM è molto differente da quella dei prodotti ottenuti mediante metodi tradizionali: chiaramente le tecnologie basate sull'utilizzo del laser offrono una maggiore resistenza, accompagnata da bassa duttilità a causa della formazione di martensite α dovuta al rapido raffreddamento, mentre i processi che utilizzano un fascio di elettroni (EBM) fanno sì che il componente mostri una microstruttura con fase β a causa del lento processo di raffreddamento nelle camere apposite in cui è stato creato il vuoto: questo induce ad una minor resistenza a trazione e ad una maggior duttilità.[21]

La figura 22 descrive le varie forme microstrutturali che possiamo trovare nella lega Ti-6Al-4V (una delle più utilizzate in commercio) ottenuta mediante produzione additiva e quelle dello stesso materiale ottenuto mediante processi tradizionali: come ho precedentemente esposto si notano le differenze tra un prodotto ottenuto mediante uso di laser o fascio di elettroni.

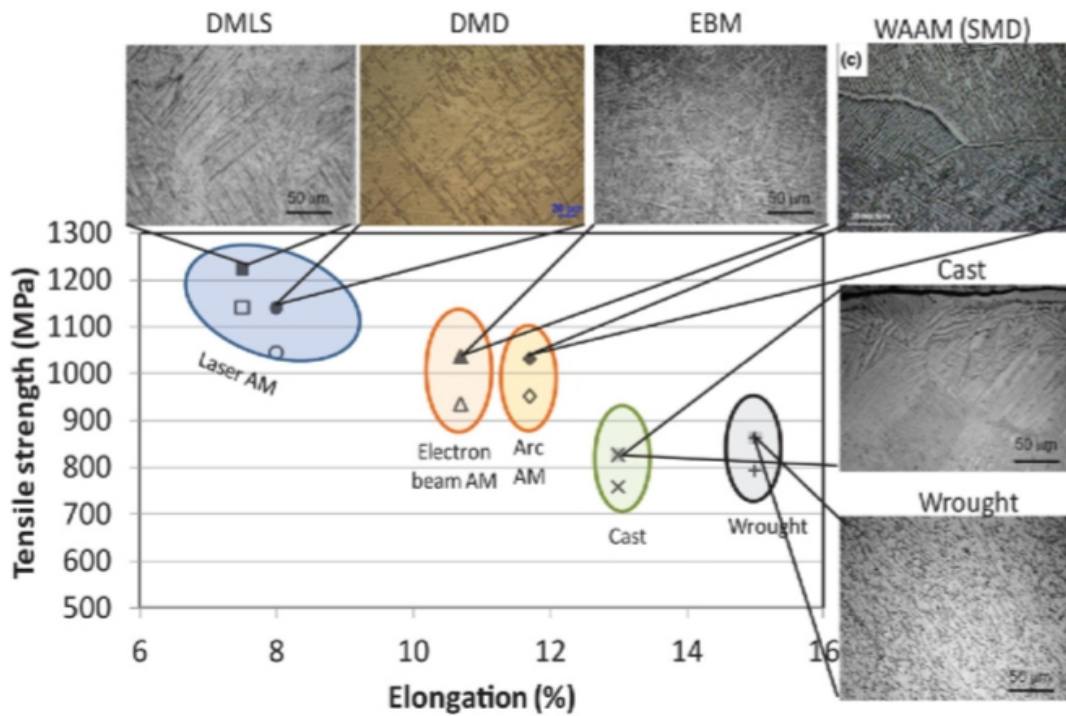


Figura 22: grafico rappresentante i diversi tipi di microstrutture [21]

L'effetto di queste varie microstrutture è ben visibile nel loro comportamento a trazione: un esempio ne è la microstruttura del materiale ottenuto con processo DMD e sottoposto (oppure no) ad HIPing (pressato isostaticamente a caldo) ed invecchiamento: senza HIPing esso mostra la struttura martensitica tipica prevista per il Ti-6Al-4V raffreddato rapidamente, mentre lo stesso materiale sottoposto ad HIP e invecchiato mostra α a bordo grano e piastrine di fase α grossolane intergranulari (questa transizione microstrutturale si riflette anche attraverso le loro proprietà di trazione). [21]

La posizione e l'orientamento dei componenti relativi al letto di polvere e la direzione di generazione sono stati studiati da un gran numero di ricercatori per trovare la correlazione del loro effetto nel profilo di temperatura durante la fabbricazione. La differenza tra i profili di temperatura lungo la direzione di costruzione (asse z) è dovuta alla temperatura presente nella piattaforma di costruzione (650-700°C) e dalla capacità termica dei materiali (presenti sottoforma di polvere): si ritiene che l'elevata temperatura della camera porti all'ottenimento di fase α martensitica formatasi durante la solidificazione rapida, altri ricercatori hanno considerato invece che la distanza tra la parte fabbricata e la piattaforma di costruzione non influenza significativamente la microstruttura e le proprietà meccaniche in generale. [22]

L'analisi microstrutturale sui provini in diverse posizioni relative alla piattaforma di costruzione, ha rivelato che lo spessore delle lamelle α varia con l'altezza e/o distanza dalla piattaforma di costruzione: questo fenomeno è attribuibile all'effetto della piattaforma di costruzione sulla storia termica di successivi strati che vengono aggiunti al semilavorato (si suggerisce che il tasso di raffreddamento aumenti in modo significativo con l'aumentare della distanza dalla piattaforma di costruzione). Tuttavia, le più grosse lamelle di fase α vicino alla piattaforma possono essere dovute all'esposizione più lunga degli strati inferiori alla temperatura della camera (tipicamente 650-700°C) rispetto agli strati superiori.

La morfologia del grano degli strati depositati di titanio, è determinata dalle condizioni di nascita e crescita, le quali sono fortemente dipendenti dagli stati termodinamici del bagno di fusione durante la rapida solidificazione che avviene nel processo: durante la formazione del componente, una parte dell'energia del laser assorbita, è usata per "catturare" le polveri metalliche ed in questo modo si crea un altro bagno di fusione, procedendo fino al completamento del prodotto, mentre la rimanente energia assorbita è usata per una rapida conduzione termica nel resto della massa del substrato. Infine, quando il processo di fabbricazione è terminato, vi è una fase di raffreddamento lento dalla temperatura presente nella camera di costruzione, fino a temperatura ambiente. Il primo stadio di raffreddamento è il più critico per la formazione della microstruttura perché la formazione di grano β si verifica durante la solidificazione e la trasformazione da fase β ad $\alpha + \beta$ inizia non appena la temperatura raggiunge la temperatura di β -transus della curva di trasformazione; sebbene i tassi di raffreddamento siano abbastanza alti per formare la fase martensitica α ($4\text{ }^\circ\text{Cs}^{-1}$), l'alta temperatura alla fine di questa fase (650-700 °C) e le complesse ri-fusioni e riscaldamenti inibiscono la trasformazione della fase β nella struttura martensitica α . Le osservazioni di qualche fase martensitica α nel campione della superficie superiore è plausibile a causa dell'assenza di strati superiori che provocherebbero il riscaldamento del materiale, combinata con la piccola dimensione del campione che consente una maggiore velocità di raffreddamento ed una (relativamente) breve esposizione della fase α alla temperatura della camera.

Quindi in conclusione, il confronto tra i due meccanismi predominanti di solidificazione nella zona fusa durante il processo di AM mediante laser, dimostra che la morfologia del grano varia in base al raffreddamento, al tipo di nucleazione (se esogena oppure endogena) ed alla crescita dei grani a partire dalla base della zona fusa, i quali dipendono prevalentemente dalla costanza del fascio laser e dalla sua intensità, ovvero dalla capacità di penetrare per più piani creando relativamente grandi zone termicamente alterate le quali hanno una morfologia granulare variante in base ai parametri suddetti (per esempio se la profondità di penetrazione eccede la larghezza dei grani equiassici, si formerà una struttura colonnare). [22]

3.2 COMPORTAMENTO MECCANICO

Nella *figura 23* troviamo le resistenze a trazione di Ti-6Al-4V nei vari processi di AM: tutti i metodi mostrano livelli di resistenza superiori o paragonabili al materiale ottenuto mediante metodi convenzionali (forgiatura, ...). I componenti prodotti mediante DMD, LENS e DMLS mostrano meno duttilità a causa della formazione della martensite, anche se questa proprietà può essere incrementata mediante un trattamento di HIP e/o altro trattamento termico. Come risultato della riduzione di tensioni residue, il processo EBM mostra invece buona duttilità, se confrontato con il processo laser. [21]

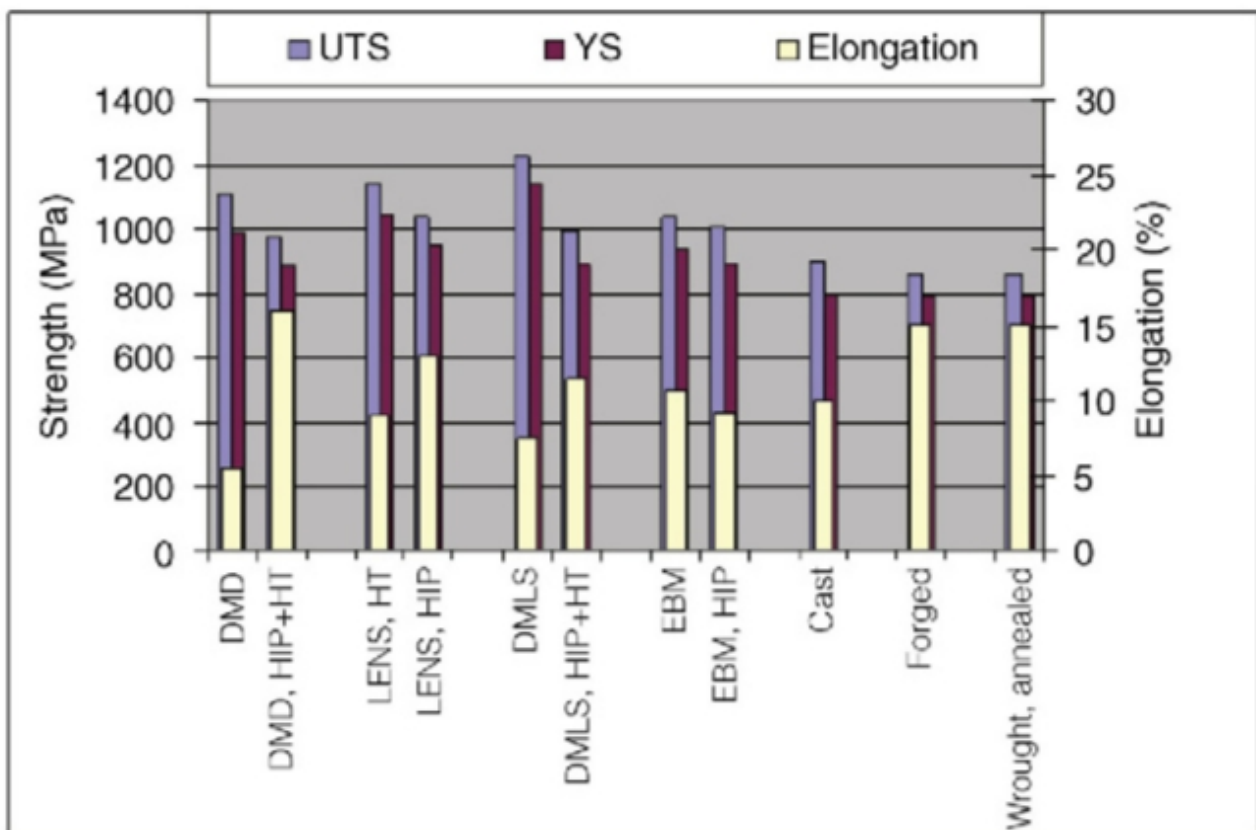


Figura 23: diagramma di confronto delle tensioni nei vari processi

La *figura 24* mostra invece i valori di microdurezza relativi ai vari processi: la durezza di entrambi i campioni sottoposti ad LBM ed EBM è circa il 25% superiore a quella relativa allo stesso materiale ottenuto mediante metodi tradizionali, tuttavia, quella del prodotto ottenuto per EBM, utilizzando la prova Rockwell C, (caratterizzata da un tipo di penetratore differente dalle altre prove di durezza) è leggermente inferiore alla durezza ottenuta dal prodotto lavorato con SLM: 33 HRC contro il 34 HRC. Ciò si riflette anche nei dati di proprietà meccaniche in cui sia la tensione di snervamento che

UTS sono approssimativamente superiori dell'11% per il campione sviluppato mediante SLM rispetto all'EBM. L'allungamento, sia per EBM che LBM (SLM), è inferiore di circa 4-5 punti percentuali rispetto ai prodotti forgiati. [25]

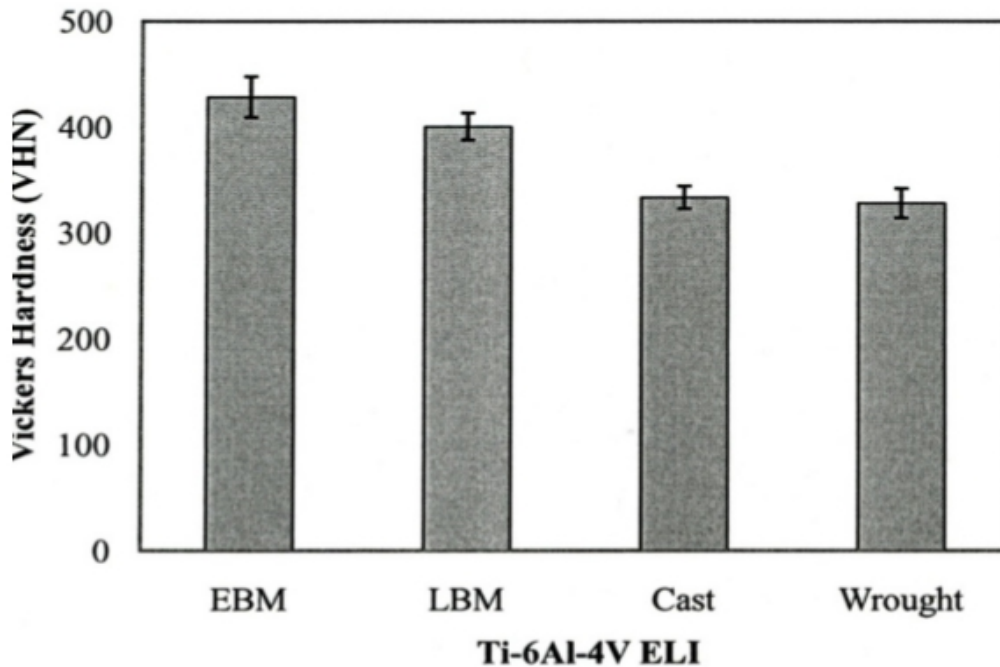


Figura 24: diagramma sulle durezza di Ti-6Al-4V ottenuto mediante vari processi di AM

Per quanto riguarda invece i componenti ottenuti mediante SLS possiamo notare dalla *figura 25* e dalla *tabella 3* che ci sono tre differenze tra il campione di Ti-6Al-4V ottenuto mediante SLS e quello ottenuto mediante metodi tradizionali: come primo punto, si nota che il modulo di Young del materiale lavorato tramite AM ha un valore leggermente inferiore, causato dalla composizione microstrutturale dello stesso; una seconda differenza la si nota dal maggior valore di UTS dovuto al rapido raffreddamento, che accomuna tutti i materiali lavorati mediante selective laser sintering, il quale porta ad una microstruttura più fine. Come terzo ed ultimo punto, a causa della struttura lamellare sottile, l'allungamento risulta molto minore rispetto al materiale di riferimento (avente struttura equiassica).

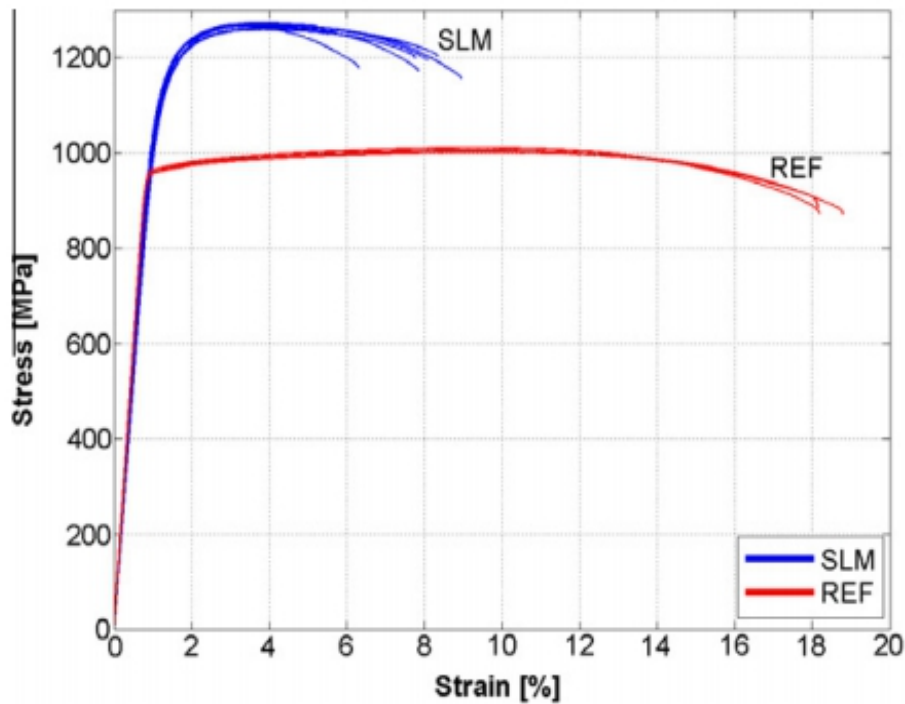


Figura 25: nella curva blu è rappresentato il comportamento della lega ottenuta per AM, mentre in quella rossa, la lega ottenuta mediante metodi tradizionali

	E (GPa)	σ_y (MPa)	UTS (MPa)	$\epsilon_{fracture}$ (%)
SLM	109.2 ± 3.1	1110 ± 9	1267 ± 5	7.28 ± 1.12
Reference	120.2 ± 1.9	960 ± 10	1006 ± 10	18.37 ± 0.88

Tabella 3

Tutti i dati sopra esposti si riferiscono a materiali non trattati termicamente. Se si eseguono dei TT sui componenti in esame si trovano alcune importanti informazioni: confrontando la duttilità del materiale di riferimento e quello in SLS, si nota che l'allungamento del secondo aumenta con l'aumentare della temperatura massima raggiunta, mentre il materiale di riferimento perde fino all'86% della sua capacità di deformarsi a causa del trattamento termico: questo è probabilmente causato dalla formazione di una struttura duplex nel materiale di riferimento, in cui gli elementi stabilizzanti della lega α sono in gran parte situati nei grani di α primario: la fase α nella sezione lamellare è quindi relativamente povera di elementi di lega, provocando una grande differenza di forza tra le lamelle α e β : ciò causa la rapida formazione di cricche e rotture precoci del materiale (dato che non ci sono grani equiassici nel materiale ottenuto per AM, non si hanno queste

complicazioni). Per il materiale di riferimento, la massima temperatura di TT determina solo la frazione di lamelle $\alpha+\beta$ (quando trattato al di sotto della curva di trasformazione β): trattando ad una più alta temperatura si avrà solamente una frazione più grande di struttura lamellare a temperatura ambiente. La "spaziatura" lamellare è determinata invece dalla velocità di raffreddamento: con velocità di raffreddamento più elevate deriva una minor distanza tra le lamelle; si è quindi capito che ciò che influenza il comportamento del materiale, è in buona parte la temperatura massima che si raggiunge nel trattamento termico. Con l'aumento della temperatura massima, σ_y ed UTS, così come l'allungamento, aumentano. Nel complesso i risultati migliori si ottengono dopo 2 h a 850 °C, seguiti poi da un raffreddamento in forno, oppure 1 h a 940 °C, con un raffreddamento successivo in aria e tempra per 2 h a 650 °C seguita anch'essa dal raffreddamento in aria. I risultati, per tutte le proprietà, sono ben al di sopra rispetto gli standard ASTM per forgiati (ASTM F1472).

3.3 COMPORTAMENTO A FATICA

In questo capitolo analizzerò il comportamento a fatica ottenuto dallo studio di una particolare lega di titanio, ovvero Ti-6Al-4V perchè, come ho precedentemente detto, si tratta della lega di Ti maggiormente utilizzata.

3.3.1 MICROSTRUTTURA

I dati di riferimento hanno stabilito chiaramente che la struttura del grano/fase (microstruttura) può significativamente influenzare le prestazioni a fatica di Ti-6Al-4V: più comunemente, il laser PBF nel Ti-6Al-4V causa una microstruttura martensitica molto fine, dovuta alla velocità di raffreddamento elevata subita dal materiale durante il processo (l'effetto della microstruttura martensitica sulle prestazioni a fatica in componenti fabbricati tradizionalmente Ti-6Al-4V non è stato chiaramente stabilito a causa della presenza di cricche di fatica avviate da difetti nei campioni). Recentemente, sono stati identificati dei parametri di elaborazione del processo PBF i quali hanno comportato una microstruttura α non martensitica, che ha permesso un miglioramento delle prestazioni a fatica. Inoltre, trattamenti termici sopra 400°C hanno dimostrato di poter modificare la microstruttura martensitica in una microstruttura composta da fasi paragonabili alle fasi α , con più alti criteri di resistenza, mentre, come previsto, trattamenti termici più intensi hanno reso grossolana la microstruttura e creato regioni di fase β . Nel caso di campioni ottenuti mediante PBF e-beam, micrografie ottiche ed elettroniche suggeriscono l'esistenza di fasi sia α che β : è il tasso di raffreddamento lento della temperatura della camera di generazione che è responsabile della

stessa microstruttura. Come con i difetti di porosità, essa varia rispetto alla posizione all'interno delle varie parti del componente ovvero si riscontra una maggiore resistenza e bassa duttilità vicino alla parte superiore dei componenti. [26]

3.3.2 CARATTERISTICHE SUPERFICIALI

Ad un semplice esame visivo, le superfici sottoposte ad AM di Ti-6Al-4V hanno una finitura più opaca rispetto ai campioni lavorati tradizionalmente, fatto indicativo della loro superficie più ruvida.

La maggiore rugosità superficiale dei pezzi lavorati per AM è attribuibile a:

- (1) effetto associato alla deposizione di strati infiniti;
- (2) particelle di polvere parzialmente fuse aderenti alla superficie;
- (3) presenza di difetti quali porosità e regioni non ben fuse;

Il prodotto quindi dipende:

- (1) dalla curvatura della superficie e dallo spessore dello strato di deposizione;
- (2) dal particolare approccio di deposizione della polvere e dalla dimensione della stessa;
- (3) dai parametri di elaborazione che controllano i difetti nella formazione.

Evidenzio dunque l'importanza di particelle di polvere parzialmente fuse aderite alla superficie, assieme alla scarsa selezione di parametri di processo e/o la presenza di superfici molto curve, i quali possono creare difetti superficiali di dimensioni sufficienti a influire sulle prestazioni a fatica. [26]

3.3.3 TENSIONI RESIDUE

A causa degli elevati gradienti termici, i campioni sottoposti ad AM sono inclini a significative tensioni residue che possono cambiare la resistenza a fatica. Alcuni ricercatori (Edward & Ramulu) hanno misurato le tensioni residue nel piano di costruzione di due campioni ottenuti dal processo PBF laser, trovando valori di tensione residue a trazione di ~410 MPa e ~550 MPa sulla superficie, ~0 MPa e ~200 MPa a 200 μm sotto la superficie: i valori precisi dipendevano dalla forma del campione e dalla posizione di misurazione, cioè nella parte superiore o inferiore nel provino stesso. Come per i materiali prodotti con i metodi tradizionali, ci sono però trattamenti termici in grado di rimuovere queste tensioni residue, ad esempio 2 ore a 800°C (Leuders et al.). Rispetto al processo PBF laser, il processo PBF e-beam dovrebbe creare meno tensioni residue, grazie al lento

raffreddamento della camera di generazione. Un tema importante, è che i parametri di lavorazione possono avere un impatto significativo sulla distribuzione delle tensioni residue, che spesso si avvicinano alla tensione di snervamento. In ultima analisi, esse possono essere una frazione significativa del limite di snervamento nei campioni sottoposti ad AM in Ti-6Al-4V, soprattutto in prossimità delle superfici: il segno, la grandezza delle sollecitazioni e la loro distribuzione è probabile che dipendano dalla posizione, dalle dimensioni e dalla geometria. [26]

3.3.4 PROCESSO PRODUTTIVO STANDARD DI Ti-6Al-4V : DIFETTI

Tra i dati a fatica nella fabbricazione tradizionale di Ti-6Al-4V qui esaminati (*figura 26*), lo scarso rendimento e l'accelerata crescita della cricca posso essere attribuiti a dei difetti di porosità. Il difetto iniziale che portava poi alla cricca, variava da circa 20 μm a 1,2 mm ed è stato attribuito al processo di fusione. In generale, i difetti più grandi sono più dannosi per le prestazioni a fatica, tuttavia i maggiori difetti non sono sempre responsabili della rottura del campione, il che suggerisce che fattori al di fuori della dimensione del difetto, svolgono un ruolo importante nella formazione della cricca a fatica del Ti-6Al-4V: la vicinanza del difetto ad altri difetti, la superficie e grani grossi favorevolmente allineati. Un approccio comune per eliminare i difetti di porosità nel prodotto ottenuto da processi di fonderia è il sottoporre il materiale ad alta pressione e ad una temperatura elevata, per esempio il processo HIP: Hot Isostatic Pressing. Un ricercatore, Eylon, ha eseguito trattamenti HIP, mantenendo invariate tutte le altre condizioni: il trattamento ha allungato la vita a fatica di oltre un fattore 2.

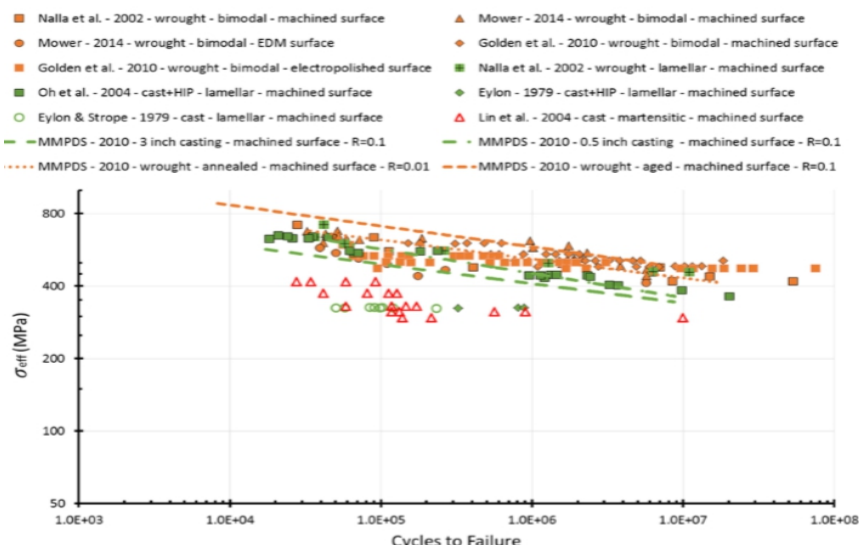


Figura 26 : Performance a fatica monoassiale di Ti-6Al-4V e Ti-6Al-4V sottoposto ad HIP, ottenute mediante processo standard di fabbricazione.

ARANCIONE-- bimodale

VERDE-- lamellare

ROSSO-- martensitico

3.3.5 LASER PBF SU Ti-6Al-4V

La maggior parte dei dati sulle prestazioni a fatica per AM Ti-6Al-4V sono stati pubblicati per il processo PBF laser. Supponendo che l'effetto del coefficiente di rapporto R sia contabilizzato utilizzando σ_{eff} e che gli effetti di variazioni di forme e dimensioni dei campioni siano trascurabili, i dati provenienti da sei insiemi disgiunti di autori possono essere confrontati per il percorso di trasformazione PBF laser per R vicino a zero (figura 27).

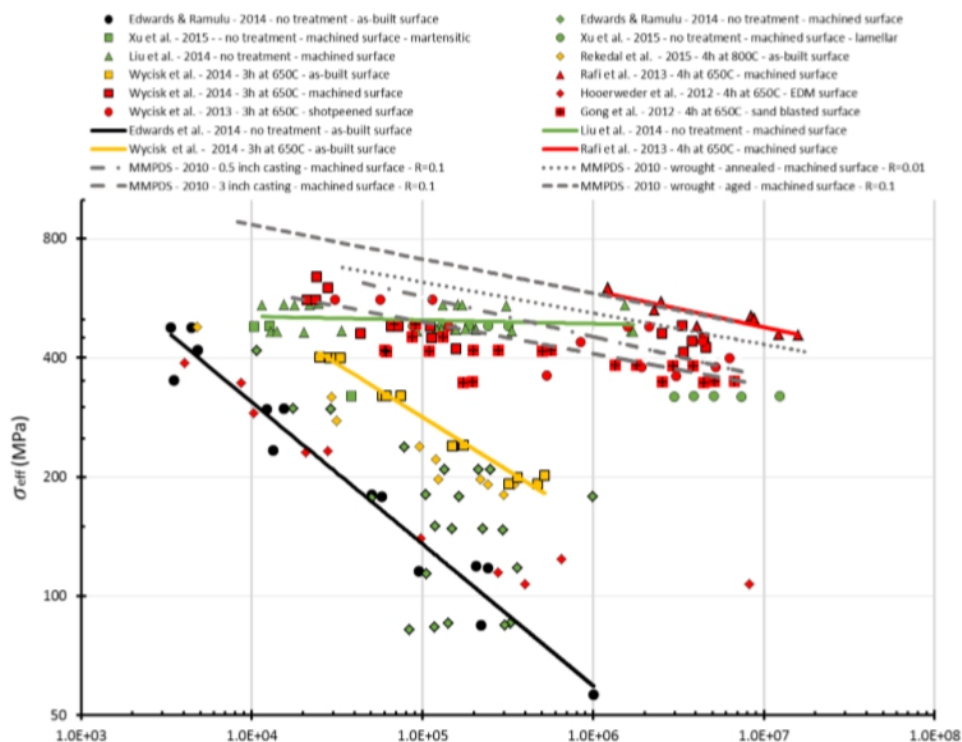


Figura 27: Prestazioni a fatica monoassiale di campioni ottenuti per AM su Ti-6Al-4V attraverso il processo di PBF laser e testati a $R \approx 0$. Simboli neri: nessun trattamento termico e superficie grezza. Simboli verdi: nessun trattamento termico e superficie lavorata. Simboli gialli: trattamento termico e superficie grezza. Simboli rossi: trattamento termico e lavorati superficialmente (EDM / micropallinatura / sabbiatura). Troviamo poi le quattro rette ottenute interpolando i valori ottenuti. Sono indicate anche quattro curve MMPDS che rappresentano caratteristiche di Ti-6Al-4V ottenuto tradizionalmente.

Nei campioni in cui è stato fatto un trattamento termico, si è osservato che le performance a fatica sono peggiori se si è caricato lungo la direzione di TT, piuttosto che perpendicolarmente ed inoltre si nota che il suo effetto è maggiore nei componenti lucidati e/o lavorati rispetto a quelli grezzi. Altri ricercatori asseriscono che se le superfici vengono lavorate, la performance a fatica a 10.000 rpm può essere migliorata di un fattore 2, mentre altri sostengono che anche in questo caso non sono i grandi difetti che portano alla rottura, ma quelli più ravvicinati, mostrando che altri fattori, oltre alla dimensione dei difetti, svolgono un ruolo importante nella nucleazione della cricca a fatica, come ad esempio la vicinanza con altri difetti, la superficie e la fase β debole o grani grossi favorevolmente allineati.

3.3.6 E-BEAM PBF SU Ti-6Al-4V

In questo caso, i provini con la superficie grezza hanno prestazioni simili alla peggiore ottenuta mediante laser PBF, mentre i campioni sottoposti a trattamento superficiale (e pallinatura) hanno fornito risultati migliori, ma ancora inferiori al prodotto grezzo. Le analisi dei campioni, hanno mostrato la nucleazione delle crepe da difetti in tutti i casi, ma senza aver tentato di classificare la popolazione di difetti. Le prestazioni a fatica dell'E-beam su Ti-6Al-4V possono essere migliorate dal trattamento HIP, con prestazioni simili al prodotto grezzo. La microstruttura è costituita da lamelle α di $\sim 2 \mu\text{m}$ di spessore e lunghe $\sim 20 \mu\text{m}$, a cui prima è stato applicato il trattamento termico (anche se non esplicitamente indicato, le dimensioni della microstruttura dopo il trattamento termico erano probabilmente paragonabili al prodotto ottenuto tradizionalmente) condotto a 920°C per 2 h con una pressione di 100 Mpa: con un trattamento HIP i provini possono esibire prestazioni paragonabili al grezzo, mentre senza trattamento HIP, le prestazioni come già detto, sono inferiori, presumibilmente a causa differenze nella popolazione dei difetti.

3.3.7 DED SU Ti-6Al-4V

Alcuni ricercatori hanno esaminato le prestazioni a fatica di Ti-6Al-4V prodotto con un processo DED (sono state esaminate sia TIG che le fonti di energia laser). I campioni con un diametro di 1,5 mm, elettrolucidati, sono stati testati a $R=01$. I provini realizzati con energia laser sono stati testati solo dopo il trattamento termico, cioè 2 h a 843°C , mentre quelli sottoposti a TIG sono stati testati sia prima che dopo il trattamento termico. Tutti i campioni hanno mostrato ottime prestazioni a fatica, superiori al prodotto grezzo e l'analisi della superficie di frattura non è stata sottolineata, ma si sospetta che i difetti derivanti da AM non abbiano giocato un ruolo significativo.

3.3.8 PROSPETTIVE PER RICERCHE FUTURE

Differenti livelli massimi di stress derivanti da differenti rapporti di R, possono avere un effetto significativo sui risultati delle prove a fatica, in quanto è la tensione massima che controlla lo snervamento e l'entità della deformazione plastica; pertanto, per evitare questa complicazione, si raccomanda di usare $R=-1$. Se il test è diverso da quello sopra esposto, si consiglia di utilizzare i dati ottenuti dalla prova a fatica generati mediante lo stesso rapporto R per l'analisi comparativa. La geometria del provino in genere utilizzata per la prova è piatta oppure cilindrica. Un carico di compressione, come nel ciclo a carico completamente invertito $R=-1$, è segno di esemplare instabilità, in particolare per il tipo di geometria del provino: per evitare questo problema, un piccolo raggio per la transizione tra la larghezza della sezione di presa del campione e la larghezza della sezione è spesso usato per minimizzare la lunghezza del provino. Ciò, tuttavia, comporta una concentrazione di tensione significativa nella zona di transizione, promuovendo la rottura in questa posizione piuttosto che nel resto della sezione. I campioni possono essere progettati con una larghezza uniforme ed una porzione di presa più spessa: questo produce una concentrazione di tensione molto inferiore rispetto al disegno del campione convenzionale. Tuttavia, indipendentemente dalla geometria del provino prescelto, è importante che sia rappresentativo della microstruttura effettiva del componente e dei suoi difetti, così come altri parametri di processo di generazione. Per quanto riguarda le frequenze di applicazione del carico, sono tipicamente limitate a meno di 100 Hz, anche se le nuove macchine di prova sono in grado di operare a frequenze di alcuni kHz. È ben noto che la deformazione ciclica plastica (sia a livello microscopico, sia a livello macroscopico) controlla la vita a fatica e la differenza tra le due modalità di controllo diventa più significativa con l'aumentare del livello di deformazione plastica, ad esempio, a concentrazioni di stress come tacche nei componenti e/o durante sovraccarichi in condizioni di carico di servizio. Nel trattare con concentrazioni di tensione, si dovrebbe riconoscere che il gradiente di stress può giocare un ruolo chiave nella prestazione a fatica: fenomeni come l'incrudimento, la diminuzione dello stress e la trasformazione di fase che dipendono dalla microstruttura ottenuta dai parametri di processo AM e dai trattamenti termici, possono essere valutati da test di deformazione ciclica. Curva e dati S-N (stress – numero di cicli) vengono generati sotto ampiezza di carico costante, mentre le storie di carico di servizio sono spesso di ampiezza variabile. Se esistono sovraccarichi periodici nella storia di carico e la microstruttura del materiale AM è tale che indurimento o ammorbidimento ciclico avviene durante i cicli di sovraccarico, l'effetto della memoria di deformazione diventa una considerazione importante. Per tali casi, l'utilizzo di un parametro di danno che coinvolge sia termini di sforzo che deformazione, può essere più appropriato per l'analisi

della vita a fatica rispetto all'utilizzo della tensione nel convenzionale S-N. Va inoltre notato che, mentre un limite di fatica o limite di resistenza possono essere esposti in ampiezza di carico costante, non esistono generalmente tali limiti sotto ampiezza variabile; in tali casi, ampiezze di sollecitazione o deformazione al di sotto del limite di resistenza di un S-N o curva di sollecitazione-vita a fatica generato dalla ampiezza di carico costante, diminuiscono la vita a fatica. Le tecniche convenzionali, quali la tensione efficace di Von Mises, non possono essere applicate direttamente ai materiali anisotropi AM (questo è ancora più critico per il caricamento multiassiale non proporzionale) inoltre, il campo di stress residuo provocato tipicamente dai processi AM influisce significativamente sul comportamento a fatica ed è multiassiale. Pertanto, indagare e comprendere gli effetti di carico multiassiali e di materiali AM è essenziale per il loro utilizzo con successo in applicazioni critiche a fatica. Ancora una volta, approfittando della libertà geometrica del processo AM, campioni più adatti di quelli attualmente utilizzati per materiali convenzionali possono essere progettati per carichi multiassiali. Alcuni altri aspetti legati al comportamento a fatica possono anche essere fondamentali per alcune applicazioni, ad esempio la fatica termomeccanica e le temperature elevate: tali condizioni possono essere presenti in AM di Ti-6Al-4V per applicazioni aerospaziali, ad esempio pale di turbine. Va inoltre notato che mentre i dati presentati e la discussione in questo manoscritto sono stati limitati alla cricca a fatica, la crescita di quest'ultima può anche costituire una porzione molto significativa della vita totale. Le attuali procedure di qualificazione o certificazione si basano su un concetto di "building block": un approccio statistico basato su numerosi dati di test meccanici per quantificare l'incertezza rispetto alle variazioni dei materiali e dei processi. Il processo di progettazione è un elemento costoso e richiede tempo, oltre a coinvolgere molte fasi di test fisici, a partire dal materiale. Lo sviluppo di un efficace qualifica e certificazione richiede una buona comprensione del gran numero di variabilità dei parametri di processo ed il loro impatto sulla variabilità delle prestazioni a fatica. Sono necessari quindi, lo sviluppo di strategie ottimali standard di scansione, metodi di prova e tecniche di valutazione non distruttive per geometrie complesse realizzate con materiali ottenuti per AM. Ci sono attualmente più di 100 parametri di processo riportati in letteratura che influenzano le prestazioni dei materiali AM, solo alcuni dei quali sono considerati e discussi nei dati di letteratura presentati nelle sezioni precedenti. Inoltre, la strategia di scansione utilizzata può avere molta influenza su alcune caratteristiche meccaniche, come le tensioni residue prodotte o la creazione di difetti, che a sua volta influenzano le prestazioni a fatica. La strategia di scansione utilizzata per produrre campioni di AM per i dati presentati nelle sezioni precedenti non è stata segnalata nella maggior parte degli studi, ma deve essere considerata e riportata in studi futuri. Il comitato ASTM F-42 su Additive Manufacturing Technologies sta attualmente sviluppando una norma che servirà come linea guida

per l'applicazione degli standard ASTM attualmente disponibili per i materiali ottenibili tramite AM. La comprensione dell'AM necessaria, può essere facilitata attraverso l'integrazione di esperimenti e di modellazione computazionale nello spirito di "Integrated Computational Materials Engineering" (ICME). Questi modelli includono l'assorbimento di energia, fusione, cristallizzazione, nucleazione e crescita della cricca.

Dai dati a fatica analizzati, è emerso che le prestazioni di AM Ti-6Al-4V sono regolate dalle stesse caratteristiche che controllano Ti-6Al-4V prodotto tradizionalmente, cioè finitura superficiale, tensioni residue, difetti interni e microstruttura. Prestazioni a fatica superiori di Ti-6Al-4V lavorato e ricotto sono state dimostrate con PBF laser, e-beam PBF, laser DED e TIG DED, probabilmente a causa della microstruttura fine che può essere raggiunta con l'elaborazione AM. In tutti i casi si sono ottenute caratteristiche migliori dopo aver effettuato un trattamento termico; infatti il miglior rendimento dimostrato da provini senza trattamento superficiale è inferiore a prodotti ottenuti mediante metodi tradizionali. Le superfici dei campioni trattati con PBF hanno dimostrato notevoli rugosità mentre le superfici associate al processo DED AM appaiono molto più lisce (campioni senza trattamento superficiale possono presentare buone prestazioni a fatica). Per quanto riguarda le prestazioni a fatica, il trattamento termico elimina tensioni residue e il trattamento HIP riduce difetti interni, il processo di DED TIG è l'unico processo AM fino ad oggi che siamo consapevoli possa dimostrare di essere migliore rispetto alla produzione tradizionale, senza uno di questi trattamenti. La microstruttura e popolazione di difetti invece non sembra aver influenza sulla resistenza. Considerando i dati di fatica AM e la capacità di controllare la microstruttura di un materiale con il processo di AM, il pieno potenziale di AM per quanto riguarda le prestazioni di fatica deve ancora essere realizzato per Ti-6Al-4V; per sbloccare questo potenziale è ulteriormente necessario un affinamento dei parametri di elaborazione AM, un compito che potrebbe essere accelerato dalla pubblicazione di set completi di parametri di elaborazione.

ANALISI ECONOMICA DELL'ADDITIVE MANUFACTURING

Molti studi su percorsi di innovazione fatti da imprese industriali, portano alla conclusione che la manifattura (intesa in senso ampio) si sta poco a poco smaterializzando, cedendo il posto alla manifattura additiva, la quale costituisce un'innovazione radicale ed allo stesso tempo cerca un punto di equilibrio, il quale possa conciliare grandi numeri e produzioni locali. Come ho già detto, la rivoluzione che questo metodo ha introdotto, è la realizzazione di oggetti non mediante la classica asportazione di truciolo con l'utilizzo di macchine a controllo numerico quali torni, frese ecc. ma tramite stratificazione ovvero addizione di materiale direttamente in un pezzo unico, portando importanti novità in termini di consumo di materiale, customizzazione e logistica.

Le applicazioni dell'AM sono in crescita da alcuni anni anche se il mercato non raggiunge ancora numeri elevati: \$2,2 miliardi di fatturato stimato a livello mondiale nel 2012 (+28,5% rispetto al 2011), di cui un miliardo per materiali e sistemi, \$1,2 miliardi per servizi (è una cifra irrilevante a confronto dei circa \$11.600 miliardi della manifattura mondiale). Il trend del settore, in ogni caso, è ben rappresentato dal tasso medio annuo di crescita del fatturato complessivo a livello mondiale negli ultimi 25 anni, stimato dell'ordine del 25,4% (+27,4% nel triennio 2010-2012). Anche il fatturato delle materie prime impiegate nella manifattura additiva (resine, polveri, filamenti di plastica, ecc.) è ovviamente in crescita (\$422,6 milioni nel 2012, +29,2% rispetto al 2011, +495% rispetto al 2001). Data la notevole innovazione, non risulta semplice l'effettiva portata economica e le implicazioni organizzative delle applicazioni della manifattura additiva, soprattutto per il fatto che il fenomeno è in costante e rapida evoluzione. Successivamente però affronto alcuni temi che a mio avviso sono molto importanti nell'analisi economica di questa tecnologia.

Scorte a magazzino

Un cambiamento nella gestione del magazzino e delle attività logistiche è stato apportato dalla manifattura additiva in quanto si possono realizzare pezzi unici o piccole serie in qualsiasi momento, senza la necessità di predisporre i macchinari (eventuali attezzaggi per esempio) e quindi seguendo fedelmente i principi della *lean production* dato che mediante questo processo si può lavorare *just in time*, soprattutto nei casi in cui il valore di tali componenti sia elevato così come l'urgenza di disporre in tempi rapidi.

Un punto a sfavore potrebbe essere il maggior costo di produzione di una singola unità, costo che verrebbe comunque compensato da un risparmio della giacenza a magazzino (con la conseguente riduzione della dimensione del magazzino ecc.).

Vincoli alla progettazione

Rispetto ai processi tradizionali, si annullano quasi del tutto i vincoli tecnici delle geometrie dei componenti, vista la possibilità di ottenere prodotti migliori sotto il profilo tecnico-funzionale, lasciando al progettista una maggior libertà sotto il profilo creativo, in modo da ottenere forme più belle ed eleganti, originali, per aumentare l'apprezzamento nel mercato dei consumatori.

Think additive

Il lavorare mediante addizione del materiale porta a pensare in modo differente, ovvero, il ragionamento che oggi i metodi di fabbricazione ci portano a fare è il seguente: "meno materiale asportato e meno costa il componente". La manifattura additiva, effettuando un processo esattamente opposto al precedente, porta a considerare altri aspetti quali: "meno materiale utilizzato e meno costa il componente" e quindi i maggiori vantaggi economici derivano dalla capacità delle aziende manifatturiere di ripensare la progettazione degli oggetti in modo da valorizzare appieno le potenzialità di questa tecnologia secondo criteri nuovi.

Materie prime

Ho già affrontato il tema sulla riduzione del consumo delle materie prime necessarie per la realizzazione del prodotto finito, ma non ho accennato al fatto che le stesse MP costano molto di più in quanto si passa dall'aver dei lingotti, barre, ecc. a delle polveri metalliche finissime che devono essere appositamente prodotte e lavorate attraverso processi di sinterizzazione laser o di altro tipo. Quindi in definitiva non si deve sottovalutare il costo del consumo di energia utilizzata per unità di massa (dato che è molto maggiore rispetto ai processi tecnologici "classici")

Economie di scala

Questo pilastro fondamentale dell'economia industriale, con l'avvento della manifattura additiva assume un ruolo di secondaria importanza dato che il costo di un oggetto prodotto è (quasi) indipendente dai volumi, portando ad avere una crescita pressochè lineare, togliendo AM dalla competizione per le produzioni di larga scala, ma ponendolo nel ruolo di leader per la produzione singola o di piccole serie. Se effettivamente le economie di scala sono destinate a contare meno nel futuro della manifattura, allora questa è una buona notizia in particolare per le piccole e medie imprese, perché comporta un drastico ridimensionamento della componente di rischio insita nella garanzia di un "lotto minimo" capace di giustificare gli investimenti in innovazione. Inoltre, se il

peso delle economie di scala si riduce, si abbassano le barriere economiche all'entrata di nuove imprese in mercati tradizionalmente chiusi alle realtà imprenditoriali di piccole e medie dimensioni.

Mass customization

Del passaggio dalle grandi industrie basate su enormi economie di scala a piccole produzioni locali, ad oggi non c'è traccia: né nel settore aerospaziale, biomedico e delle corse (dove non sono presenti grandi economie di scala), la manifattura additiva non è competitiva e nemmeno potrà esserlo in un immediato futuro, a meno di enormi salti tecnologici. Ciò che posso dire è che l'enorme disponibilità da parte delle aziende di dati sui gusti e sui comportamenti dei propri clienti, unita alla possibilità di interagire direttamente con essi, costituisce un fattore importante per la valorizzazione delle potenzialità della manifattura additiva.

Re-shoring

La maggiore competitività delle produzioni su piccola scala, il bassissimo livello di labour intensity e il contenuto impatto ambientale della manifattura additiva possono far prevedere per il futuro una minore concentrazione spaziale delle fabbriche e la collocazione delle stazioni produttive più vicina ai punti di consumo, anche all'interno dei centri urbani. Resta aperta la questione del ruolo delle economie di contesto tipiche dei cluster e dei distretti in questo nuovo scenario tecnologico: lo sviluppo della manifattura additiva potrebbe dunque ridurre l'incentivo a delocalizzare nei paesi emergenti, dove il basso costo della manodopera gioca un ruolo particolarmente importante. Il fattore lavoro incide meno sul costo totale, il costo della materia prima è sostanzialmente identico e le minori problematiche di inquinamento ambientale associate alla stampa 3D riducono l'importanza dei vantaggi competitivi dei paesi con normative ambientali meno rigide (fattore molto importante). In altri termini, ci si aspetta una ridefinizione delle supply chain, oggi globali, verso relazioni di connessione regionale tra imprese, dotate di un minor grado di strutturazione e interconnessione sequenziale. [28]

CONCLUSIONI

In ultima analisi, si può affermare che la tecnologia di *Additive Manufacturing* affrontata in questo lavoro di tesi, si può ritenere economicamente e tecnicamente valida sotto moltissimi punti di vista, anche se momentaneamente il suo utilizzo non è elevato quanto quello delle lavorazioni standard (asportazione di truciolo, processi di fonderia, ...) a causa degli alti investimenti necessari.

Valutando l'aspetto tecnico posso affermare che questa tecnologia, a parità di materiale e trattamento termico, fornisce proprietà meccaniche migliori rispetto alle lavorazioni convenzionali, inoltre se si scelgono i corretti parametri di creazione della forma, si diminuiscono le possibilità di trovare cricche e/o difetti all'interno del componente con un conseguente aumento della resistenza meccanica ed a fatica.

Sotto l'aspetto economico, come esposto in precedenza, l'unico "freno" che porta al non adottare questa tecnologia innovativa è l'elevato costo iniziale dell'attrezzatura (e di tutto ciò che è ad essa connesso come per esempio l'addestramento del personale) ed il periodo di imprevedibilità del mercato che in questi anni affligge aziende di tutto il mondo. Se si analizzassero invece i benefici economici/gestionali che questa innovazione porterebbe in un'azienda manifatturiera come la riduzione delle scorte, il make to order eseguito senza troppi problemi e la possibilità di lavorare per piccoli lotti (anche unitari) senza perdere di efficienza, non ci sarebbe alcun dubbio su quale sia la scelta migliore da fare.

BIBLIOGRAFIA

- [1] R. I. Jaffee: Titanium 80, Met. Soc. Am. Inst. Min. Met. Pet. Eng., Warrendale
- [2] A. Pandolfo, G. Degli Esposti in Tecnologie meccaniche di processo e di prodotto
- [3] M. J. Donachie, Jr.: Titanium and Titanium Alloys, American Society for Metals, Metals Park
- [4] M. J. Donachie, Jr.: Titanium – A Technical Guide, American Society for Metals, Metals Park,
- [5] Titanium Information Group: The Effective Use of Titanium
- [6] R. W. Schutz e D. E. Thomas: Corrosion of Titanium and Titanium Alloys, American Soc. for Metals
- [7] F. H. Froes, P. G. Allen e M. Niinomi: Non-aerospace Application of Titanium, Structural Mater.
- [8] Division of the Minerals, Metals and Materials Society, Texas
- [9] K. Faller e F. H. Froes: J. of Mater. Sci.
- [10] O. Schauerte, D. Metzner, R. Krafzig, K. Bennewitz, A. Kleemann, ATZ, Automobiltech. Z.
- [11] F. H. Froes e I. L. Caplan: Titanium 92, Met. Soc. Am. Inst. Min. Met. Pet. Eng., Warrendale
- [12] Morri A. Trattamenti termici delle leghe di titanio $\alpha+\beta$, correlazioni fra microstruttura e comportamento meccanico. La metallurgia italiana, 2008
- [13] Serope Kalpakjian e Steven R. Schmid: Manufacturing Engineering and Technology (6th Edition)
- [14] I. Zeina, D.W. Hutmacherb, K. Cheng Tanc, S.H. Teoha in Fused deposition modeling of novel scaffold architectures for tissue engineering applications
- [15] J.P. Kruth X. Wang T. Laoui e L. Froyen in Lasers and materials in selective laser sintering
- [16] Peter Heintl, Andreas Rottmair, Carolin Körner e Robert F. In Singer Cellular Titanium by Selective Electron Beam Melting
- [17] Joon Park Michael J. Tari e H. Thomas Hahn in Characterization of the laminated object manufacturing (LOM) process
- [18] Robert P. Mudge e Nicholas R. Wald in Laser Engineered Net Shaping Advances Additive Manufacturing and Repair
- [19] Bodycote plc, Leader mondiale nel settore dei trattamenti termici
- [20] G. Lütjering “Influence of processing on microstructure and mechanical properties of ($\alpha+\beta$) titanium alloys”
- [21] B. Dutta e Francis H. (Sam) Froes in The additive manufacturing (AM) of titanium alloys
- [22] T. Wang, Y.Y Zhu, S.Q. Zhang, H.B. Tang, H.M. Wang in Grain Morphology evolution behaviour of titanium alloy components during laser melting deposition additive manufacturing

- [23] H. Galarraga, D.A. Lados, R.R. Dehoff, M.M. Kirka e P.Nandwana in Effects of the microstructure and porosity on properties of Ti-6Al-4V ELI alloy fabricated by electron beam melting (EBM)
- [24] B.A. Szost, S. Terzi, F. Martina, D. Boisselier, A. Prytuliak, T. Pirling, M. Hofmann e D.J. Jarvis in a comparative study of additive manufacturing techniques: residual stress and microstructural analysis of clad and waam printed Ti-6Al-4V components
- [25] ResearchGate in Evaluation of Titanium Alloys Fabricated using rapid prototyping technologies: Electron Beam Melting and Laser Beam Melting
- [26] P. Li, D.H. Warner, A. Fatemi, e N. Phan in Critical assessment of the fatigue performance of additively manufactured Ti-6Al-4V and perspective for future research
- [27] ASM International in Volume 2 of Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials
- [28] Luca Beltrametti ed Angelo Gasparre: La stampa 3D come nuova sfida tecnologica al lavoro manifatturiero
- [29] Bey Vrancken, Lore Thijs, Jean-Pierre Kruth e Jan Van Humbeeck in Heat treatment of Ti-6Al-4V produced by Selective Laser Melting: Microstructure and mechanical properties