

ADDITIVE MANUFACTURING, DIGITAL TWIN E PROCESSI AVANZATI PER LA PERSONALIZZAZIONE DI PRODOTTO

Giovanna Rotella*, Maria Rosaria Saffioti**

*Professore associato presso il Dipartimento di Ingegneria, LUM Giuseppe Degennaro, Casamassima, BA 70010 rotella@lum.it

** Dipartimento di Ingegneria Meccanica Energetica e Gestionale, Università della Calabria, CS 87036 mariarosaria.saffioti@unical.it

SOMMARIO

L’innovazione tecnologica offre l’opportunità di fabbricare prodotti e componenti in modi alternativi e con caratteristiche speciali, che non dipendono strettamente dal processo di produzione primario. In particolare, lo *smart manufacturing* ricerca sistemi flessibili e prodotti personalizzabili, riconoscendo nei processi di produzione additiva (*Additive manufacturing*, AM) un elemento chiave. Per integrare con successo l’AM nella catena di produzione è necessario però superare i suoi limiti in termini di qualità e affidabilità del prodotto finale, scegliendo opportunamente i processi secondari da eseguire sui prodotti realizzati. Questo studio ha l’obiettivo di approfondire la possibilità di migliorare significativamente le prestazioni dei prodotti AM utilizzando un processo rispettoso dell’ambiente, come il *burnishing*, abbinato a un modello di simulazione numerica a supporto dello sviluppo di un processo di produzione flessibile, in grado di conformarsi ai principi alla base dell’Industria 4.0.

1. INTRODUZIONE

L’avvio del processo di trasformazione digitale, nell’ambito dell’Industria 4.0 sta offrendo ai produttori l’opportunità di trovare un compromesso tra personalizzazione del prodotto, flessibilità dei processi e competitività sul mercato.

Nel corso del tempo si sono verificati continui cambiamenti nella produzione industriale. All’inizio esisteva il paradigma della produzione artigianale (CP), in cui una piccola gamma di prodotti veniva fabbricata a costi elevati secondo le specifiche del cliente.

Successivamente è stata introdotta la produzione di massa (MP) basata su sistemi di produzione su larga scala, creando beni a basso costo, ancora con un portafoglio molto ristretto. Poi, con la finalità di ampliare la varietà di prodotti offerti ai clienti, è emerso il paradigma della produzione customizzata di massa (MCP). Quest’ultima ha comportato il ricorso alla pratica dell’automazione, dell’ampio utilizzo dei dati e delle tecnologie informatiche, ricorso che ha consentito di realizzare un’ampia gamma di prodotti attraverso processi più veloci e computerizzati, una maggiore flessibilità, un’elevata produttività e una sensibile riduzione dei costi [1].

Oggigiorno, il focus delle aziende sta cambiando nuovamente. All’impegno a migliorare produttività e flessibilità si aggiunge l’integrazione con il cliente finalizzata alla massimizzazione dei rendimenti con il ricorso alla definizione dei paradigmi di produzione personalizzata di massa (MPP).

Di conseguenza, come già tradizionalmente avveniva per il fornitore, ora i clienti svolgono un ruolo attivo nel processo produttivo, costruendo i propri prodotti

in base a loro specifiche esigenze [2].

Una tecnologia nuova, la produzione additiva (AM), sta emergendo come uno dei pilastri della quarta rivoluzione industriale, che promuove strategie di flessibilità proattive [3]. La produzione additiva, diversamente da quella convenzionale (CM), che solitamente prevede processi di asportazione di materiale per ottenere la forma desiderata, può essere definita come il processo in grado di creare oggetti 3D andando ad aggiungere materiale strato per strato.

Nate come tecnologie per produrre pezzi utili al processo di sviluppo del prodotto interno all’azienda (prototipazione rapida), le tecnologie AM sono state poi intensamente sviluppate per soddisfare i requisiti della produzione industriale. In effetti, tale tecnologia risponde alla sfida di realizzare prodotti personalizzati a un costo accessibile. Tuttavia, per consentire in modo efficace la produzione di una varietà di prodotti personalizzati, è necessario integrare le macchine AM in un sistema di produzione capace di svolgere altre lavorazioni. E, in ogni caso, è essenziale garantire che l’efficienza della produzione non sia influenzata dalla variazione del tempo ciclo [4].

Se la produzione sottrattiva (SM) convenzionale è ancora preferita per la realizzazione di massa di prodotti a bassa complessità, i sistemi di produzione additiva possono garantire una riduzione dei costi quando è necessario produrre beni ad alta complessità. Pertanto, un confronto basato solo sui volumi di produzione non è adeguato a rappresentare in modo esaustivo il confine tra AM e SM in termini di rapporto costo/efficienza. A questo proposito Fera et al. [5] hanno presentato una metodologia per valutare l’idoneità dell’utilizzo dell’AM con riferimento alle ca-

ratteristiche del prodotto, tracciando un diagramma di convenienza basato su una definizione di indice di complessità.

Uno dei principali vantaggi attribuiti ai processi AM è la possibilità di fabbricare un prodotto finale in un unico passaggio, al contrario della CM che richiede più fasi e processi con il necessario trasferimento del prodotto semilavorato da una macchina all'altra [6]. Tuttavia, i prodotti AM possono presentare una limitata affidabilità dovuta alla scarsa qualità superficiale, alla porosità, all’anisotropia, alla mancanza di precisione e accuratezza, ecc., e ciò può richiedere, per conseguenza, ulteriori trattamenti termici e lavorazioni secondarie [7, 8]. E talvolta non si può fare a meno di affrontare le problematiche sopra menzionate. Per esempio, quando si producono componenti per applicazioni critiche (in campo aeronautico o biomedicale), che comportano elevata resistenza ai carichi di fatica e condizioni di lavoro complesse.

I vantaggi legati ai processi di finitura vanno da una migliore durata a fatica a una maggiore resistenza alla corrosione e a un aumento della resistenza. A questo proposito, il processo di *burnishing* può sostituire con successo altri processi di finitura superficiale come levigatura, rettifica e superfinitura [9, 10] e recenti sviluppi riguardano la possibilità di lavorare parti di forma complessa [11].

Il *burnishing* è un processo di deformazione plastica (SPD), senza asportazione di materiale, in grado di modificare le caratteristiche della superficie. Più nel dettaglio, esso aumenta le prestazioni del prodotto modificandone la superficie nel senso di comprimere le asperità e di eliminare le microfessurazioni e i vuoti derivanti da precedenti processi produttivi.

In questo studio, il processo di *burnishing* è stato applicato come processo secondario in grado di adattarsi ai principi dello *Smart Manufacturing*.

È stata eseguita una campagna sperimentale per va-

lutare la capacità del processo di migliorare l'integrità della superficie e la vita a fatica ad alto numero di cicli dei campioni prodotti con la tecnica additiva.

Inoltre, è stato sviluppato un *digital twin* del processo (mediante il metodo agli elementi finiti) per descriverne le peculiarità e prevederne l'influenza sulla qualità complessiva del prodotto. Tale metodologia sostituisce con successo ulteriori costosi test sperimentali. Infatti, nei termini del paradigma della produzione personalizzata di massa di cui si è detto, la simulazione del processo consente di ottimizzare il processo in termini di parametri di lavoro e condizioni di lubrificazione, contribuendo ulteriormente alla realizzazione di prodotti personalizzati a costi ragionevoli e aprendo la strada allo sviluppo di un *digital twin* di processo più complesso.

2. MATERIALI E METODI

2.1. Procedura sperimentale

La campagna sperimentale [12] è stata condotta su campioni di acciaio inossidabile GP1 ottenuti mediante processo di stampa a letto di polvere (L-PBF). Sono stati utilizzati parametri di costruzione standard ottimizzati da EOS GmbH. I campioni prodotti in modo additivo avevano la forma di osso di cane (Figura 1 e Figura 2).

I campioni ottenuti dalla stampa, detti *as printed* (AP) sono stati trattati termicamente per ridurre la porosità e rilassare le tensioni residue ottenute dal processo di stampa.

Successivamente, i campioni sono stati lavorati con parametri di finitura standard per rimuovere i residui di polvere non fusa e ottenere una finitura superficiale ragionevole. Dopo il processo di tornitura, i test di *burnishing* sono stati eseguiti utilizzando un utensile a rullo commerciale dotato di un sistema di regola-

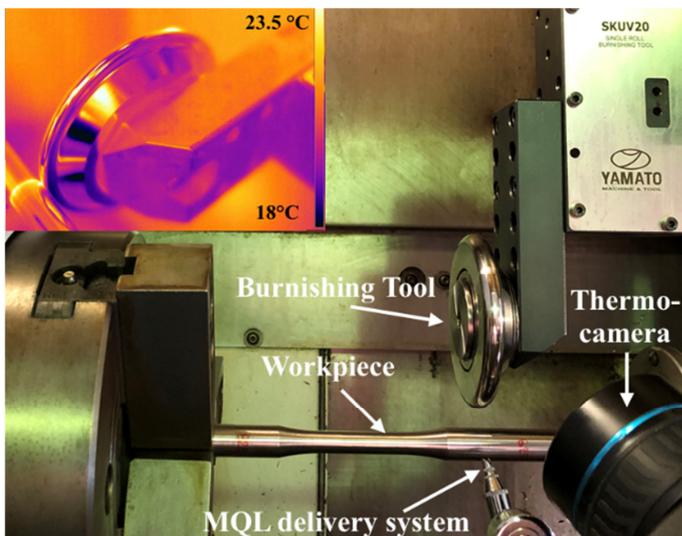


Figura 1. Set up sperimentale per prove di *burnishing*

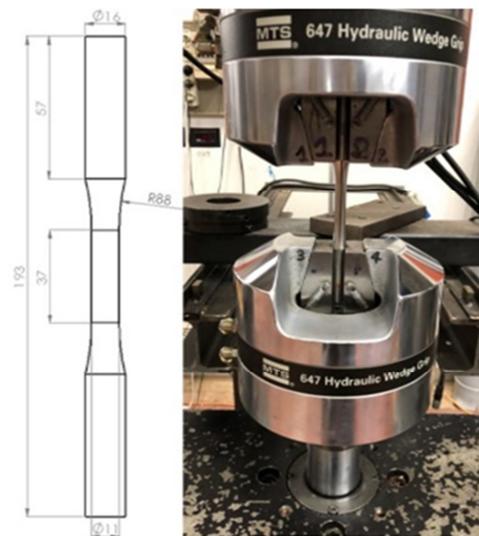


Figura 2. Specifiche e configurazione del campione di fatica

zione della forza a molla e in condizioni di quantità minima di lubrificazione (MQL), utilizzando un olio biodegradabile.

Per quanto riguarda la lubrificazione nei processi di deformazione plastica severa (SPD), vale la pena considerare le questioni ambientali correlate, come l’uso indiscriminato di fluidi per la lavorazione dei metalli (MWF) e i rifiuti generati.

Refrigeranti e lubrificanti sono tradizionalmente sinonimo di produzione di prodotti industriali metallici, mentre oggi il primo passo necessario per rendere il processo più sostenibile è eliminare i rifiuti che non sono parte del prodotto finale. Tuttavia, la totale assenza di raffreddamento/lubrificazione può comportare un’usura accelerata dell’utensile, tensioni residue indesiderate e una scarsa finitura superficiale. È importante, allora, realizzare prodotti utilizzando metodi e processi più sostenibili, riducendo al minimo l’uso di refrigeranti/lubrificanti.

Uno dei metodi più comunemente utilizzati per limitare questi problemi è quello del MQL. Questo rappresenta un’alternativa laddove non sono applicabili i processi a secco, garantendo le stesse prestazioni del prodotto e fornendo un ambiente di lavoro sano e sicuro. Nei processi assistiti da MQL, un lubrificante viene spruzzato in quantità molto piccole sull’interfaccia utensile-pezzo e, penetrando nella zona di contatto, fornisce effetti di lubrificazione e raffreddamento sufficienti alla lavorazione.

Sono stati eseguiti test di fatica ad alto numero di cicli (Figura 2) al fine di verificare la capacità del processo di *burnishing* di migliorare la qualità dei prodotti fabbricati in modo additivo e di raggiungere il limite di fatica a un determinato numero di cicli.

2.2 Digital twin della lavorazione

È stato sviluppato un modello numerico 3D del processo di rullatura utilizzando il software SFTC DEFORM© per consentire una comprensione approfondita e l’ottimizzazione del sistema reale oggetto della campagna sperimentale. Lo scopo principale è quello di studiare l’effetto di diverse condizioni di processo e parametri quali la dimensione caratteristica dell’utensile, la forza di *burnishing*, la velocità di avanzamento e il numero di passate (Figura 3) sulla qualità risultante del prodotto, che può essere espressa in termini di microstruttura, durezza, tensioni residue, rugosità, spessore dello strato alterato dalla lavorazione, ecc.

Nella simulazione, un rullo rigido si contrappone al pezzo con un movimento a spostamento controllato. Successivamente il pezzo è messo in rotazione, consentendo così la trasmissione del moto all’utensile per effetto dell’attrito. In questa seconda fase, la for-

za trasmessa ha raggiunto un valore costante consentendo di definire un valore di spostamento imposto (profondità di *burnishing*) equivalente alla forza applicata sperimentalmente. La Figura 4 mostra le condizioni al contorno e di movimento utilizzate nel modello, insieme alla *mesh*, che è più fitta nell’area di contatto.

A valle della validazione del modello numerico, è possibile ottimizzare le condizioni del processo senza la necessità di ulteriori test sperimentali, come spiegato nel diagramma di flusso riportato in Figura 5.

Pertanto, esiste un grande potenziale per una corretta pianificazione del processo e per una riduzione in termini di costi, materiali e scarti senza compromettere l’affidabilità dei risultati ottenuti. Inoltre, l’unione del processo simulato e con quello reale consente al produttore di soddisfare le esigenze particolari del cliente avvicinandosi il più possibile al concetto di *complexity is free* abbracciato con la produzione additiva. Infatti, dopo aver opportunamente correlato le proprie richieste alle specifiche tecniche e averle convertite in proprietà meccaniche, è possibile ottenere i parametri ottimizzati direttamente dal modello nu-

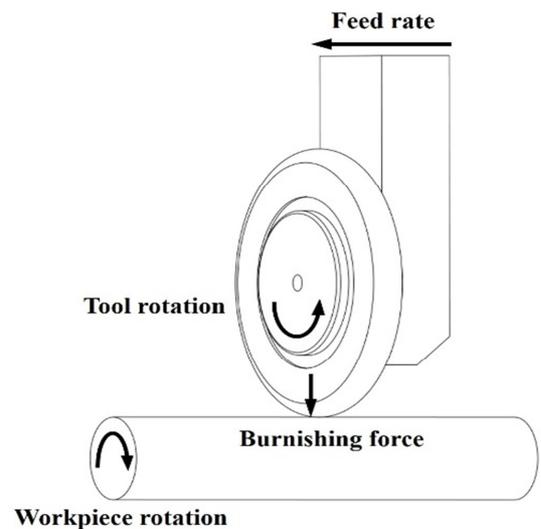


Figura 3. Schema del processo di burnishing .

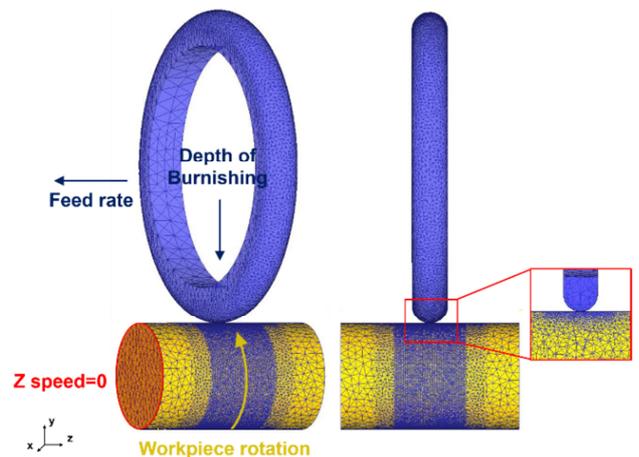


Figura 4. Condizioni al contorno e di moto del modello.

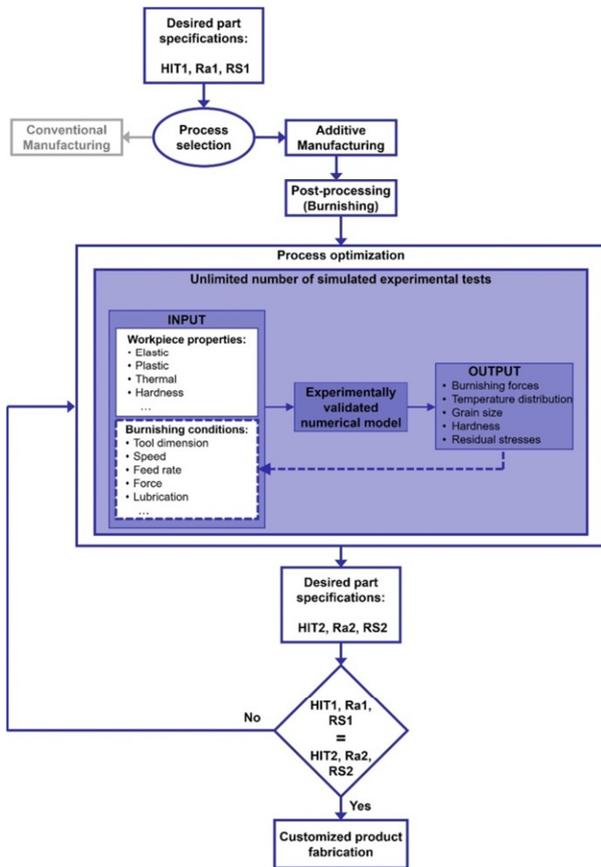


Figura 5. Workflow per la selezione e l’ottimizzazione del processo.

merico.

Infine, è importante porre l’attenzione sui parametri riportati in Figura 5, ovvero durezza (HIT), rugosità (Ra) e tensioni residue (RS), che sono fattori determinanti per applicazioni meccaniche e che richiedono elevata resistenza a fatica.

3. RISULTATI

Il processo di *burnishing* aiuta a migliorare la qualità della superficie e sub-superficiale dei campioni in termini di rugosità superficiale, durezza, porosità e tensioni residue. Infatti, la rugosità superficiale (Ra) dei campioni precedentemente di circa 11m, dopo la tornitura raggiunge un valore di 0.45m e, nella migliore condizione di processo, scende a 0.17m dopo il *burnishing*. Dopo il processo di *burnishing* è stato osservato un cambiamento consistente nella durezza superficiale, come mostrato nella Tabella 1.

È stato inoltre riscontrato un livello di tensioni residue di compressione sopra e sotto la superficie lavorata. La Figura 6 mostra i risultati ottenuti per uno dei campioni testati.

L’azione simultanea degli effetti sopra menzionati ha portato a un aumento fino al 100% della vita a fatica ad alto numero di cicli (Figura 7) rispetto ai campioni stampati. Diversamente, i campioni torniti hanno

portato ad un miglioramento della vita a fatica di circa il 20%.

Tabella 1. Valori di durezza superficiale per i test su as printed (AP), tornito (AT), miglior risultato burnishing (BR) e peggiore risultato burnishing (WR).

Campione	AP	AT	BR	W.R
HIT [GPa]	1.9	2.3	5.0	3.4

4. CONCLUSIONI

In questo lavoro si è dimostrata la validità della *process chain* progettata per la produzione di prodotti personalizzati. In particolare, la linea di produzione comprende la produzione del prodotto vicino alla forma finale mediante produzione additiva, con la conseguenza di una riduzione dei costi, dei tempi e degli scarti generati, e la successiva lavorazione meccanica per rimuovere lo strato superficiale esterno generato dal processo AM, più rugoso ed eterogeneo. Successivamente, il processo di *burnishing* consente al prodotto di raggiungere una qualità superficiale superiore, insieme a un notevole miglioramento delle prestazioni in servizio.

La presenza di un modello di simulazione in grado di prevedere in modo affidabile la qualità del prodotto

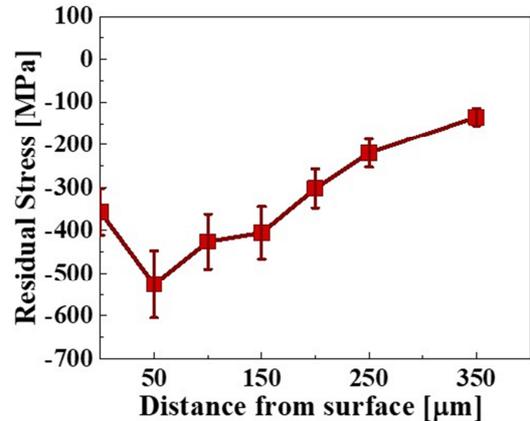


Figura 6. Profilo delle tensioni residue per un campione lavorato .

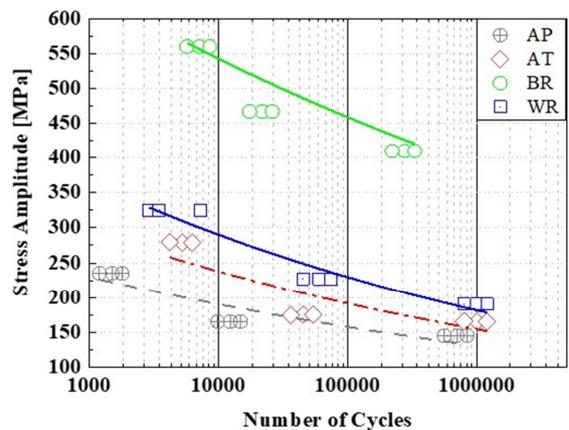


Figura 7. Vita a fatica ad alto numero di cicli per stampato (AP), tornito (AT), miglior risultato *burnishing* (BR) e peggiore risultato *burnishing* (WR).

finale nei termini dei principali fattori che ne influenzano le prestazioni, contribuisce a ridurre drasticamente i risultati sperimentali necessari, portando ad un'enorme riduzione dei costi e dei tempi di produzione. Inoltre, le implicazioni di sostenibilità della catena configurata sono rilevanti, considerando la riduzione dei rischi per i lavoratori e le ripercussioni sull'ambiente che una notevole riduzione della quantità di lubrificanti utilizzati (e di rifiuti prodotti) comporta.

I risultati complessivi dimostrano come il processo considerato possa essere implementato con successo in un contesto industriale per realizzare un prodotto personalizzato e di alta qualità.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Wang, Y., Ma, H. S., Yang, J. H., and Wang, K. S. (2017). Industry 4.0: a way from mass customization to mass personalization production. *Advances in Manufacturing*, 5(4): 311–320.
- [2] Koren, Y., Shpitalni, M., Gu, P., and Hu, S. J. (2015). Product design for mass-individualization. *Procedia CIRP*, 36: 64–71.
- [3] Brettel, M., Klein, M., and Friederichsen, N. (2016). The Relevance of Manufacturing Flexibility in the Context of Industrie 4.0. *Procedia CIRP*, 41: 105–110.
- [4] Gu, X., and Koren, Y. (2018). Manufacturing system architecture for cost-effective mass-individualization. *Manufacturing Letters*, 16: 44–48.
- [5] Fera, M., Macchiaroli, R., Fruggiero, F., and Lambiase, A. (2018). A new perspective for production process analysis using additive manufacturing—complexity vs production volume. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 95(1–4): 673–685.
- [6] Gibson, I., Rosen, D., and Stucker, B. (2015). Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing, second edition. In *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing, Second Edition*.
- [7] Abdulhameed, O., Al-Ahmari, A., Ameen, W., and Mian, S. H. (2019). Additive manufacturing: Challenges, trends, and applications. *Advances in Mechanical Engineering* 11(2): 1–27.
- [8] Yang, Y., Gong, Y., Qu, S., Rong, Y., Sun, Y., and Cai, M. (2018). Densification, surface morphology, microstructure and mechanical properties of 316L fabricated by hybrid manufacturing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 97(5–8): 2687–2696.
- [9] Schulze, V., Bleicher, F., Groche, P., Guo, Y. B., and Pyun, Y. S. (2016). Surface modification by machine hammer peening and burnishing. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 65(2): 809–832.
- [10] Delgado, P., Cuesta, I. I., Alegre, J. M., and Díaz, A. (2016). State of the art of Deep Rolling. *Precision Engineering* 46: 1–10.
- [11] De Lacalle, L. N. L., Rodriguez, A., Lamikiz, A., Celaya, A., and Alberdi, R. (2011). Five-axis machining and burnishing of complex parts for the improvement of surface roughness. *Materials and Manufacturing Processes* 26(8): 997–1003.
- [12] Rotella, G., Filice, L., and Micari, F. (2020). Improving surface integrity of additively manufactured GP1 stainless steel by roller burnishing. *CIRP Annals* 69: 513–516.