

IL MONITORAGGIO DEI PROCESSI ADDITIVI

Marco Grasso, Ali Gokhan Demir, Stefania Cacace,
Bianca Maria Colosimo, Barbara Previtali, Quirico Semeraro

AddMe.Lab, Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Milano

I processi additivi di parti funzionali metalliche stanno attirando un enorme interesse in molti settori industriali, per esempio nei settori aerospaziale, medicale e della meccanica avanzata (inserti di stampi ed utensili), grazie alle notevoli potenzialità offerte, specialmente, ma non solo, per la produzione di parti dalla geometria complessa che sono difficili o impossibili da produrre con le tecnologie tradizionali.

La grande varietà di tecnologie in continua evoluzione ha portato alla definizione di varie categorie di processi e ad una lista di termini

approvati raccolti nella norma ASTM F2792 [1]. Tra le varie tecnologie additive classificate in tale lista, cinque categorie sono in grado di operare su materiali metallici: tecnologie basate sulla fusione di un letto di polveri (Powder Bed Fusion – PBF), a deposizione diretta (Directed Energy Deposition – DED), binder jetting, material jetting e sheet lamination. I sistemi PBF e DED sono quelli più utilizzati e studiati in quanto di maggior interesse per applicazioni industriali. I sistemi PBF, in particolare, utilizzano una sorgente termica per fondere in modo selettivo e locale i grani di un letto di polvere che viene depositato strato dopo strato su una piastra di supporto. Tra le varie tecnologie PBF, quelle che hanno avuto maggiore diffusione grazie alle loro prestazioni sono basate su laser, inizialmente Selective Laser Sintering – SLS, oggi Selective Laser Melting – SLM, oppure su fascio di elettroni, Electron Beam Melting – EBM.

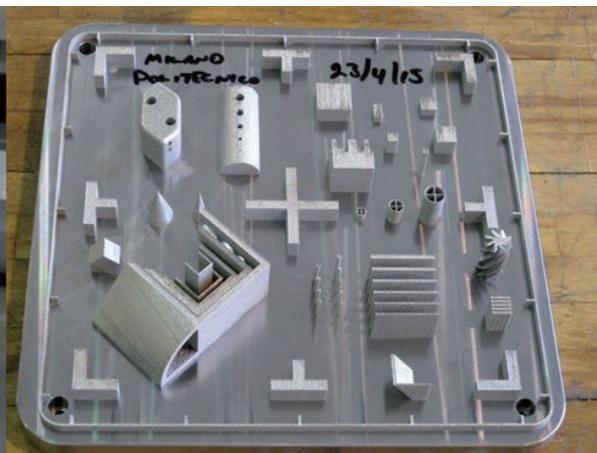
Per poter migliorare la qualità dei processi additivi è prima di tutto fondamentale conoscere come i parametri di processo influenzano le caratteristiche di densità, accuratezza dimensionale, finitura superficiale e le proprietà meccaniche della parte prodotta. Tale conoscenza può permettere di agire sui parametri controllabili (potenza laser, percorso e strategie di scanning, spessore dello strato di polvere, ecc.) in fase di progettazione e definizione delle strategie di lavorazione. Diversi studi [2] hanno però mostrato come le caratteristiche di qualità possano evolvere da strato a strato portando a difettosità e problemi non previsti. Per questo motivo diventa particolarmente critica la capacità di ottenere informazioni sulla qualità e stabilità della lavorazione durante il processo stesso, attraverso sistemi di monitoraggio. Le informazioni raccolte in-processo posso infatti permettere di chiudere loop di controllo per adattare on-line i parametri in funzione della conoscenza dello stato reale del processo.

Il monitoraggio di processo per sistemi SLM

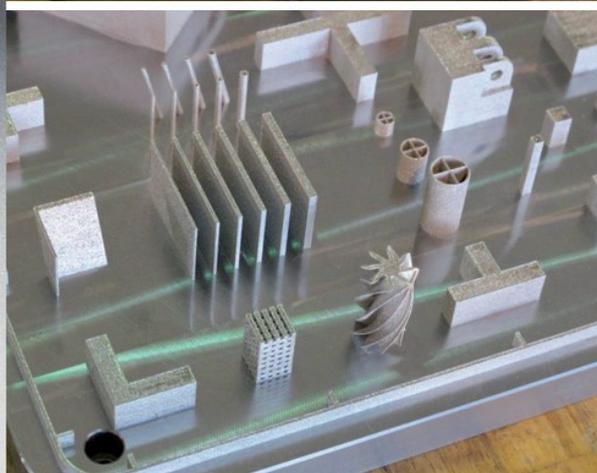
Le principali sfide verso cui indirizzare gli sforzi di ricerca nell'ambito dei processi additivi riguardano la qualità, la capacità e la ripetibilità dei processi attualmente disponibili. A differenza dei sistemi produttivi tradizionali, le procedure di controllo della qualità basate su misure a campione sul prodotto sono di difficile impiego nei processi additivi per almeno due motivi. Il primo



**I PROCESSI ADDITIVI
SONO OGGI AL CENTRO
DI VARI PROGRAMMI DI
RICERCA FORTEMENTE
ORIENTATI ALLO
SVILUPPO INDUSTRIALE.**



Esempio di alcune parti prodotte presso l'AddMe. Lab di Milano. La macchina impiegata è una Renishaw AM250, il materiale impiegato acciaio AISI 316L.



Dettaglio di alcune parti prodotte presso l'AddMe. Lab di Milano su acciaio AISI 316L.

riguarda la difficoltà di effettuare misure su geometrie estremamente complesse, che possono includere anche feature interne come strutture lattice e honeycomb. Il secondo riguarda la numerosità delle parti prodotte: per ora si ha a che fare principalmente con lavorazioni one-of-a-kind per applicazioni ad alta customizzazione (si pensi alle protesi in ambito medico o ad un inserto per uno stampo da iniezione plastica) oppure per piccoli lotti. In tale contesto l'unica possibile alternativa alle procedure tradizionali di monitoraggio della qualità è rappresentata dal monitoraggio in-process, basato su analisi di segnali acquisiti da sensori montati in macchina. Per questo motivo la sensorizzazione dei sistemi è alla base dei più recenti studi sull'ottimizzazione dei processi additive. Nell'ambito dei processi in cui la sorgente termica è rappresentata da un laser, ed in particolare i processi SLM, alcune grandezze e variabili misurate strato dopo strato possono essere misurate e analizzate per avere un'informazione indiretta sulle proprietà della parte prodotta che includono la porosità, l'accuratezza dimensionale, la finitura superficiale e le sue proprietà meccaniche. La maggior parte degli studi più recenti [2] si concentra sul campo di temperatura in corrispondenza della pozza fusa e della zona circostante come proxy della qualità a livello micro e macro-strutturale. Alcuni autori [2 - 3] hanno mostrato che un campo di temperatura omogeneo comporta microstruttura e proprietà meccaniche migliori. Per questo motivo le misure termiche risultano di particolare interesse nel riconoscimento in linea di

eventuali difettosità localizzate. Le misure di temperatura e la caratterizzazione dei transistori termici sono anche utili a determinare l'insorgere di difettosità di tipo geometrico e legate alla finitura superficiale. Il monitoraggio di processo attraverso misure termiche può essere ottenuto in diversi modi, a seconda della tipologia di processo e delle caratteristiche di qualità di interesse. La misura può essere ottenuta con strumenti a contatto (termocoppie) e a distanza. La misura a contatto è molto poco flessibile e poco efficace nella maggior parte dei casi, e quindi le misure di temperatura con strumenti non a contatto sono quelle più studiate [2]. A tale scopo possono essere utilizzate misure puntuali (attraverso fotodiodi) o misure di aree (attraverso camere digitali), sia di tipo tradizionale (spettro visibile) che di tipo termico (spettro infrarossi). Inoltre, a causa delle elevate velocità di scanning, il monitoraggio del campo termico attorno alla pozza fusa richiede elevati frame-rate che possono essere ottenuti con camere e termo-camere ad alta velocità. A differenza dei fotodiodi che, integrando spazialmente l'informazione, forniscono una singola misura numerica, camere e termo-camere forniscono una rappresentazione della mappa termica nella zona di interesse e sono quindi in grado di caratterizzare in modo più ricco l'evoluzione temporale del processo. In generale però i due tipi di sensore possono essere utilizzati in modo complementare. Ad esempio, presso l'università di Leuven [4 - 5] è stato sviluppato un sistema ripreso e adattato da altri autori [6 - 7] che accoppia una camera ad alta velocità nel vicino

infrarosso ed un fotodiode entrambi coassiali rispetto al percorso ottico del laser. La camera è utilizzata per misurare le dimensioni della pozza fusa ad un frame-rate di 10 kHz, mentre il fotodiode misura la radiazione media emessa dalla pozza fusa a frame-rate ancora più elevati. Lo studio delle caratteristiche geometriche e termiche della pozza fusa permette di riconoscere eventuali anomalie in zone a sbalzo, cioè in zone in cui la polvere viene fusa su un precedente strato di polvere non fuso. L'uso di supporti non adeguati comporta una scarsa qualità in queste aree che può essere riconosciuta on-line, e in alcuni casi è possibile mitigare il problema adattando le strategie di scanning e/o i parametri di processo. Altre anomalie che possono essere individuate studiando la pozza fusa riguardano possibili errori geometrici nelle parti del prodotto con angoli acuti oppure errori indotti da strategie di scanning non adeguate alla geometria locale della parte. Altri studi [6] hanno mostrato che il monitoraggio delle proprietà della pozza fusa con sensori coassiali e non coassiali permette di riconoscere vari tipi di anomalie, tra cui surriscaldamenti che portano ad una fusione eccessiva

Allestimento per test di monitoraggio sulla macchina Renishaw AM250 presso AddMe. Lab, con camera ad alta velocità (10 kfps) montata esternamente alla camera di lavoro.

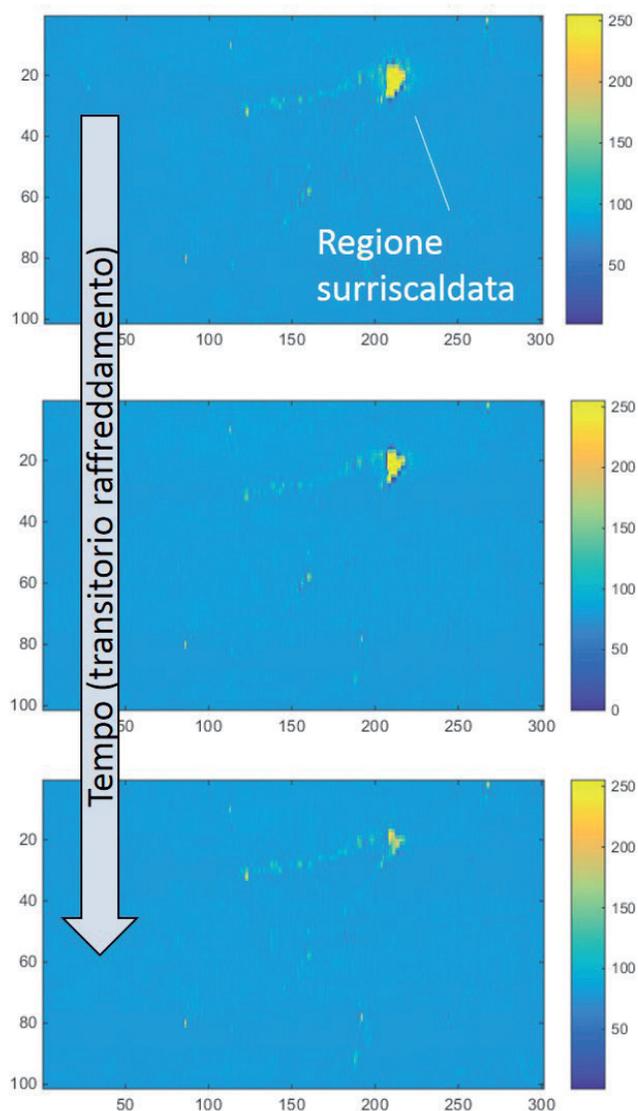


in alcune parti critiche del prodotto, e presenza di porosità localizzate che producono distorsioni della distribuzione di temperatura misurata.

Oltre alle misure termiche esistono altre grandezze di interesse, tra cui lo spessore del letto di polvere e la sua omogeneità nell'intera area di lavoro. Per questo tipo di misura in alcuni casi è stato studiato l'uso di sensori di prossimità [2]. E' comunque evidente che la misura in-process di grandezze diverse e con strumenti di monitoraggio differenti porta alla necessità di sviluppare metodologie analitiche in grado di fondere le informazioni dai vari sensori in modo efficace e computazionalmente efficiente.

Le sfide da affrontare

Oltre ai molti problemi aperti che rappresentano i principali e più recenti temi di ricerca in questo campo, esistono diverse sfide a livello di sensorizzazione delle macchine e di implementazione industriale delle strategie di monitoraggio. Una criticità riguarda i costi dei sensori, in particolare delle termocamere che devono



RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI:

[1] American Society of Testing Materials, 2012, "ASTM F2792—12a: Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies," <http://www.astm.org/Standards/F2792.htm>

[2] Tapia, G., & Elwany, A. (2014). A Review on Process Monitoring and Control in Metal-Based Additive Manufacturing. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 136(6), 060801.

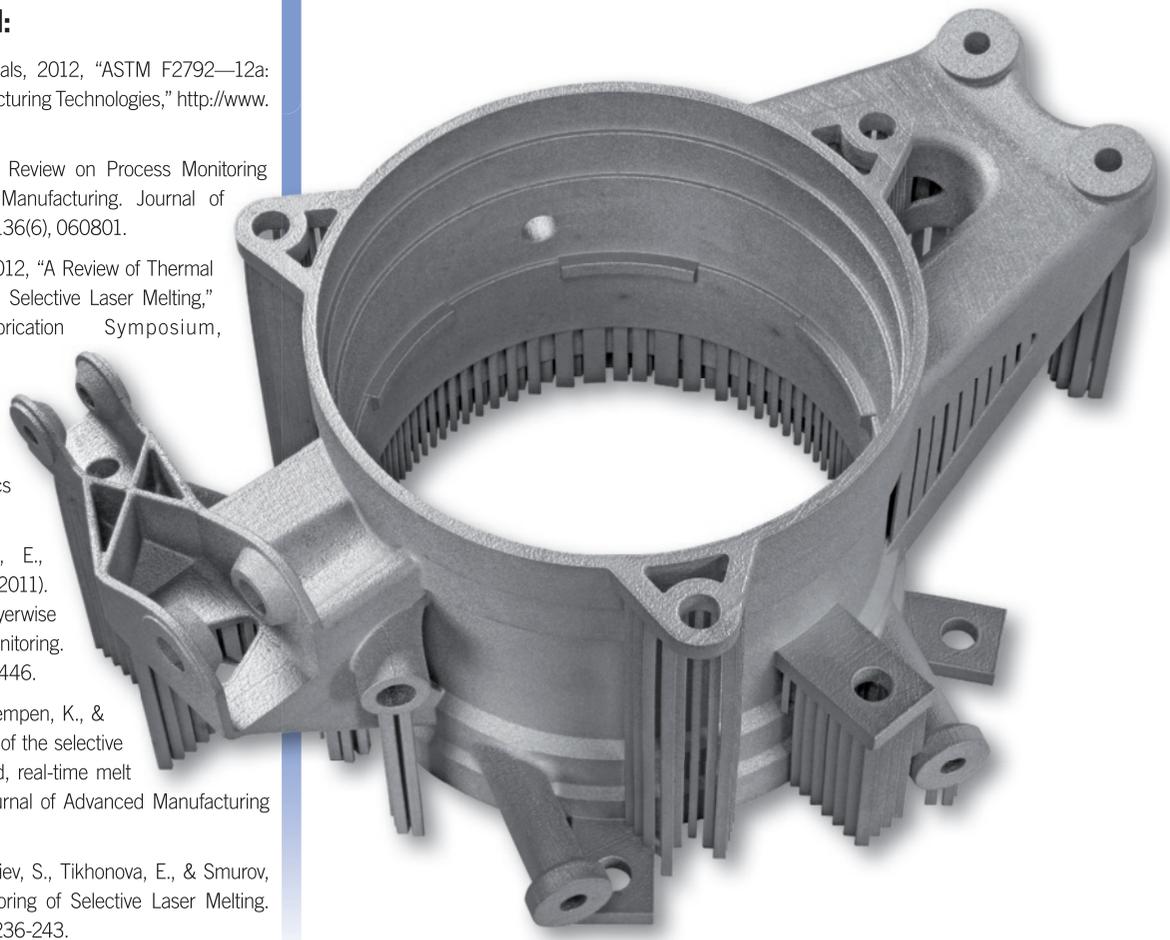
[3] Zeng, K., Pal, D., and Stucker, B., 2012, "A Review of Thermal Analysis Methods in Laser Sintering and Selective Laser Melting," *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium*, Austin, TX, pp. 796–814.

[4] Craeghs, T., Bechmann, F., Berumen, S., & Kruth, J.-P. (2010). Feedback control of Layerwise Laser Melting using optical sensors. *Physics Procedia*, 505–514.

[5] Craeghs, T., Clijsters, S., Yasa, E., Bechmann, F., Berumen, S., & Kruth, J.-P. (2011). Determination of geometrical factors in Layerwise Laser Melting using optical process monitoring. *Optics and Lasers in Engineering*, 1440–1446.

[6] Clijsters, S., Craeghs, T., Buls, S., Kempen, K., & Kruth, J.-P. (2014). In situ quality control of the selective laser melting process using a high-speed, real-time melt pool monitoring system. *International Journal of Advanced Manufacturing Technologies*, 1089–1101.

[7] Doubenskaia, M., Pavlov, M., Grigoriev, S., Tikhonova, E., & Smurov, I. (2012). Comprehensive Optical Monitoring of Selective Laser Melting. *Journal of Laser Micro/Nanoengineering*, 236–243.



fornire dati ad alta risoluzione spaziale e temporale, con range di temperatura molto ampi. Così come per le tecnologie convenzionali, è necessario studiare soluzioni di compromesso tra i costi dovuti alla strumentazione della macchina e i benefici ottenibili in termini di qualità e ripetibilità dei processi.

Un altro problema riguarda l'intrusività dei sensori. Installare sensori coassiali con il percorso ottico del laser richiede un intervento sulla macchina, ma anche l'uso di sensori non co-assiali è problematico a causa delle grandi dimensioni di termo-camere e camere che abbiano le prestazioni desiderate.

Un'ulteriore sfida è rappresentata dalla necessità di processare immagini acquisite ad alto frame-rate senza che questo comporti un collo di bottiglia computazionale per i sistemi di monitoraggio in-process. Sono necessari quindi algoritmi e metodi di processamento estremamente efficienti.

Anche la calibrazione degli strumenti ottici è particolarmente complessa e richiede una misura accurata della emissività dell'oggetto monitorato, complicata dalla trasformazione fisica subita dal materiale durante il processo. In molti casi è inoltre necessario l'uso di filtri e/o di fonti di radiazione esterna per ottenere misure affidabili e rappresentative dell'evoluzione temporale del processo. Affrontare tali sfide richiede conoscenze multidisciplinari che vanno dalle tecnologie meccaniche all'ottica, dalle

tecniche di monitoraggio statistico alla scienza dei materiali.

L'importanza di mettere a sistema competenze multidisciplinari

Il forte interesse industriale e i molti problemi aperti che caratterizzano la ricerca nell'ambito dei processi additivi hanno portato alla nascita del laboratorio AddMe.Lab presso il Dipartimento di Meccanica del Politecnico di Milano. AddMe.Lab è un laboratorio dedicato allo studio delle lavorazioni additive di polveri metalliche, attualmente attrezzato con un sistema a letto di polvere Renishaw AM250. Obiettivo del nuovo laboratorio è la messa a sistema di conoscenze e competenze multidisciplinari per affrontare le sfide e cogliere le opportunità dei processi additivi per materiali metallici. Il laboratorio, che coinvolge diversi gruppi di ricerca e la partnership di diverse aziende interessate ad investire in ricerca e innovazione in questo campo, è fortemente orientato alla ricerca applicata e al miglioramento dei processi per un uso industriale sempre più esteso ed integrato. Per questo motivo, oltre all'ottimizzazione di qualità e capacità di processo e al monitoraggio in-process, AddMe.Lab si pone come obiettivo anche la riprogettazione dei sistemi produttivi attraverso l'integrazione di sistemi ibridi, cioè in grado di accoppiare processi additivi e sottrattivi per garantire la qualità funzionale desiderata.