



ΕΘΝΙΚΟ
ΜΕΤΣΟΒΙΟ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Α.Π. : 50030
Αθήνα, 10-10-25

ΚΟΣΜΗΤΟΡΑΣ

Προς
τα Μέλη ΔΕΠ της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ

Π Ρ Ο Σ Κ Λ Η Σ Η

Παρακαλείστε να παρευρεθείτε στην παρουσίαση της Διδακτορικής Διατριβής που εκπόνησε στον Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, ο Υποψήφιος Διδάκτορας **κ. Χριστοδούλου Ιωάννη του Θεοδώρου**, Διπλωματούχος Μηχανολόγος Μηχανικός ΕΜΠ.

Η παρουσίαση θα πραγματοποιηθεί την **Πέμπτη 30 Οκτωβρίου 2025 και ώρα 12:00 μ.μ.** διαδικτυακά μέσω Microsoft Teams.

Ο σύνδεσμος είναι:

<https://teams.live.com/join/9320880975034?p=CDqaoeslXMMHqD6lsM>

Το θέμα της Διδακτορικής Διατριβής είναι:

Ελληνικός τίτλος: «Μελέτη και Μοντελοποίηση της Χρήσης Άμορφων Υλικών σε Εφαρμογές Τρισδιάστατης Εκτύπωσης Αυξημένου Ρυθμού Εναπόθεσης Υλικού»

Αγγλικός τίτλος: «Study and Modelling the 3-D Printing of Amorphous Materials using High Deposition Rate»

Ο Κοσμήτορας της Σχολής

Ι. Αντωνιάδης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

PhD Dissertation Abstract

Περίληψη Διδακτορικής Διατριβής

English Version

Study and modelling the 3-D printing of amorphous materials using high deposition rate

PhD Dissertation Abstract - Ioannis Christodoulou

Material Extrusion (MEX) additive manufacturing, has revolutionized industrial production by enabling direct fabrication of complex geometries while reducing material waste by up to 90% in polymer-based applications. Despite capturing 40% of the global additive manufacturing market, MEX technology remains constrained by the fundamental tradeoff between printing speed and part quality. Conventional printing speeds (30-60 mm/s) render the process unsuitable for mass production, while attempts to increase speed typically result in reduced dimensional accuracy, weakened interlayer adhesion, surface defects, and system vibrations.

This doctoral dissertation addresses these challenges through a comprehensive investigation into the use of amorphous materials in high-speed MEX applications, with particular emphasis on increasing material deposition rates. The research focuses on understanding and optimizing the behavior of amorphous thermoplastics such as ABS and PC under extreme processing conditions, materials that present unique challenges due to their continuous glass transition and absence of discrete melting points.

The study develops a modified Cross-Williams-Landel-Ferry (Cross-WLF) viscosity model incorporating a hyperbolic tangent melt fraction function, successfully resolving numerical instabilities near glass transition temperatures that have plagued conventional approaches. The model demonstrates remarkable accuracy with mean percentage errors ranging from 23.40% at 200°C to 27.83% at 250°C, validated through custom-built force measurement systems across feed rates from 0.5 to 12 mm/s. Comparative analysis between conventional and innovative tri-channel nozzles reveals transformative performance improvements, achieving 66.5% reduction in operating pressure and maintaining temperature fluctuations within $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ at feed rates up to 15 mm/s.

A modified MEX printer capable of sustained high-speed operation (>350 mm/s) was designed and constructed, incorporating novel hardware configurations and control systems. The research develops an integrated methodology for optimizing dynamic behavior through resonance analysis, frequency-based motion profiling, enabling vibration compensation that maintains print quality at previously unattainable speeds. The iso-time optimization approach preserves print duration while reducing motion-induced vibrations.

Mechanical properties studies establish critical processing-property relationships, demonstrating that optimized high-speed processing can maintain industrially relevant quality standards. The research identifies optimal processing windows for various amorphous materials, with tensile strength retention exceeding 90% at speeds up to 350 mm/s when appropriate thermal management strategies are employed.

The dissertation's contributions extend beyond specific technical achievements to establish a comprehensive framework for high-speed additive manufacturing. The methodologies developed are sufficiently general to enable future applications including bulk metallic glasses and continuous fiber composites. This work demonstrates that the traditional speed-quality tradeoff is not a fundamental limitation but rather a consequence of incomplete understanding of the underlying physics, providing both theoretical foundations and practical tools for transforming MEX from a prototyping technique to a production-capable technology.

Ελληνική Έκδοση

Μελέτη και Μοντελοποίηση της Χρήσης Άμορφων Υλικών σε Εφαρμογές Τρισδιάστατης Εκτύπωσης Αυξημένου Ρυθμού Εναπόθεσης Υλικού

Περίληψη Διδακτορικής Διατριβής - Ιωάννης Χριστοδούλου

Η προσθετική κατασκευή μέσω εξώθησης υλικού (Material Extrusion - MEX), έχει φέρει επανάσταση στη βιομηχανική παραγωγή επιτρέποντας την άμεση κατασκευή πολύπλοκων γεωμετριών με μείωση της σπατάλης υλικού έως και 90% σε εφαρμογές πολυμερών. Παρά την κατάκτηση του 40% της παγκόσμιας αγοράς προσθετικής κατασκευής, η τεχνολογία MEX παραμένει περιορισμένη από τη θεμελιώδη διαφορά μεταξύ ταχύτητας εκτύπωσης και ποιότητας τεμαχίου. Οι συμβατικές ταχύτητες εκτύπωσης (30-60 mm/s) καθιστούν τη διεργασία ακατάλληλη για μαζική παραγωγή, ενώ οι προσπάθειες αύξησης της ταχύτητας οδηγούν συνήθως σε μειωμένη διαστασική ακρίβεια, εξασθένηση της διαστρωματικής αντοχής, επιφανειακά ελαττώματα και δονήσεις του συστήματος.

Η παρούσα διδακτορική διατριβή αντιμετωπίζει αυτές τις προκλήσεις μέσω μιας ολοκληρωμένης έρευνας στη χρήση άμορφων υλικών σε εφαρμογές MEX υψηλής ταχύτητας, με ιδιαίτερη έμφαση στην αύξηση των ρυθμών εναπόθεσης υλικού. Η έρευνα επικεντρώνεται στην κατανόηση και βελτιστοποίηση της συμπεριφοράς άμορφων θερμοπλαστικών όπως το ABS και το PC υπό ακραίες συνθήκες κατεργασίας, υλικά που παρουσιάζουν μοναδικές προκλήσεις λόγω της υαλώδους μετάπτωσης και της απουσίας διακριτού σημείου τήξης.

Η μελέτη αναπτύσσει ένα τροποποιημένο μοντέλο ιξώδους Cross-Williams-Landel-Ferry (Cross-WLF) που ενσωματώνει υπερβολική εφαπτομενική συνάρτηση κλάσματος τήξης, επιλύοντας επιτυχώς αριθμητικές αστάθειες κοντά στις θερμοκρασίες υαλώδους μετάπτωσης που ταλαιπωρούσαν τις συμβατικές προσεγγίσεις. Το μοντέλο επιδεικνύει αξιοσημείωτη ακρίβεια με μέσα ποσοστιαία σφάλματα από 23,40% στους 200°C έως 27,83% στους 250°C, επικυρωμένο μέσω ειδικά κατασκευασμένων συστημάτων μέτρησης δύναμης σε ρυθμούς τροφοδοσίας από 0,5 έως 12 mm/s. Η συγκριτική ανάλυση μεταξύ συμβατικών και καινοτόμων ακροφυσίων τριών καναλιών αποκαλύπτει εντυπωσιακές βελτιώσεις απόδοσης, επιτυγχάνοντας μείωση 66,5% στην πίεση λειτουργίας και διατηρώντας τις θερμοκρασιακές διακυμάνσεις εντός $\pm 1,5^\circ\text{C}$ σε ρυθμούς τροφοδοσίας έως 15 mm/s.

Σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε τροποποιημένος εκτυπωτής MEX ικανός για συνεχή λειτουργία σε υψηλές ταχύτητες (>350 mm/s), ενσωματώνοντας καινοτόμες διαμορφώσεις υλικού και συστήματα ελέγχου. Η έρευνα αναπτύσσει ολοκληρωμένη μεθοδολογία βελτιστοποίησης της δυναμικής συμπεριφοράς μέσω ανάλυσης συντονισμού, προφίλ κίνησης βάσει συχνότητας επιτρέποντας αντιστάθμιση δονήσεων που διατηρεί την ποιότητα εκτύπωσης σε χρόνους που ήταν προηγουμένως ανέφικτοι. Η προσέγγιση βελτιστοποίησης ίσου χρόνου διατηρεί τη διάρκεια εκτύπωσης ενώ μειώνει τις δονήσεις που προκαλούνται από την κίνηση.

Οι μελέτες μηχανικών ιδιοτήτων δημιουργούν κρίσιμες σχέσεις κατεργασίας-ιδιοτήτων, αποδεικνύοντας ότι η βελτιστοποιημένη κατεργασία υψηλής ταχύτητας μπορεί να διατηρήσει βιομηχανικά πρότυπα ποιότητας. Η έρευνα προσδιορίζει βέλτιστα παράθυρα κατεργασίας για διάφορα άμορφα υλικά, με διατήρηση αντοχής εφεκυσμού που υπερβαίνει το 90% σε ταχύτητες όταν εφαρμόζονται κατάλληλες στρατηγικές.

Οι συνεισφορές της διατριβής εκτείνονται πέρα από συγκεκριμένα τεχνικά επιτεύγματα για να καθιερώσουν ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο για προσθετική κατασκευή υψηλής ταχύτητας. Οι μεθοδολογίες που αναπτύχθηκαν είναι αρκετά γενικές ώστε να επιτρέπουν μελλοντικές εφαρμογές συμπεριλαμβανομένων μεταλλικών γυαλιών μάζας και σύνθετων υλικών συνεχών ινών. Η εργασία αυτή αποδεικνύει ότι η παραδοσιακή αντίθεση ταχύτητας-ποιότητας δεν αποτελεί θεμελιώδη

περιορισμό αλλά μάλλον συνέπεια ελλιπούς κατανόησης των φαινομένων, παρέχοντας τόσο θεωρητικά θεμέλια όσο και πρακτικά εργαλεία για τη μετατροπή της MEX από τεχνική πρωτοτυποποίησης σε τεχνολογία ικανή για παραγωγή.