



Selective Laser Melting: studio della correlazione tra parametri di processo e comportamento a fatica

Ph.D. student: Giuseppe Macoretta

Tutor: Prof. Bernardo D. Monelli
Prof. Leonardo Bertini



Corso di dottorato in Ingegneria Industriale - inizio 1° anno

Curriculum

Nato a Campobasso, il 22/06/1989

2008 - Diploma di maturità classica, Liceo Classico M. Pagano, Campobasso (100/100)

2014 - Laurea in Ingegneria Meccanica, Università di Pisa (105/110)

2018 - Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica, Università di Pisa (109/110)

Email: giuseppe.macoretta@phd.unipi.it

Progetto di ricerca

I processi di manifattura additiva di metalli (*Metal Additive Manufacturing*) hanno il potenziale per innovare i processi produttivi attualmente utilizzati in ambito industriale: produzione di geometrie complesse, ottimizzazione, flessibilità, personalizzazione del prodotto, riduzione delle giacenze di magazzino, riduzione del consumo di materiale.

La stampa 3D di metalli ha trovato applicazione in campo aerospaziale, biomedico ed energetico [1-3]. E' stata utilizzata con successo nella produzione di componenti in superleghe di nickel resistenti al calore (IN 718) e leghe di titanio (Ti-6Al-4V).

Sebbene la vendita di macchine per additive manufacturing di metalli sia cresciuta del 77% tra il 2016 ed il 2017, la diffusione industriale di questa tecnologia è fortemente limitata dalle scarse proprietà meccaniche dei componenti finiti (resistenza statica, durabilità, tolleranze dimensionali, finitura superficiale), dalla scarsa conoscenza della correlazione tra i parametri di processo e le proprietà finali del componente e dai ridotti volumi produttivi [4]. Trattamenti di post-processing (es. *Hot Isostatic Pressing* o lavorazione delle superfici per asportazione di truciolo) possono migliorare notevolmente le proprietà meccaniche dei componenti, arrivando ad eguagliare le prestazioni dei componenti prodotti in modo convenzionale [5-6]. Questi processi tuttavia comportano costi e tempi elevati, inadeguati alla produzione industriale. Migliorare le proprietà meccaniche dei componenti grezzi è cruciale.

Il progetto di ricerca verte sullo sviluppo di modelli multi-fisici che correlino i parametri critici del processo alle proprietà meccaniche del componente, in primis la resistenza a fatica. Verranno studiate le tecnologie *Powder Bed Fusion* (PBF), con particolare attenzione all'applicazione del *Selective Laser Melting* (SLM) alle leghe metalliche per impieghi ad alta temperatura.

Scarsa finitura superficiale, presenza di porosità interna e tensioni residue influenzano negativamente la vita a fatica del componente [4,6]. I parametri di processo (potenza del fascio, strategia di scansione e di controllo dell'impulso, controllo della temperatura e dei gas presenti nella camera di lavoro) e le proprietà chimico-fisiche delle polveri utilizzate sono gli elementi chiave [4]. La comprensione e la sistematizzazione del loro effetto sulla vita a fatica del componente è un problema irrisolto.

[1] T. Kellner, "The Blade Runners: This Factory Is 3D Printing Turbine Parts For The World's Largest Jet Engine", *General Electric*, 20 March 2018 [Online].

[2] M. Siebert, "Breakthrough with 3D printed Gas Turbine Blades", *Siemens AG*, 6 February 2017 [Online].

[3] Y. M. Bovalino and M. Sieger, "Bone Machine: 3D Printing Is Revolutionizing Plastic Surgery", *General Electric*, 3 August 2017 [Online].

[4] W. J. Sames, F. A. List, S. Pannala, R. R. Dehoff and S. S. Babu, "The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing", *International Materials Reviews*, vol. 61, no. 5, pp. 315-360, 2016.

[5] R. Molaei, A. Fatemi and N. Phan, "Significance of hot isostatic pressing (HIP) on multiaxial deformation and fatigue behaviors of additive manufactured Ti-6Al-4V including build orientation and surface roughness effects", *International Journal of Fatigue*, vol. 117, p. 352-370, 2018.

[6] P. Li, D. H. Warner, A. Fatemi and N. Phan, "Critical assessment of the fatigue performance of additively manufactured Ti-6Al-4V and perspective for future research", *International Journal of Fatigue*, pp. 130-143, 2016.

Pianificazione delle attività

➤ 1° anno

- Analisi dello stato dell'arte, focalizzata sulla correlazione tra parametri di processo e vita a fatica dei componenti.
- Definizione e conduzione di una campagna sperimentale su provini per indagare gli effetti dei parametri critici di processo sulle proprietà meccaniche (finitura superficiale e durabilità).

➤ 2° anno

- Sviluppo di modelli multi-fisici, sia analitici che agli elementi finiti. I modelli analitici ricavati dall'analisi dei risultati sperimentali saranno alla base delle simulazioni agli elementi finiti.
- Validazione sperimentale dei modelli su provini e componenti in piena scala.

➤ 3° anno

- Periodo di formazione all'estero.
- Analisi della sensitività delle proprietà meccaniche del componente in piena scala rispetto ai parametri critici del processo. Definizione di strategie di controllo qualità.
- Sviluppo di modelli di resistenza a fatica di componenti prodotti in *Additive Manufacturing*, che supportino le attività di progettazione meccanica.

Tesi di laurea magistrale

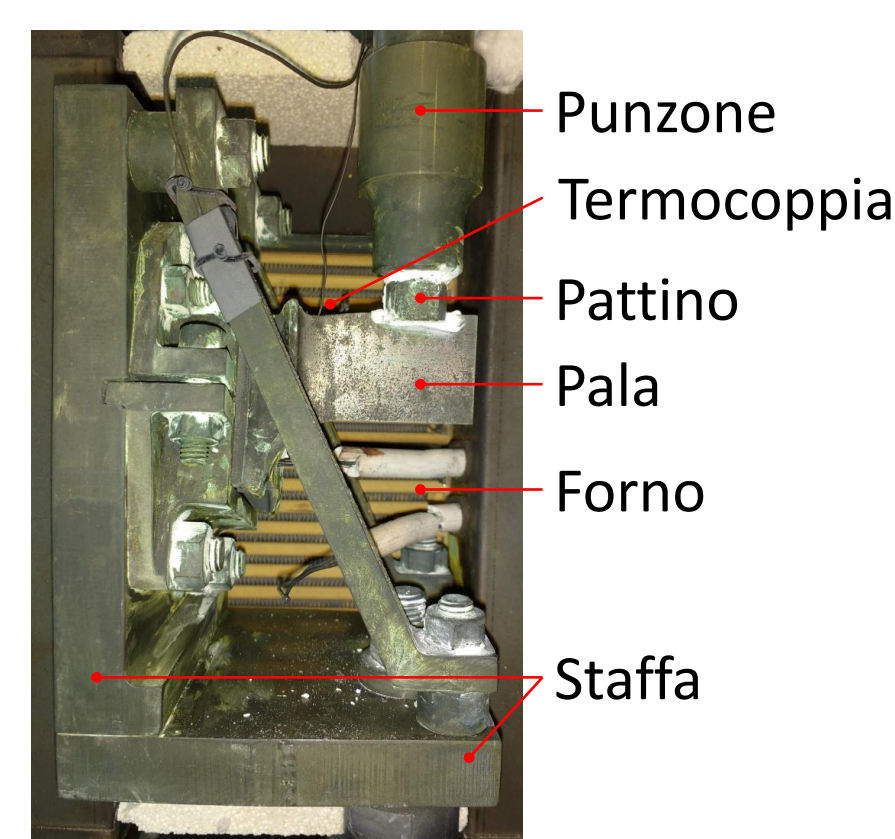
Analysis of the high temperature fatigue behavior of gas turbine blades

Le turbine a gas usate per la produzione di energia elettrica sono soggette a cicli operativi caratterizzati da una elevata flessibilità di domanda, dovuta al crescente utilizzo di fonti di energia rinnovabile. L'incremento di flessibilità operativa impatta sulla resistenza meccanica dei componenti più sollecitati, tra cui le pale rotoriche di primo stadio. L'attività di tesi è inserita nell'ambito del progetto europeo FLEXTURBINE, volto a migliorare la flessibilità operativa degli impianti di produzione di energia elettrica alimentati da fonti fossili.

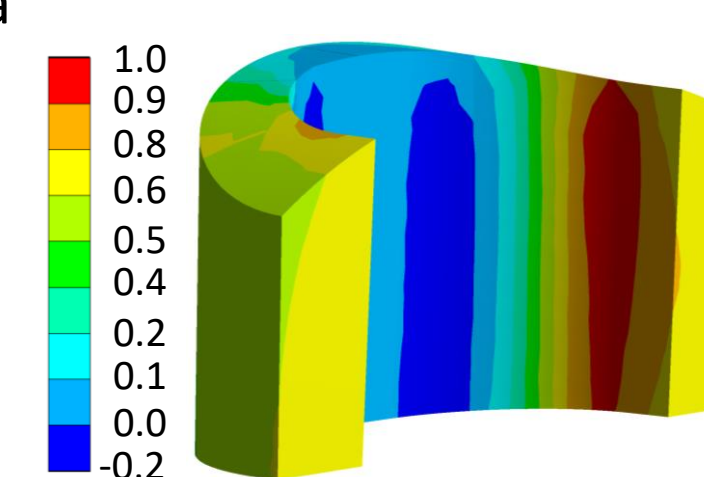
La tesi ha riguardato la progettazione di un banco prova per condurre test di fatica oligociclica ad alta temperatura su palette di turbina a gas in piena scala. Lo stato di sollecitazione, prodotto in condizioni operative da carichi meccanici (forza centrifuga e pressione) e termici, è riprodotto, nell'area critica della pala, applicando solamente un carico meccanico ed una distribuzione uniforme di temperatura.

E' stato portato a termine il progetto del banco prova ed è stata curata la produzione dei componenti. Il modello agli elementi finiti è stato validato attraverso la misurazione delle deformazioni subite della pala in condizioni di prova, mediante *strain gauges*. La verifica della nucleazione e propagazione delle cricche è stata effettuata mediante la tecnica dei liquidi penetranti.

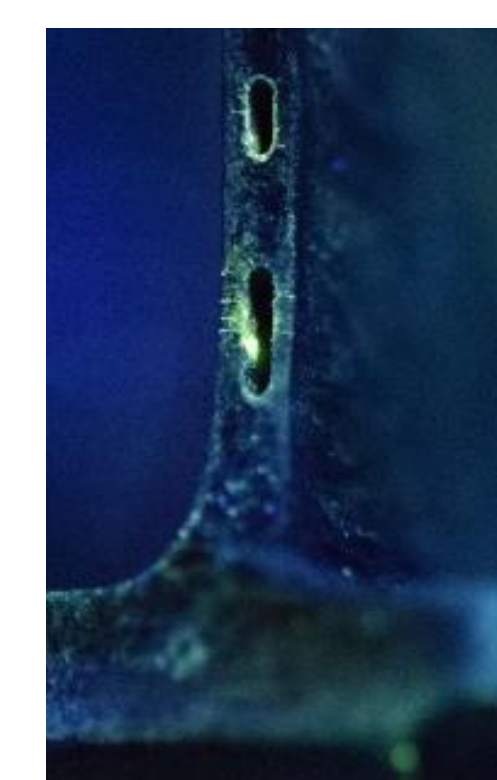
La campagna sperimentale è stata condotta su pale di 1° stadio di una turbina a gas di media potenza, fornite da BHGE - Nuovo Pignone Tecnologie S.r.l. E' stata infine condotta un'analisi di sensitività per identificare i parametri critici e stimare la dispersione dei risultati di prova. Le attività sperimentali hanno avuto luogo presso il Laboratorio di prove meccaniche del DIC1.



Dettaglio del banco prova



Tensione normale radiale nella regione critica



Rilevazione delle cricche con liquidi fluorescenti

Congressi e pubblicazioni

- *Turbomachines 2018*, Praga, Repubblica Ceca, 25-26 settembre, 2018
- *47° Convegno Nazionale AIAS*, Villa San Giovanni, 5-8 settembre 2018
- In corso – paper in corso di presentazione ad *ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*

Corsi selezionati

Insegnamenti trasversali:

1. *Academic English*
2. *Strumenti informatici per la ricerca dottorale*
3. *Il ruolo della statistica nella ricerca*
4. *Statistica e causalità*
5. *Promuovere i prodotti della ricerca*
6. *Personal branding*

Corsi universitari:

1. *Scientific programming*, Scuola Normale Superiore, gennaio-giugno 2019
2. *Teoria dell'errore nelle misure sperimentali*, Dottorato in Ing. Industriale, 2019
3. *Meccanica dei trasduttori*, Università di Pisa, marzo-giugno 2019
4. *Ottimizzazione*, Dottorato in Ingegneria Industriale, 2019

Summer schools e giornate di studio:

1. *Metallurgy summer school*, AIM, Bertinoro, 22-25 luglio 2019
2. *AIAS Ph.D. Summer School*, AIAS, Ferrara, giugno 2019
3. *Master Additive Manufacturing 2018*, RINA & PoliMI, Milano, 4-6 dicembre 2018
4. *Tecniche di analisi superficiale*, AIM, Bologna, 1-2 febbraio 2019
5. *Trattamento termico di materiali e componenti prodotti per manifattura additiva*, AIM, Fornovo di Taro, marzo 2019
6. *Microscopia elettronica in scansione SEM per metallurgisti*, AIM, Lecco, 2019