



**ΕΘΝΙΚΟ  
ΜΕΤΣΟΒΙΟ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Α.Π. :  
Αθήνα

ΚΟΣΜΗΤΟΡΑΣ

Π ρ ο ς  
τα μέλη ΔΕΠ της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών

**Π Ρ Ο Σ Κ Λ Η Σ Η**

Παρακαλείστε να παρευρεθείτε στην παρουσίαση και εξέταση της Διδακτορικής Διατριβής που εκπόνησε στον Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ ο Υποψήφιος Διδάκτορας κ. **Αβράμπος Παναγιώτης του Ιωάννη**, διπλωματούχος της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ.

Η παρουσίαση θα πραγματοποιηθεί με φυσική παρουσία **την Τρίτη 23 Ιουλίου 2024 και ώρα 11:00 π.μ.** στην Αίθουσα Πολυμέσων Κεντρικής Βιβλιοθήκης ΕΜΠ.

Ο τίτλος της διδακτορικής του διατριβής είναι:

**Στην ελληνική γλώσσα: «Μελέτη της απόθεσης πούδρας σε κατεργασίες προσθετικής κατασκευής με σύντηξη κλίνης πούδρας μέσω laser»**

**Στην αγγλική γλώσσα: «Study of the powder deposition in Laser Powder Bed Fusion Additive Manufacturing processes»**

Ο Κοσμήτορας

Ioannis Antoniadis    Ioannis Antoniadis  
11.07.2024 13:24

Ι. Αντωνιάδης  
Καθηγητής ΕΜΠ

# Study of the powder deposition in Laser Powder Bed Fusion Additive Manufacturing processes

Ph.D. Thesis by P. Avrampos

Abstract

During the 40 years since the conception of Additive Manufacturing, Powder Bed Fusion processes have been a very important sub-category of AM, mostly due to their ability to produce metal parts of promising quality. Extensive research has been performed in order to ascend PBF processes from their initial prototype-developing status to fully industrial, large-production processes. However, despite the efforts being made, due to their high complexity, PBF processes still have not reached their potential. This work aims to contribute in this direction, and more specifically, to powder deposition. The aspect of powder deposition is of paramount importance to all PBF processes, since the quality of the deposited layer is directly connected to the mechanical properties of the finished part.

The first chapter of this thesis presents an overview of AM processes, their historical background and the development status of PBF processes. The second chapter provides a thorough analysis of the connection between powder spreading process parameters, powder layer quality and finished part quality in terms of mechanical properties. The process parameters of powder deposition are recorded and possible ways that each one affects the other are identified. Then, the quality criteria of the deposited powder layer are identified, and methods of monitoring them, both in-line and off-line, are presented. The ways in which the process parameters are deemed to affect the layer quality criteria are presented too. Subsequently, the mechanical properties that serve as quality criteria of the finished part are analyzed. Finally, the ways in which the powder layer quality criteria are deemed to affect the finished part quality criteria are explained. Extensive use of tables has been made, in order to simplify the navigation and make it easier for future researchers to use this literature review as general guidelines for optimizing the powder spreading process in their projects.

The third chapter presents a robust statistical analysis and comparison of all the powder deposition methods found in literature via Analytic Hierarchy Process. The comparison is performed by defining criteria and grading each method based on its performance with regard to each specific criterion as compared to the other methods. The importance of each criterion is subjective and the weights can be altered based on each researcher's priorities. The comparison proved that mechanical deposition is preferable with regards to other, innovative methods. Then, a prototype Powder Deposition/Recoating System is designed. The innovative design is divided in two groups, the doser/sieving group and the recoating group. Each of these groups is compared via AHP to the respective group of a commonly used powder deposition system embedded in a commercial SLM machine. The criteria based on which the comparisons will be performed are defined in advance. The AHP comparison proved superiority of the suggested design.

The fourth chapter of this thesis presents the modelling of powder in Discrete Element Method (DEM) simulations and the optimization of doctor-blade facilitated, vibration-assisted mechanical spreading via Taguchi DoE and subsequent ANOVA. Initially, a method to model particle size distribution given by D90, D50 and D10 via a lognormal distribution is presented. Then, the available contact models are presented and the best-suited one is selected by Tabor parameter comparison. It is proven that Hertz-Mindlin with JKR is the most suitable model. Modelled powder rheological behaviour is evaluated via cross-check between experiments and simulations using angle of repose and angle of avalanche tests. The simulations that followed examined the spreading conditions (spreading speed, vibrational frequency and amplitude of the blade and relief angle of the blade) by specific layer quality criteria (layer thickness deviation, surface coverage ratio, surface roughness and true packing density) and proved that vibration assists deposited layer evenness and homogeneity. Weighted means analysis of the surface roughness, surface coverage ratio and layer thickness deviation proved that the surficial skewness and kurtosis can serve as equivalent layer quality indicators, for layers created by spherical powder particles. It was shown that the lower the recoating speed, the better the surface quality. True packing density remained constant despite parameter level changes.

The fifth chapter of this thesis evaluated the sieving process via DEM simulations of the same powder as the one modelled in the fourth chapter. The sieving was evaluated by the duration of the linear phase, the mass flow during this phase and the mass sieved during this phase. The sieving parameters were the frequency and amplitude of the sieve's vibration, the taper angle of the sieve's apertures and the level of the powder inside the sieve prior to sieving. The level combinations that maximize powder flow, linearity duration and mass deposited during linearity were identified. Then, the effect of different aperture shapes was evaluated for these optimum level combinations. Finally, the quality of the deposited powder layer via sieving alone, in a recoater-less powder deposition process, was examined. It was proven that it is possible, by calibrating the amount of powder fed into the sieve and the sieving parameters, to achieve level quality superior to that of the vibration-less doctor blade powder spreading, but still inferior to the vibration-assisted doctor blade powder spreading.

The sixth chapter of this thesis presents a novel method for the deposition of multi-material powder layers based on the dual contour-gauge design. The method is mathematically defined and the problem is solved numerically via a C-code. The results are presented schematically for a layer of 5 border curves that define material transitions within the mosaic-patterned layer. The method's viability is proven via an experimental jig and DEM simulations. The simulations used the sieving and spreading optimized parameters that were defined in the fourth and fifth chapter of this thesis. Both experiment and simulation achieved very good approximation of the borders of the developed pattern. The DEM simulations achieved good layer evenness and homogeneity, comparable to the vibration-assisted, doctor blade powder deposition. Overall conclusions and suggestions for future work are presented in the seventh chapter.

## Μελέτη της απόθεσης πούδρας σε κατεργασίες προσθετικής κατασκευής με σύντηξη κλίνης πούδρας μέσω laser

Διδακτορική διατριβή Π. Αβράμπου  
Περίληψη

Σαράντα χρόνια μετά από την επινόηση της Προσθετικής Κατασκευής (ΠΚ), οι κατεργασίες Σύντηξης Κλίνης Πούδρας (ΣΚΠ) αποτελούν σημαντική κατηγορία των κατεργασιών ΠΚ, υποσχόμενες μεταλλικά τεμάχια υψηλής ποιότητας. Παρά την εκτενή έρευνα που έχει πραγματοποιηθεί, οι συγκεκριμένες κατεργασίες δεν έχουν ακόμα πραγματοποιήσει το άλμα από τη φάση της παραγωγής πρωτοτύπων στην πλήρη βιομηχανοποίηση, κυρίως λόγω της πολυπλοκότητάς τους. Αυτή η εργασία αποσκοπεί στο να συνεισφέρει γνώση στο κομμάτι της εναπόθεσης πούδρας, μιας και η ποιότητα του κρεβατιού σκόνης συνδέεται άμεσα με τις τελικές ιδιότητες του τεμαχίου.

Το πρώτο κεφάλαιο περιλαμβάνει μία εισαγωγή στις κατεργασίες ΠΚ, εστιάζοντας στις κατεργασίες ΣΠ.

Το δεύτερο κεφάλαιο παρέχει μία λεπτομερή ανάλυση της σύνδεσης μεταξύ των παραμέτρων εναπόθεσης πούδρας αρχικά με την ποιότητα του εναποτιθέμενου στρώματος και, εν συνεχεία, με τις μηχανικές ιδιότητες του κατασκευασμένου τεμαχίου. Γίνεται καταγραφή των παραμέτρων εναπόθεσης πούδρας και αλληλεπιδράσεων αυτών. Ορίζονται κριτήρια ποιότητας του κρεβατιού πούδρας και τρόποι προσδιορισμού/μέτρησης αυτών. Τέλος ορίζονται κριτήρια ποιότητας κατασκευασμένου τεμαχίου και γίνονται οι απαραίτητες συνδέσεις.

Το τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζει έναν στατιστικά βελτιστοποιημένο σχεδιασμό και κατασκευή ενός συστήματος εναπόθεσης πούδρας (ΣΕΠ), μέσω της μεθόδου Analytic Hierarchy Process (ΑΗΡ). Αρχικά συγκρίνονται μεταξύ τους οι διάφορες μέθοδοι εναπόθεσης πούδρας που εντοπίζονται στη βιβλιογραφία, μέσω συγκεκριμένων κριτηρίων. Στη συνέχεια, ένα πρωτότυπο ΣΕΠ σχεδιάζεται και παρουσιάζεται αναλυτικά, ενώ παράλληλα γίνεται σύγκρισή του μέσω της ίδιας μεθόδου με ένα αντίστοιχο ΣΕΠ που συναντάται σε μηχανές ΣΠ του εμπορίου. Η σύγκριση απέδειξε την ανωτερότητα του προτεινόμενου σχεδιασμού.

Το τέταρτο κεφάλαιο εστιάζει στη μοντελοποίηση μίας συγκεκριμένης πούδρας μέσω και χρήση της Μεθόδου Διακριτών Στοιχείων (ΜΔΣ) για την προσομοίωση και βελτιστοποίηση την εναπόθεσης πούδρας μέσω δονούμενης οδηγού λεπίδας (ΟΛ). Χρησιμοποιήθηκε αντιστοίχιση των παραμέτρων κατανομής μεγέθους κόκκου D90, D50 and D10 με τις παραμέτρους της λογαριθμοκανονικής κατανομής. Εν συνεχεία, τα μοντέλα επαφής αναλύθηκαν ως προς τη συμβατότητά τους με την συγκεκριμένη πούδρα μέσω υπολογισμού της παραμέτρου Tabor, και επιλέχθηκε το μοντέλο Hertz-Mindlin with JKR. Η ρεαλιστική ρεολογική συμπεριφορά του μοντέλου της πούδρας ελέγχθηκε μέσω ταυτόχρονης πειραματικού και προσομοιωτικού προσδιορισμού των γωνιών χιονοστιβάδας και πρηνούς. Οι παράμετροι εναπόθεσης που εξετάστηκαν ήταν η ταχύτητα εναπόθεσης, η συχνότητα και το πλάτος κατακόρυφης δόνησης και η γωνία ελευθερίας της ΟΛ. Τα κριτήρια ποιότητας στρώσης που ορίστηκαν ήταν η απόκλιση του πάχους στρώσης από το θεωρητικό πάχος στρώσης (Layer Thickness Deviation-LTD), ο δείκτης κάλυψης επιφάνειας (Surface Coverage Ratio-SCR), η επιφανειακή τραχύτητα υπολογισμένη μέσω ρίζας μέσου τετραγώνου (Sq-RMS) και ο πραγματικός βαθμός συμπίεσης (True Packing Density-PD) της στρώσης. Έγινε σχεδιασμός πειραμάτων μέσω ανάλυσης Taguchi και συνακόλουθης ANOVA που απέδειξαν την θετική επίδραση της δόνησης στην ποιότητα του κρεβατιού πούδρας. Έγινε ανάλυση σταθμισμένου μέσου για τα κριτήρια LTD, SCR και Sq-RMS και απεδείχθη ότι η επιφανειακή λοξότητα (Ssk) και κύρτωση (Sku) αποτελούν ισοδύναμα κριτήρια ποιότητας επιφάνειας. Όσο χαμηλότερη η ταχύτητα εναπόθεσης, τόσο καλύτερη η ποιότητα στρώσης. Ο ΠΒΣ παρέμεινε σταθερός ανεξαρτήτων της αλλαγής επιπέδου των παραμέτρων εναπόθεσης.

Το πέμπτο κεφάλαιο χρησιμοποιεί το ίδιο μοντέλο πούδρας που ορίστηκε στο 4ο κεφάλαιο για να εξετάσει μέσω προσομοιώσεων ΜΔΣ το κοσκίνισμα της πούδρας. Η εξέταση έγινε για την γραμμική περιοχή του κοσκινίσματος, δηλ. την περιοχή σταθερής ροής. Εξετάστηκαν ως παράμετροι κοσκινίσματος η συχνότητα και το πλάτος κατακόρυφης δόνησης του κόσκινου, η γωνία αντίστροφης στένωσης της οπής και η αρχική στάθμη της πούδρας. Ως κριτήρια ποιότητας εξετάστηκαν η παροχή μάζας, η μάζα κατά τη γραμμικότητα και η διάρκεια της γραμμικότητας. Μέσω ανάλυσης Taguchi και συνακόλουθης ANOVA ορίστηκαν οι συνδυασμοί παραμέτρων κοσκινίσματος που μεγιστοποιούν τα κριτήρια ποιότητας. Εξετάστηκε επίσης η επίδραση του σχήματος της οπής στα κριτήρια ποιότητας. Τέλος, εξετάστηκε η ποιότητα στρώσης που παράγεται μέσω ελεγχόμενου κοσκινίσματος. Αποδείχθηκε ότι το ελεγχόμενο κοσκίνισμα παράγει στρώματα έτοιμα για ΣΚΠ, με ποιότητα μεταξύ της ποιότητας αυτών που παράγονται από δονούμενη και μη δονούμενη ΟΛ.

Το έκτο κεφάλαιο πραγματεύεται μία καινοτόμα μέθοδο εναπόθεσης στρωμάτων πολλών υλικών με το σχέδιο του διπλού μετρητή περιγραμμάτων. Η μέθοδος ορίζεται μαθηματικά και το πρόβλημα επιλύεται αριθμητικά μέσω κώδικα σε γλώσσα C. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται σχηματικά. Η βιωσιμότητα του σχεδίου επικυρώνεται τόσο πειραματικά, όσο και μέσω προσομοίωσης ΜΔΣ.

Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα διατυπώνονται στο έβδομο κεφάλαιο.