

Multi-scale material modeling for additive manufacturing

Sylvain Mathieu - e-Xstream engineering



S. Mathieu

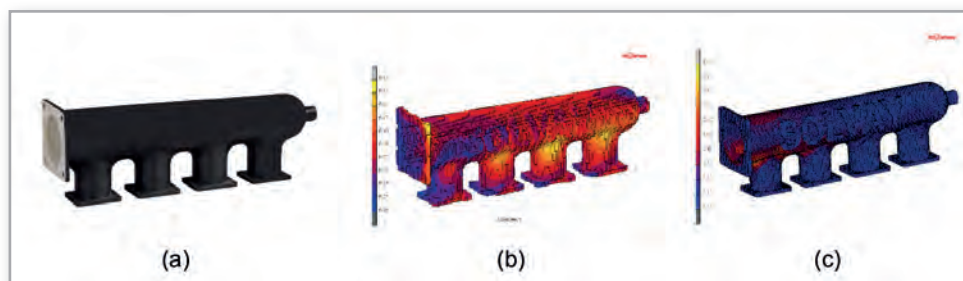
Additive layer manufacturing (ALM) of plastics has been rapidly developing over the last few years, notably with plastics and reinforced plastics applications. Requirements must be met to ensure competitiveness of the additive manufacturing process, such as control of process and part performance, addressing the needs of high performance industrial applications. Inherent complexity of additive manufacturing request cutting-edge simulation tools to fully unveil the potential of the additive manufacturing techniques.

Plastic part complexity has historically been strongly driving part cost. Recent developments of additive technologies have led to a shift from rapid prototyping to production of actual end-use parts, thus widening the range of design possibilities. By opposition with the now-called subtractive methods, additive layer manufacturing (ALM) regroups all

manufacturing processes allowing to process parts from 3D numerical CAD model by building them layer-by-layer.

The now irrelevant need for specific mold tooling design allows to produce low volume of highly complex parts in less time. Among

additive processes, the most mature and industrially widespread are selective laser sintering (SLS) and fused filament fabrication (FFF), sometimes referred to as fused deposition modelling (FDM). In FFF, fused material filaments are deposited through a moving



Polimotor 2 Plenum printed with Sinterline® (a), distortion - distance to targeted part (in mm) (b) Failure indicator distribution before ultimate failure of the plenum under pressure (c)

Polimotor 2 Plenum stampato con Sinterline® (a), distorsione - distanza dalla parte di interesse (in mm) (b). Indicatore del deterioramento prima del cedimento del plenum sotto pressione (c)

Modellizzazione multiscalare del materiale per la manifattura additiva

Sylvain Mathieu - e-Xstream engineering

La produzione additiva per strati (Additive Layer Manufacturing-ALM) delle plastiche si è sviluppata rapidamente in questi ultimi anni, in particolare per le applicazioni della plastica e della plastica rinforzata. Devono essere soddisfatti i requisiti che garantiscono la competitività del processo produttivo additivo, vale a dire il controllo di processo e la prestazione del componente, concentrandosi sulle esigenze delle applicazioni industriali di alta prestazione. La complessità intrinseca della produzione additiva richiede strumenti di simulazione molto avanzati al fine di scoprire le potenzialità delle tecniche di manifattura additiva.

La complessità dei componenti in plastica ha sempre costituito il fattore di costo trainante

referito al componente. Gli sviluppi recenti delle tecnologie additive hanno determinato il passaggio dalla prototipazione rapida alla produzione dei componenti finiti effettivi, ampliando così la serie delle possibilità progettuali. Diversamente da quelli che vengono definiti attualmente metodi sottrattivi, la produzione additiva per strati (ALM) raggruppa tutti i processi di produzione che consentono di trattare i componenti da un modello CAD 3D numerico costruendoli strato per strato.

L'esigenza ormai poco considerata di progettazioni di stampi specifici permette di produrre bassi volumi di parti molto complesse in breve tempo. Fra i processi additivi, i più maturi e diffusi a livello industriale sono quelli di sin-

terizzazione laser selettiva (SLS) e della fabbricazione a fusione di filamento (FFF), anche nota come modellizzazione a deposizione per fusione (FDM). Nel caso di FFF i filamenti di materiale fuso si depositano grazie a una testina mobile mentre in SLS, il materiale in polvere viene sinterizzato con l'ausilio di una fonte di calore al laser.

Entrambi SLS ed FDM possono trattare le plastiche e le plastiche rinforzate. Se è vero che i processi additivi dei polimeri rinforzati sono interessanti perché la riduzione di peso è una priorità in fase di progettazione, sono molte le sfide che si intravedono per il futuro. L'accuratezza dimensionale del componente fabbricato deve obbedire a tolleranze molto rigorose che

head while in SLS, powdered material is sintered using a laser heat source.

Both SLS and FDM are able to process plastics and reinforced plastics. While additive processes of reinforced polymers is appealing as lightweighting is a top design priority, major challenges must still be overcome. Dimensional accuracy of produced part must obey to strict tolerances that may not be ensured due to thermally induced part distortion. Material behavior is also strongly impacted by ALM processing. An anisotropic behavior usually results from the specific 3D printing pattern, even for non-reinforced plastics. The strong link between process and material performance induced by additive manufacturing technology is crucial to capture as it drives the final part performance.

These issues result from the lack of insight into ALM materials and process parameters influence. Rapid manufacturing was predominantly used to generate physical parts for visualization purposes. The focus was not on designing materials tailor-made for a specific purpose nor fine-tuning process parameters, and deposition strategies to reach the best dimensional accuracy and part performance. To ensure industrial deployment of ALM some requirements must be met:

- Insure strong replicability of process and part performance: full control and understanding of process parameters and their influence on the part quality and performance,
- Address the needs of high performance industrial applications: optimization of the process induced performance of parts.

Additive layer manufacturing offers a wide range of design choices, but also greatest processing complexity. Many cost and time consuming trial-and-error attempts may be needed to reach

potrebbero non essere garantite a causa della distorsione della parte, indotta dal calore. La risposta del materiale è anch'essa fortemente influenzata dal trattamento ALM. La risposta anisotropa deriva dal modello di stampa 3D specifico, anche per la plastica non rinforzata. Il forte legame fra prestazione del materiale e processo, determinato dalla tecnologia produttiva additiva è essenziale in quanto dà infine origine alla prestazione finale del componente. Queste problematiche derivano dalla scarsa conoscenza dell'influsso esercitato dai parametri di processo e dai materiali ALM. Il processo produttivo rapido è stato utilizzato principalmente per dare origine a componenti fisici per la visualizzazione. L'area di interesse non era rappresentata dalla progettazione dei materiali, personalizzati per scopi specifici, né l'adeguamento dei parametri di processo e le strategie di deposizione per ottenere la migliore accuratezza dimensionale e la prestazione della parte. Per garantire l'applicazione industriale di ALM, devono essere soddisfatti alcuni requisiti:

- *Assicurare la producibilità del processo e prestazione della parte: controllo totale e comprensione dei parametri di processo oltre al loro influsso sulla qualità e prestazione della parte.*
- *Adeguatezza ad applicazioni industriali di alta qualità: ottimizzazione della prestazione delle parti indotta dal processo*

consistency and expected performance for a specific part.

Those could be avoided by providing reliable sensitivity quantification on process parameters to secure consistent printing conditions, making ALM a robust manufacturing method. To meet the requirements of the industry, engineers must be able to rely on simulations, whether for material engineering, process simulation or structural engineering.

e-Xstream engineering, an MSC software company, is developing simulation tools within the Digimat software suite for SLS and FDM processes. These tools enable to design 3D printed parts that meet all dimensional and structural requirements while accounting for the chosen printing technology and material microstructure specificities. The proposed holistic approach on additive manufacturing modelling is built along three deeply connected aspects:

- Material engineering: design new materials whose microstructure and physical properties are consistent with the requirements of the

targeted ALM technology and final application.

- Process simulation: optimize printing parameters and reduce, or even suppress, part distortion while predicting residual stresses and strains.

- Part performance: evaluate the mechanical response of as-manufactured parts to improve part shape and manufacturing orientation including process-induced defects and local material properties.

This methodology has been successfully applied to the Polimotor plenum from the Polimotor 2 project, whose principal material sponsor is Solvay Engineering Plastics, a global leader in advanced polyamide solutions. The Polimotor project aims to open the way for a technological breakthrough in the automotive sector by replacing up to 10 metal parts by plastic materials in the engine Polimotor 2. The studied plenum is produced through selective laser sintering using a Sinterline® Technyl® polyamide 6 (PA6) powder grade reinforced with a 40% loading of glass beads.

A multiscale thermomechanical material

reinforced plastic is created with Digimat, and subsequently used for both process and structural engineering.

The layer-by-layer manufacturing of the plenum is modelled, followed by a static calculation to establish the ultimate pressure loading the part is able to withstand while operating.

A low distortion from the targeted shape was predicted, as well as a maximum sustained pressure of 9.1 bars which confirmed the plenum design. In addition, manufacturing guidance was provided by optimizing printing direction such that the ultimate sustainable load could be increased by 40% without adjusting the geometry.

Integrated structural and material design tools are needed to accelerate the adoption of ALM by the design community and to promote new innovative structural designs needed to save energy and weight. Experimental feedback is not efficient nor sufficient to build a reliable production workflow. Process control is the key to reach the desired dimensional and structural requirements of 3D printed part design.

La produzione additiva per strati offre un'ampia serie di scelte progettuali, ma implica anche massima complessità di processo.

Potrebbero essere richiesti molti complessi tentativi, prove e errori per ottenere infine la prestazione e le funzionalità richieste per una parte specifica. Questi stessi tentativi possono quindi essere evitati quantificando realisticamente i parametri di processo a garanzia di condizioni di stampa ideali, tali da rendere ALM un metodo produttivo molto vantaggioso. Per soddisfare i requisiti dell'industria, gli ingegneri devono essere in grado di affidarsi a simulazioni sia per la progettazione dei materiali, la simulazione di processo e la progettazione strutturale.

e-Xstream engineering, società informatica MSC, ha messo a punto strumenti per la simulazione nel software Digimat per i processi SLS e FDM. Essi permettono di progettare parti stampate in 3D che soddisfano tutti i requisiti dimensionali e strutturali pur rappresentando la tecnologia di stampa scelta e le specificità microstrutturali del materiale. L'approccio olistico proposto sulla modellizzazione della produzione additiva viene impostato in base a tre aspetti interconnessi:

- *Ingegneria del materiale: progettare nuovi materiali le cui proprietà microstrutturali e fisiche siano in linea con i requisiti della tecnologia ALM mirata e dell'applicazione finale*

- *Simulazione di processo: ottimizzare i parametri di stampa e ridurre se non addirittura eliminare la distorsione del pezzo prevedendo sollecitazioni e tensioni residue*

- *Prestazione del pezzo: valutare la risposta meccanica delle parti costruite per migliorare la forma della parte e l'orientamento di produzione fra cui i difetti indotti dal processo e le proprietà del materiale.*

Questa metodologia è stata applicata con successo al Polimotor plenum, appartenente al progetto Polimotor 2, il cui principale sponsor è Solvay Engineering Plastics, leader globale per le soluzioni avanzate in poliammide. Il progetto Polimotor mira ad aprire le porte alla rivoluzione tecnologica nel settore automobilistico sostituendo fino a 10 parti metalliche con materiali plastici nel motore Polimotor 2. L'insieme è stato prodotto per sinterizzazione al laser usando la polvere poliammidica 6 Sinterline® Technyl® (PA6) rinforzata con un carico al 40% di sfere di vetro.

La plastica rinforzata con materiale termo-

meccanico multiscalare è stata creata con Digimat, per poi essere usata per l'ingegneria di processo e strutturale. La produzione strato su strato del plenum viene modellata e seguita dal calcolo statico per definire quale carico di pressione la parte è in grado di sopportare durante l'uso.

Era stata prevista una lieve distorsione dalla forma modellata oltre ad una pressione massima di 9.1 bar, a conferma della progettazione del plenum.

Oltre a questo, le direttive per la produzione sono state fornite ottimizzando la direzione di stampa in modo che il carico massimo sostenibile potesse essere aumentato del 40% senza modificare la geometria.

Gli strumenti per la progettazione integrale strutturale e del materiale sono indispensabili per facilitare l'adozione di ALM da parte di chi realizza il progetto e promuovere altre progettazioni strutturali innovative ai fini del risparmio energetico e del peso. Il feedback sperimentale non è né efficace né sufficiente a creare un flusso di lavoro produttivo affidabile. Il controllo di processo affidabile è il segreto per soddisfare i requisiti dimensionali e strutturali desiderati dal progetto di stampa 3D.