

# ***Κατεργασίες πρόσθεσης υλικού με εξώθηση: σχεδιασμός τροχιάς και βελτιστοποίηση εναπόθεσης υλικού***

Διδακτορική Διατριβή

Γ. Παπαζέτη

*Περίληψη*

Η Προσθετική Κατασκευή (ΠΚ) αποτελεί μια οικογένεια κατεργασιών, που αποτελείται από διαφορετικές τεχνικές, με κοινό τους χαρακτηριστικό την κατασκευή του τεμαχίου σε στρώσεις. Η παρούσα διδακτορική διατριβή ασχολείται με μια από αυτές τις τεχνικές, την Προσθετική Κατασκευή με Εξώθηση Υλικού (ΠΚ-ΕΥ). Τα ανταγωνιστικά πλεονεκτήματα της κατεργασίας αφορούν στη μεγάλη ευελιξία σχεδιασμού που παρέχει η λογική κατασκευής σε στρώσεις, στη δυνατότητα ενοποίησης συναρμολογημάτων και μηχανισμών σε ένα ενιαίο κομμάτι και στους χρόνους ανάπτυξης των προϊόντων από τη φάση του σχεδιασμού μέχρι την παραγωγή τους. Για αυτούς τους λόγους, το ενδιαφέρον της βιομηχανίας έχει ενταθεί προς την κατεύθυνση της ενσωμάτωσης της ΠΚ-ΕΥ στην παραγωγή τελικών προϊόντων, η οποία περνάει μέσα από την επίλυση θεμάτων τα οποία αποτελούν ανοιχτές προκλήσεις στο δρόμο προς την εδραίωση της κατεργασίας. Σε μια προσπάθεια συμβολής στην ωρίμανση της ΠΚ-ΕΥ, η εν λόγω διδακτορική διατριβή ασχολείται με ανοιχτά θέματα της κατεργασίας από την πλευρά του σχεδιασμού της τροχιάς και της βελτιστοποίησης εναπόθεσης του υλικού.

Η κατασκευή πολύπλοκων γεωμετρικών δομών χάρη στην προαναφερθείσα ευελιξία, περνά μέσα από περιορισμούς που εντοπίζονται στη φάση του σχεδιασμού του μοντέλου στο περιβάλλον CAD ή στη φάση της μετατροπής του σε αρχείο STL (Stereolithography), ιδίως στις περιπτώσεις μοντέλων μεγάλης κλίμακας. Στο **πρώτο στάδιο της διδακτορικής διατριβής**, παρουσιάζεται η μέθοδος έμμεσης αναπαράστασης της πορώδους δομής ενός μοντέλου μεγάλης κλίμακας σε περιβάλλον CAD, καθώς και η απευθείας εξαγωγή εντολών μηχανής (G-code), χωρίς την ανάγκη ενδιάμεσης μετατροπής του μοντέλου σε αρχείο STL. Ο κώδικας υπολογισμού της τροχιάς και τοποθέτησης των πόρων, στοχεύει στην αναπαράσταση επαναλαμβανόμενου μοτίβου των πόρων, με τη μορφή μοναδιαίου κελιού (unit cell), το οποίο διατάσσεται περιοδικά σε κάθε στρώση. Ο κώδικας αναπτύσσεται στην προγραμματιστική διεπαφή (API) του εμπορικού CAD λογισμικού Solidworks™, αξιολογώντας την έμμεση αναπαράσταση του μοντέλου από την σκοπιά του χρόνου εκτέλεσης, όπως επίσης και από την επιτυχή εξαγωγή σε εντολές G-code και κατασκευής του σε ένα σύστημα ΠΚ-ΕΥ.

Το επόμενο βήμα της επιτυχούς εκτέλεσης είναι η βελτιστοποίηση της κατεργασίας με σκοπό την παραγωγή των τεμαχίων εντός συγκεκριμένων προδιαγραφών. Ο μεγάλος αριθμός των παραμέτρων της κατεργασίας ΠΚ-ΕΥ σε συνδυασμό με το μεγάλο εύρος επιτρεπόμενων ρυθμίσεων, καθιστούν πιθανή την διαμόρφωση ακατάλληλων συνθηκών εκτύπωσης που οδηγούν σε μη-λειτουργικά κομμάτια λόγω σφαλμάτων κατασκευής. Υπό αυτό το πρίσμα, στο **δεύτερο μέρος της διδακτορικής διατριβής**, αναπτύχθηκε μεθοδολογία οριοθέτησης της περιοχής βέλτιστης λειτουργίας σε ένα σύστημα ΠΚ-ΕΥ. Η μέθοδος σχεδιασμού πειραμάτων Taguchi χρησιμοποιήθηκε ώστε να ταυτοποιηθεί η συσχέτιση τεσσάρων βασικών παραμέτρων με την πιστότητα μορφής, δηλαδή το βαθμό ύπαρξης συγκεκριμένων σφαλμάτων κατασκευής. Η έκταση των σφαλμάτων αξιολογήθηκε μέσω συστήματος αντίστροφης μηχανικής (τρισδιάστατη σάρωση), για την καθολική αποτύπωση της γεωμετρίας. Οι στατιστικές σημαντικές σχέσεις και αλληλεπιδράσεις μεταξύ των παραμέτρων και της πιστότητας μορφής αξιολογήθηκαν μέσω ανάλυσης διακύμανσης (ANOVA). Οι πειραματικές παρατηρήσεις

χρησιμοποιήθηκαν για την εκπαίδευση ενός νευρωνικού δικτύου, το οποίο εντοπίζει τις σχέσεις παραμέτρων και τελικού κριτηρίου, ενώ είναι σε θέση να προβλέπει την απόκριση για νέες και μη δοκιμασμένες παραμετρικές ρυθμίσεις. Οι προβλέψεις του νευρωνικού δικτύου χρησιμοποιήθηκαν για την χαρτογράφηση της βέλτιστης λειτουργίας του συστήματος ΠΚ-ΕΥ, ενώ λειτούργησαν και ως εργαλείο βελτιστοποίησης των παραμετρικών ρυθμίσεων εκείνων που επιτυγχάνουν τόσο τη μέγιστη παραγωγικότητα της κατεργασίας, όσο και την ελάχιστη επιτρεπόμενη ογκομετρική παροχή υλικού.

Στο **τρίτο μέρος της διδακτορικής διατριβής** αξιοποιήθηκαν η προαναφερθείσα περιοχή βέλτιστης λειτουργίας, εντός της οποίας αξιολογήθηκε η διαστασιακή ακρίβεια ενός δοκιμίου με πολλαπλά γεωμετρικά χαρακτηριστικά, μέσω της μεθόδου σχεδιασμού πειραμάτων Response Surface Methodology (RSM). Οι βέλτιστες ρυθμίσεις εκτύπωσης ποικίλουν ανάλογα τη διεύθυνση κατασκευής αλλά και του υπό εκτύπωση γεωμετρικού χαρακτηριστικού. Η εδραιωμένη λύση σε αυτή την περίπτωση είναι η χρήση αλγορίθμων πολύ-παραγοντικής βελτιστοποίησης, οι οποίοι υποδεικνύουν τον καλύτερο δυνατό συμβιβασμό μεταξύ πολλαπλών κριτηρίων. Στη συγκεκριμένη μελέτη προτείνεται μια καινοτόμος πρακτική, που αφορά στην υιοθέτηση προσαρμοστικών ρυθμίσεων εκτύπωσης στην ίδια στρώσης αλλά και κατά την εκτέλεση ενιαίας τροχιάς, με επιτόπου αλλαγή της ταχύτητας εκτύπωσης ή/και του ρυθμού εξώθησης υλικού. Η υλοποίησης της εν λόγω προσέγγισης γίνεται μέσω μετά-επεξεργασίας του αρχείου G-code με την ανάπτυξη προγραμματιστικής ρουτίνας επεξεργασίας κειμένου. Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου κρίνεται επιτυχής, καθώς κατάφερε να αυξήσει τη διαστασιακή ακρίβεια του δοκιμίου σε σύγκριση με την εκτύπωση που πραγματοποιήθηκε υπό συνθήκες ολικού βέλτιστου, προερχόμενες από την πολύ-παραγοντική βελτιστοποίηση.

Η επίδραση των προσαρμοστικών ρυθμίσεων στην ποιότητα απόθεσης υλικού, καθώς και η ανάγκη εποπτείας του συγχρονισμού μεταξύ της οριζόντιας κίνησης της κεφαλής του συστήματος ΠΚ-ΕΥ και του προφίλ εξώθησης υλικού, αποτελούν τα βασικά κίνητρα της μελέτης που παρουσιάζεται στο **τέταρτο μέρος της διδακτορικής διατριβής**. Ένα δοκίμιο εφοδιασμένο με απλές παράλληλες λωρίδες υλικού σχεδιάζεται ώστε να αξιολογηθεί η ομοιομορφία του πλάτους της λωρίδας με εργαλεία ανάλυσης εικόνας. Παράλληλα, το προφίλ εξώθησης υλικού βιντεοσκοπείται και αναλύεται καρέ-καρέ ώστε να αποκαλυφθούν φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα σε πολύ μικρά χρονικά διαστήματα, ιδίως στις φάσεις επιτάχυνσης και επιβράδυνσης της κεφαλής. Μέσω ενός κλασματικού παραγοντικού πειράματος αξιολογούνται η μη-διακοπτόμενη απόθεση υλικού, καθώς και η ομοιομορφία πλάτους της αποτιθέμενης λωρίδας, βασιζόμενα σε παραμέτρους που αφορούν στη θερμοκρασία, την ταχύτητα της κεφαλής, αλλά και σε δυναμικές αλλαγές του ρυθμού εξώθησης υλικού. Τέλος, η ανάπτυξη μοντέλων παλινδρόμησης χρησιμοποιείται σαν χάρτης βελτιστοποίησης της ποιότητας απόθεσης σε υψηλότερες ταχύτητες εκτύπωσης.