

Interreg



Με τη συγχρηματοδότηση
της ΕΥΡΩΠΑΪΚΗΣ ΕΝΩΣΗΣ

Ελλάδα – Κύπρος

MOSAIC



ΠΑΡΑΔΟΤΕΟ 3.2:

Στάθμη γνώσεων σε θέματα μικροκατεργασιών με επισυναπτόμενη βιβλιογραφία.

+30 2310 469 626

www.interreg.gr

www.greece-cyprus.eu

@Interreg_GRCY

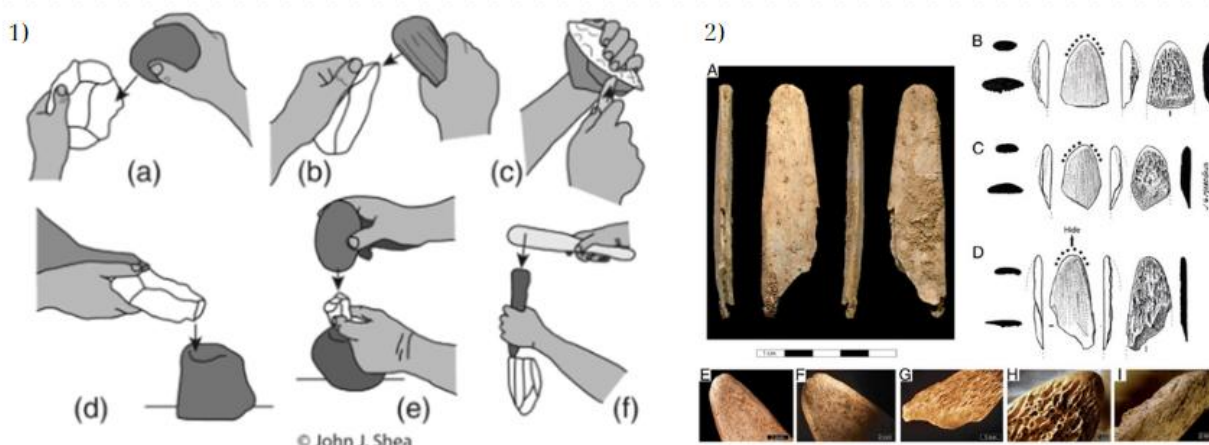
@interreg_grcy

ΠΕ.3**Στάθμη γνώσεων σε θέματα μικροκατεργασιών με επισυναπτόμενη βιβλιογραφία.****Π3.2**

Χαρακτηριστικά, δυνατότητες και επιδόσεις των λογισμικών CAD/CAM, που χρησιμοποιούνται για τον σχεδιασμό και την καθοδήγηση της κατεργασίας μετάλλου, εστιάζοντας στη συμβατότητα τους με τις ανάγκες του έργου Mosaic.

3.2.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

Από τα αρχαία χρόνια υπήρχε η ανάγκη του ανθρώπου για επιβίωση, έτσι αναπτύχθηκαν μέθοδοι για την κατασκευή αντικειμένων, όπως εργαλεία, όπλα και άλλα, από διαθέσιμους πόρους, όπως η πέτρα ή το μέταλλο. Με αυτό τον τρόπο αναπτύχθηκαν διάφορες μέθοδοι κατεργασίας υλικών, συγκεκριμένα για την επεξεργασία μετάλλων ξεκίνησε μία σύνθετη τεχνολογία, συνεχίζοντας μέχρι και σήμερα να εξελίσσεται αποτελώντας μεγάλο τμήμα για την ανάπτυξη των σύγχρονων βιομηχανιών. Ο τρόπος επεξεργασίας των μετάλλων καθόρισε και την ονομασία της κατεργασίας: ως αποβολή υλικού, στην οποία εμπεριέχονται όλες οι κατεργασίες μορφοποίησης μέσω αποβολής υλικού. Σε αυτές αφαιρείται υλικό υπό μορφή αποβλήτου του, με στόχο την επίτευξη της επιθυμητής γεωμετρίας του τεμαχίου. Η απομάκρυνση του υλικού επιτυγχάνεται με τη χρήση κοπτικού εργαλείου, το οποίο προκαλεί πλαστική παραμόρφωση στο κατεργαζόμενο υλικό.



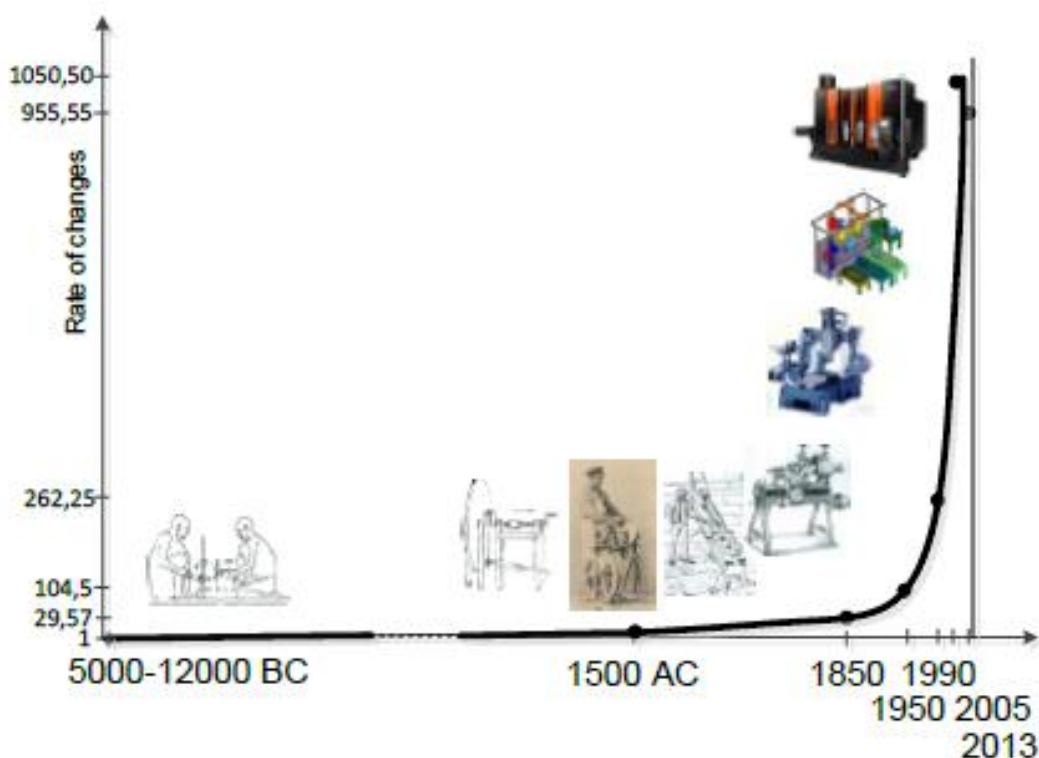
Σχήμα 3.1: 1) Προϊστορική κατεργασία πέτρας για εργαλείο [9] και 2) προϊστορική μορφή εργαλείων από κόκαλα [10]

Παρά το γεγονός πως οι κατεργασίες αποβολής υλικού συνδέονται με τη βιομηχανική επανάσταση, φαίνεται πως οι ρίζες τους είναι από την αρχαιότητα όπως φαίνεται στο σχήμα 3.1. Έως και την τότε περίοδο οι εργαλειομηχανές ήταν χειροκίνητες και η χρήση του για την κατεργασία μετάλλων δεν ήταν συχνή. Όσο εξελισσόταν η βιομηχανική παραγωγή στην κατασκευή μηχανών και κατασκευών από σίδηρο και χάλυβα, οι απαιτήσεις σε μεταλλικά εξαρτήματα αυξανόταν και η χειροκίνητη κατασκευή προϊόντων ξεκίνησε να γίνεται απαγορευτική, εξαιτίας του μεγάλου κόστους αλλά και της διαστασιολογικής ακρίβειας τους. Έτσι, τον 18ο αιώνα, η ανάγκη για μαζική και πιο ακριβές παραγωγή σιδερένιων και χαλύβδινων εξαρτημάτων οδήγησε στην ανάπτυξη μηχανοκίνητων εργαλειομηχανών όπως αυτές του σχήματος 3.2. Παράλληλα, ξεκίνησε η συστηματική μελέτη των φαινομένων που παρουσιάζονταν στις κοπές των υλικών, γεγονός που συνέβαλε στη βελτίωση της ποιότητας και της απόδοσης των εργαλειομηχανών.



Σχήμα 3.2: 1) Χειροκίνητη εργαλειομηχανή τόννευσης [11] και 2) χειροκίνητη εργαλειομηχανή φραιζαρίσματος

Η εισαγωγή ηλεκτροκινήτων σε αυτές και η πρόοδος στην τεχνολογία των υλικών και εργαλείων, αύξησε τη παραγωγικότητα και τη διάρκεια ζωής των εργαλείων. Η σύγχρονη εποχή έφερε τις εργαλειομηχανές CNC (Computer Numerical Control) με μικροεπεξεργαστές και αυτοματισμούς, οι οποίες επιτρέπουν κατεργασίες σε υψηλές ταχύτητες και με υψηλή ακρίβεια. Τα τελευταία έτη, η μικροκατεργασία εξαρτημάτων και μηχανισμών, εξαιρετικά μικρών διαστάσεων με υψηλό βαθμό διαστασιολογικής ακρίβειας και ποιότητας επιφάνειας έχει αναδειχθεί σε μείζονα τεχνολογική πρόκληση για τον τομέα της προηγμένης μεταποίησης. Στο σχήμα 3.3 φαίνεται η εξέλιξη της τεχνολογίας κατεργασιών μέχρι και το 2013.



Σχήμα 3.3: Χρονοδιάγραμμα εξέλιξης κατεργασιών [13]

3.2.2 ΜΙΚΡΟΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ

Ο τεχνικός όρος μικροκατεργασιών αναφέρεται σε διεργασίες παραγωγής προϊόντων, κατά τις οποίες αφαιρούνται πολύ μικρά τμήματα υλικού προκειμένου να επιτευχθεί επιφανειακή ποιότητα, υψηλή διαστασιολογική και γεωμετρική ακρίβεια της τάξεως του μικρομέτρου ($\mu\text{m}=10^{-6}\text{m}$) ή και δέκατων του μικρομέτρου ($\text{nm}=10^{-9}\text{m}$). Με το τρόπο αυτό παράγονται πολύ μικρά και σύνθετα εξαρτήματα, όπως η οπή του σχήματος 3.4, τα οποία βρίσκουν εφαρμογές σε διάφορους τομείς όπως: την ιατρική, την αεροναυπηγική, την αυτοκινητοβιομηχανία, την μικροηλεκτρονική και την ωρολογοποιία.



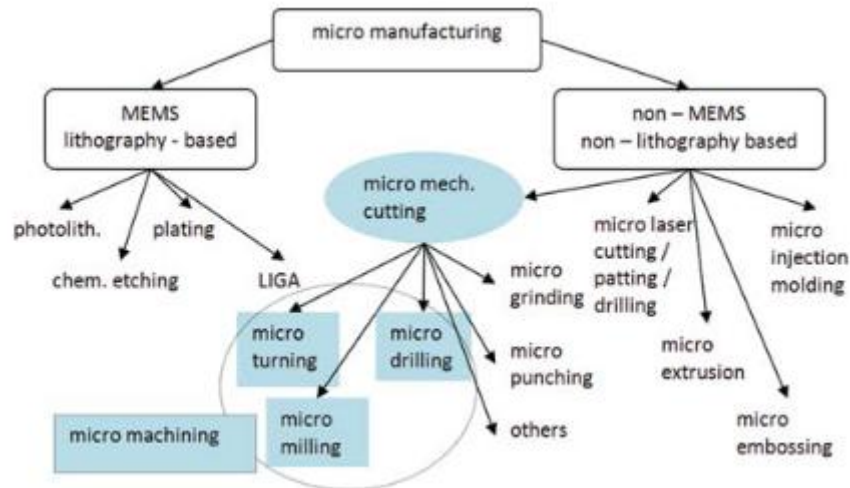
Σχήμα 3.4: Μικροκατεργασία μικροοπτικό φακό ακρίβειας 50μm [8]

3.2.3 ΧΡΟΝΟΛΟΓΙΟ ΜΙΚΡΟΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

Η ανάγκη των μικροκατεργασιών εμφανίζονται προ του 1900 μέσω της κατασκευής παραδοσιακών μικροτεχνικών ωρολογοποιίας και χειροτεχνίας. Στη δεκαετία του 1950 στα Bell Laboratories κατασκευάστηκαν τα πρώτα μικροσυστήματα. Έπειτα, η επιστημονική θεμελίωση των μικροκατεργασιών ανάγεται στην εμβληματική ομιλία του Richard Feynman (1960), η οποία εισήγαγε τη δυνατότητα χειρισμού της ύλης σε ατομικό επίπεδο. Κατά τις δεκαετίες του 1980 και 1990, η ανάπτυξη τεχνικών μικρομηχανικής, όπως η βαθιά χάραξη πυριτίου (DRIE), η μικροηλεκτρομηχανική (MEMS) και οι μικροκατεργασίες με φυσικές ή θερμικές μεθόδους (π.χ. laser, EDM) αποτέλεσαν τον πυρήνα της πρώιμης τεχνολογικής προόδου στον τομέα.

Η σταδιακή ωρίμανση της τεχνολογίας επέτρεψε, από τις αρχές του 21ου αιώνα, τη διεύρυνση της εφαρμογής μικροκατεργασιών σε βιομηχανικές κλίμακες. Παράλληλα, ενισχύθηκαν οι δυνατότητες των εργαλειομηχανών CNC ώστε να υποστηρίζουν διαδικασίες μικροκοπής με υψηλή ακρίβεια και επαναληψιμότητα. Οι πρώτες εφαρμογές των μηχανών αυτών για μικρο-διάτρηση και μικρο-φραιζάρισμα εμφανίστηκαν τη δεκαετία του 1990, ενώ η επόμενη δεκαετία χαρακτηρίστηκε από την ανάπτυξη ειδικών μικρο-CNC μηχανών με υπερύψηλες στροφές, αυξημένη δυναμική σταθερότητα και ενσωματωμένα αισθητήρια συστήματα.

Η σύγχρονη εποχή χαρακτηρίζεται από την πλήρη ενσωμάτωση τεχνολογιών CAD/CAM, αλγορίθμων τεχνητής νοημοσύνης και αισθητήρων παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο, με σκοπό τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων κατεργασίας και την αξιοπιστία της μικροπαραγωγής. Έτσι, οι μικροκατεργασίες εξελίχθηκαν από μια πειραματική τεχνολογία σε έναν πλήρως ανεπτυγμένο βιομηχανικό κλάδο με ευρεία εφαρμογή στην αεροδιαστημική, ιατρο-τεχνολογία και μικροηλεκτρονική. Στο σχήμα 3.5 φαίνεται αυτή η κατηγοριοποίηση των τεχνικών μικροκατασκευής.



Σχήμα 3.5: Κατηγοριοποίηση τεχνικών μικροκατασκευής [14]

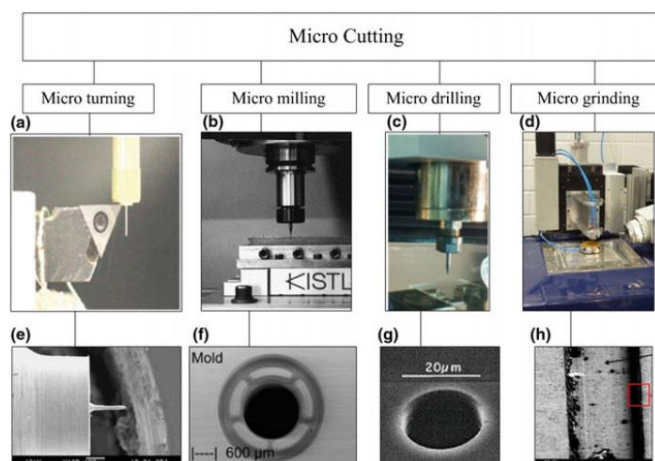
3.2.4 ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΜΙΚΡΟΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

Οι ιδιαιτερότητες των διαστάσεων που επιτυγχάνονται απαιτούν εξειδικευμένες τεχνικές επεξεργασίας, οι οποίες διακρίνονται σε κατηγορίες ανάλογα με το είδος της ενέργειας που χρησιμοποιείται, το υλικό του τεμαχίου και τη φύση της κατεργασίας (αφαιρετική ή προσθετική).

➤ Μηχανικές μικροκατεργασίες

Οι μηχανικές μικροκατεργασίες (σχήμα 3.6) βασίζονται σε μετατροπή της κινητικής ενέργειας του εργαλείου σε θερμότητα και παραμόρφωση. Περιλαμβάνουν τεχνικές όπως:

- ο Μικρο-φραιζάρισμα (micro-milling) και μικρο-τόρνευση (micro-turning): μικρογραφίες, κατεργασία με εργαλεία διαμέτρου <200 μm . Ιδανικές για μέταλλα και κεραμικά.
- ο Μικρο-λείανση (micro-grinding): κατάλληλο για υλικά υψηλής σκληρότητας με πολύ καλή ποιότητα επιφάνειας.



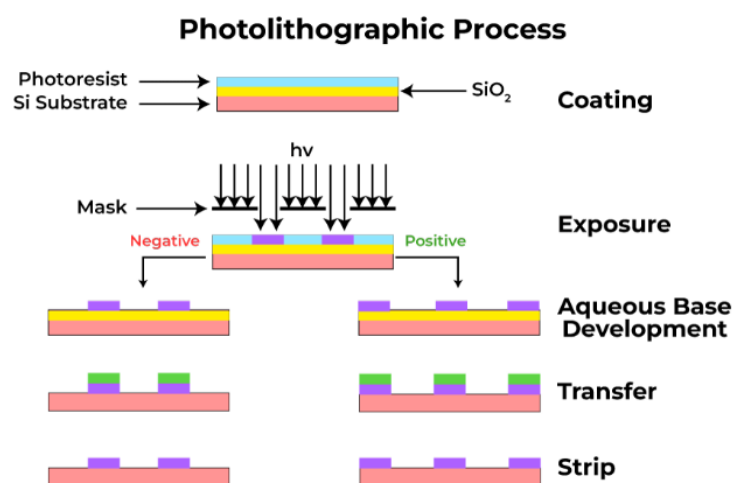
Σχήμα 3.6: Τύποι μηχανικών μικροκατεργασιών και τα αποτελέσματά τους σε μεγέθυνση: α) μικρο-τόρνευση, β) μικρο-φραιζάρισμα, γ) μικρο-τρύπημα, δ) μικρο-λείανση, ε) μικρο-ράβδος 22 μm διαμέτρου από τόρνευση, ς) μικρο-καλούπι κατασκευασμένο από τη

φραίζα, g) άνοιγμα τρύπας ακρίβειας 20μm από μικρο-τρύπημα h) μικρο-σχισμή κατασκευασμένη με λείανση [15]

➤ Φωτολιθογραφία (σχήμα 3.7) και κατεργασίες εγχάραξης

Η φωτολιθογραφία και οι τεχνικές εγχάραξης αποτελούν βασικούς πυλώνες για την κατασκευή νανοδομών και μικροδομών κυρίως σε επίπεδα υποστρώματα:

- Φωτολιθογραφία (photolithography): η χρήση υπεριώδους φωτός για την εγγραφή μοτίβων σε φωτοευαίσθητα πολυμερή.
- Λιθογραφία μέσω δέσμης ηλεκτρονίων [Electron Beam Lithography (EBL)]: κατάλληλη για υψηλής ακρίβειας μικρο- και νανοδομές.
- Επιλεκτική ιοντοχημική χάραξη [Reactive Ion Etching (RIE)]: ξηρή εγχάραξη για την απομάκρυνση υλικού με χρήση πλάσματος.



Σχήμα 3.7: Στάδια φωτολιθογραφίας [16]

➤ Ενεργειακά Υποβοηθούμενες Κατεργασίες

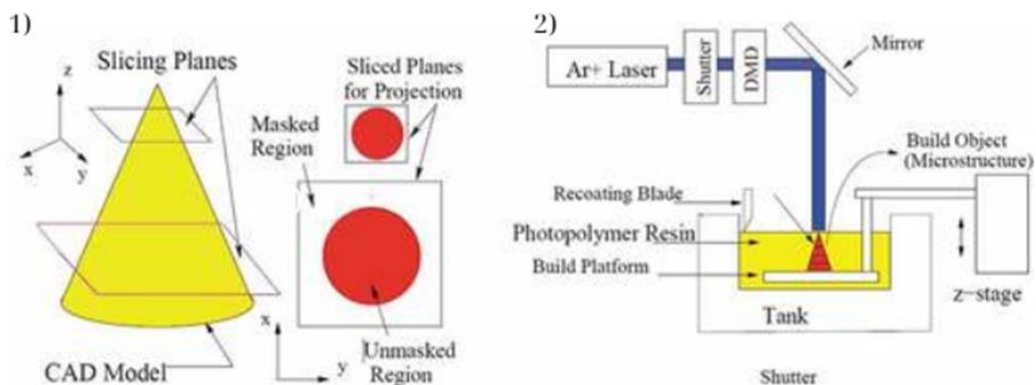
Αυτές οι μέθοδοι χρησιμοποιούν μηχανισμούς αφαίρεσης υλικού με τη βοήθεια εναλλακτικών μορφών ενέργειας, όπως θερμότητα, ηλεκτρικό πεδίο ή δέσμες λέιζερ:

- Μικροκατεργασία με λέιζερ (Laser Micromachining): προσφέρει ακριβή απομάκρυνση υλικού με ελάχιστη θερμική επίδραση, ιδανική για λεπτές σχισμές, μικροκοπές και νανοδομές, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.8.
- Ηλεκτροδιαβρωτική Κατεργασία, Micro-EDM (Electrical Discharge Machining): χρησιμοποιεί ηλεκτρικούς σπινθήρες μεταξύ εργαλείου και τεμαχίου για απομάκρυνση υλικού, ιδανική για σκληρά υλικά (π.χ. καρβίδια, εργαλεία, καλούπια) και για την κατεργασία αγωγίμων υλικών με υψηλή ακρίβεια.
- Κατεργασία με δέσμη ηλεκτρονίων [Electron Beam Machining (EBM)]: χρήση εστιασμένης δέσμης ηλεκτρονίων σε περιβάλλον κενού, πολύπλοκο και ακριβό σύστημα.
- Μικροκατεργασία με υπερήχους (Ultrasonic Micromachining): χρησιμοποιεί ταλαντώσεις υψηλής συχνότητας για την κατεργασία σκληρών ή εύθραυστων υλικών, προσφέρει χαμηλό θερμικό φορτίο, αλλά σε περιορισμένο ρυθμό αφαίρεσης.



Σχήμα 3.8: Κατασκευή εργαλείου σπειροτόμησης με Lasertec 20 PrecisionTool [17]

- Μικροσχηματοποίηση με πλαστική παραμόρφωση
 Η μικροδιαμόρφωση (microforming) περιλαμβάνει τεχνικές πλαστικής παραμόρφωσης μετάλλων υπό κλίμακα μικρομέτρων, όπως:
 - Μικροέλαση (Micro-extrusion) και μικρο-σφυρηλάτηση (micro-forging): για παραγωγή μικρών μεταλλικών εξαρτημάτων με υψηλή αντοχή.
 - Μικρο-σφράγιση (Micro-stamping): χρήση μικροσκοπικών καλουπιών για τη μαζική παραγωγή σε χαμηλό κόστος.
- Προσθετικές Μέθοδοι (Additive Microfabrication)
 Η προσθετική κατεργασία αναφέρεται σε τεχνολογίες κατά τις οποίες το τελικό προϊόν κατασκευάζεται στρώση-στρώση, με προσθήκη υλικού εκεί όπου απαιτείται. Η χρήση τεχνικών όπως:
 - Πολυμερισμός με δύο φωτόνια [Two-Photon Polymerization (2PP)]: για τρισδιάστατες μικροκατασκευές υψηλής ανάλυσης σε βιοϊατρικές εφαρμογές.
 - Μικρο-στερεολιθογραφία [Micro-Stereolithography (μ-SLA)]: λεπτομερής κατασκευή πολυμερών μικροεξαρτημάτων, ανάλυση έως $\approx 1-5\mu\text{m}$ (σχήμα 3.9).
 - Μικρο-εκτύπωση μέσω inkjet [Inkjet-based Micro-Printing (μ-PBF)]: Για εύκαμπτα ηλεκτρονικά και αισθητήρες.



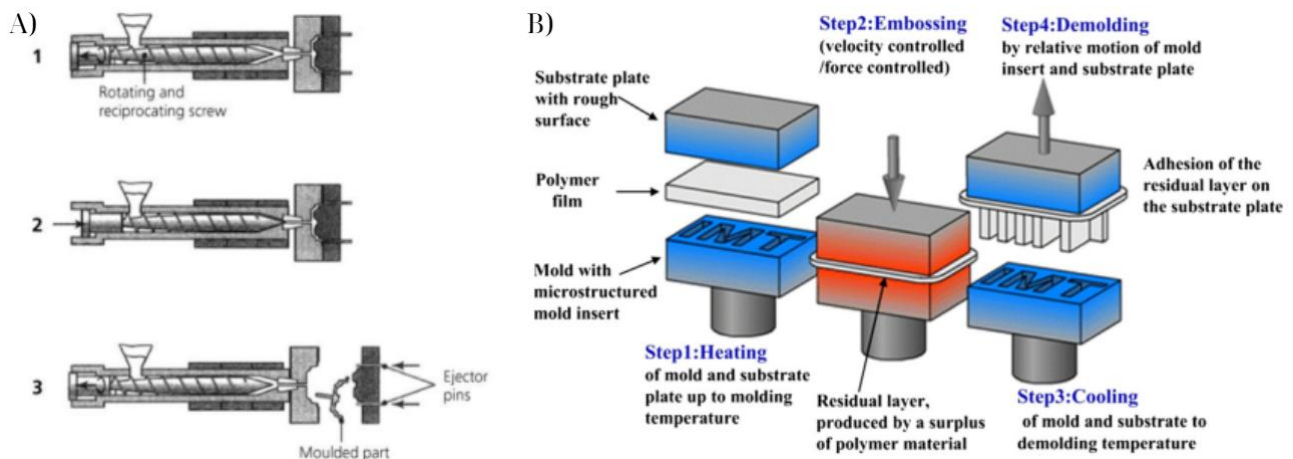
Σχήμα 3.9: 1) Στρατηγική τεμαχισμού CAD μοντέλου για τη προβολή μικρο-στερεολιθογραφίας, 2) Σχηματική απεικόνιση διαδικασιών κατασκευής μικρο-στερεολιθογραφίας [18]

➤ Μέθοδος θερμικής μικροκατεργασίας

Η μικρο-χύτευση (micro-casting ή micro-molding) κατατάσσεται στην κατηγορία των φυσικοχημικών μεθόδων ή, και ως ξεχωριστή μέθοδο θερμικής μικροκατεργασίας, λόγω της εμπλοκής θερμικών διεργασιών τήξης και πήξης υλικού.

- Μικρο-χύτευση με έγχυση (Micro-injection molding): Έγχυση λιωμένου πολυμερούς μέσω μικροκαναλιών σε μήτρα με πολύπλοκες μικροδομές. Η ροή του υλικού απαιτεί υψηλές πιέσεις (~3000 bar), ταχύτητες και βραχείες κυκλικότητες· η ποιότητα εξαρτάται από ακρίβεια διαδικασίας και αποδυνάμωση διατομών μόνο μικρών (σχήμα 3.10 α).
- Μικρο-θερμή χάραξη (Micro hot embossing): τοποθέτηση θερμού πολυμερούς πάνω σε μήτρα και πίεση στερεοποίησης υπό ελεγχόμενες συνθήκες θέρμανσης/ψύξης. Επιτρέπει τη δημιουργία λεπτών και υψηλών μικροδομών χωρίς την ανάγκη πλήρους ροής (σχήμα 3.10 β).
- Μικρο-χύτευση μετάλλου \ Θερμή μικρο-ανάγλυφη αποτύπωση μετάλλου (Micro metal casting / micro hot embossing): τοποθέτηση λιωμένου μετάλλου (π.χ. κράματα Au-Sn) σε μικρο-μήτρα πυριτίου με θερμή ανάγλυφη εκτύπωση, στη συνέχεια ψύξη και αφαίρεση. Χρησιμοποιείται σε περιθλαστικά φράγματα ακτίνων Χ και μικροοπτικά στοιχεία.

Συνοψίζοντας, οι τεχνικές μικροδιαμόρφωσης είναι ειδικές, μηχανικές μέθοδοι εντός του ευρύτερου πλαισίου της μικρομηχανουργικής, με έμφαση στη διαμόρφωση γεωμετριών μέσω πλαστικής παραμόρφωσης σε μικρή κλίμακα.



Σχήμα 3.10: Α) Στάδια μικροχύτευσης με έγχυση [19], Β) Σχηματική παρουσίαση σταδίων τυπικής μικρο-θερμής χάραξης: θέρμανση, πρεσάρισμα, ψύξη και απομάκρυνση από το καλούπι [20]

3.2.5 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΛΟΥΠΙΩΝ

Η μικροχύτευση συνιστά μία υψηλής ακρίβειας τεχνολογίας μορφοποίησης θερμοπλαστικών πολυμερών, η οποία επιτρέπει την παραγωγή μικροεξαρτημάτων με χαρακτηριστικά διαστάσεων σε επίπεδο μικρομέτρων, διασφαλίζοντας υψηλή διαστασιολογική πιστότητα και εξαιρετική ποιότητα επιφάνειας. Κρίσιμος παράγοντας για τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας αποτελεί η ακριβής κατασκευή του μικρο-καλουπιού, το οποίο ενσωματώνει την κοιλότητα μορφοποίησης του τελικού εξαρτήματος. Η ανάγκη για πολύ στενές ανοχές ($<5 \mu\text{m}$) και η διαχείριση φαινομένων μικροκλίμακας καθιστούν την κατασκευή μικροκαλουπιών ένα ιδιαίτερα απαιτητικό εγχείρημα, το οποίο απαιτεί την εφαρμογή εξελιγμένων τεχνικών μικροκατεργασίας, καθώς και τη χρήση υλικών με υψηλή μηχανική αντοχή και θερμική σταθερότητα. Ο σχεδιασμός του αποσκοπεί στην πιστή αναπαραγωγή της γεωμετρίας του τελικού εξαρτήματος, ενώ παράλληλα διασφαλίζει τη θερμική σταθερότητα, την ομοιογενή πλήρωση και την ελεγχόμενη στερεοποίηση του υλικού. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί πως το καλούπι σχεδιάζεται και μελετάται ώστε να ενσωματώνει συστήματα θερμικής ρύθμισης και μηχανισμούς εκτίναξης, οι οποίοι συμβάλλουν στην ακριβή και επαναλαμβανόμενη παραγωγή μικροεξαρτημάτων σε βιομηχανική κλίμακα.

3.2.6 ΧΡΟΝΟΛΟΓΙΟ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΚΑΛΟΥΠΙΩΝ

Η κατασκευή καλουπιών αποτελεί βασική τεχνολογία της βιομηχανικής παραγωγής, με ρίζες που ανάγονται στην αρχαιότητα και συνεχή εξέλιξη παράλληλα με την πρόοδο της μηχανολογίας και των υλικών. Στην αρχαιότητα, χρησιμοποιούνταν καλούπια από πέτρα ή άμμο για την παραγωγή μεταλλικών αντικειμένων μέσω απλής χύτευσης. Η Βιομηχανική Επανάσταση του 18ου και 19ου αιώνα έφερε την αντικατάσταση των παραδοσιακών καλουπιών με μεταλλικά και την εισαγωγή εργαλειομηχανών για πιο ακριβή κατασκευή.

Κατά τον 20ό αιώνα, με την ανάπτυξη των πολυμερών και των θερμοπλαστικών, καθιερώθηκε η χρήση καλουπιών για χύτευση με έγχυση και άλλες μεθόδους μορφοποίησης πλαστικών. Τη δεκαετία του 1980, η υιοθέτηση CAD/CAM τεχνολογιών κατέστησε δυνατή τη σχεδίαση και κατεργασία καλουπιών με μεγαλύτερη ακρίβεια και πολυπλοκότητα. Από τις αρχές του 21ου αιώνα, η έλευση των μικροκατεργασιών και των CNC εργαλειομηχανών υψηλής ακρίβειας οδήγησε στην ανάπτυξη μικροκαλουπιών, κατάλληλων για εφαρμογές υψηλής τεχνολογίας όπως τα μικρο-ηλεκτρομηχανικά συστήματα (MEMS), η μικρο-ηλεκτρονική και η ιατροτεχνολογία.

Σήμερα, η τεχνολογία της κατασκευής καλουπιών βρίσκεται στην αιχμή της καινοτομίας με την ενσωμάτωση αισθητήρων, τεχνητής νοημοσύνης και έξυπνων λειτουργιών που εντάσσονται στο πλαίσιο της Βιομηχανίας 4.0.

3.2.7 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΛΟΥΠΙΩΝ

Η διαδικασία κατασκευής ενός καλουπιού με μικροχύτευση περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

- Τρισδιάστατη σχεδίαση: το πρώτο στάδιο αναφέρεται στη τρισδιάστατη μοντελοποίηση του καλουπιού με τη χρήση λογισμικών CAD. Το στάδιο αυτό αποτελεί καθοριστικό ρόλο στην γεωμετρική και διαστασιολογική του ακρίβεια. Εκτελούνται μελέτες σχετικά με το πάχος των τοιχωμάτων που θα πρέπει να κατασκευαστούν, έτσι ώστε να υπάρχει ομοιόμορφη ψύξη, αποφυγή παραμορφώσεων και ελαττωμάτων, όπως η δημιουργία κοιλοτήτων, ενίσχυσης μηχανικής αντοχής και σταθερότητα διαστάσεων μετά την ψύξη. Υλοποιείται μελέτη ακμών, ώστε κατά την απομάκρυνση των υλικών χύτευσης να μην δημιουργούνται αλλοιώσεις στις γεωμετρίες των προϊόντων. Ενσωμάτωση καναλιών ψύξης και έλεγχος προσομοίωσης ροής για τον εντοπισμό προβλημάτων πριν τη κατασκευή. Στόχος μέσα από τη σχεδίαση είναι η δημιουργία ενός καλουπιού, το οποίο να προσδίδει: -διαστασιολογική ακρίβεια και

γεωμετρικών χαρακτηριστικών, -δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης καλουπιού και - απλότητα στη παραγωγή και τη συντήρησή τους.

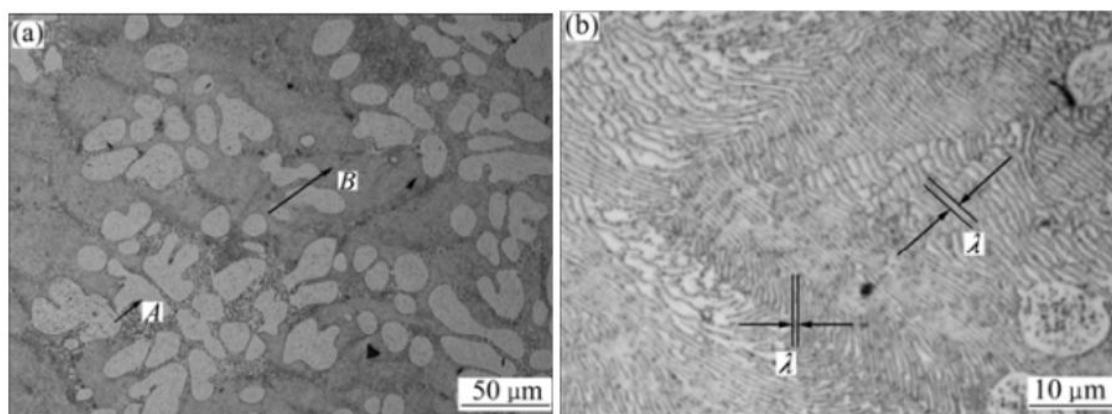
- Επιλογή υλικού: για την επιλογή του υλικού που θα χρησιμοποιηθεί για το καλούπι, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η προσδοκώμενη παραγωγική διάρκεια, οι θερμοκρασίες επεξεργασίας και οι επιφανειακές απαιτήσεις. Είναι κρίσιμο να αντέχει στη φθορά και τη κόπωση, να μην παρουσιάζει παραμορφώσεις λόγω των διαφόρων μεταβολών σε θερμοκρασίες κατά την έγχυση και τη ψύξη του υλικού χύτευσης. Να παρουσιάζει ανθεκτικότητα σε διάβρωση, καθώς και σε κάποια πολυμερή, καθώς κατά τη διαδικασία έγχυσης απελευθερώνουν διαβρωτικά αέρια. Να είναι υλικό που να κατεργάζεται εύκολα και να προσδίδει λεία επιφάνεια.
- Μηχανουργική κατεργασία: η υλοποίηση της κατασκευής επιτυγχάνεται με τη χρήση CNC μικροκατεργασιών. Έπειτα, από τη τρισδιάστατη σχεδίαση (CAD) προσεγγίζεται η στρατηγική κατεργασίας (CAM), για την αφαίρεση υλικού και φινιρίσματος. Λαμβάνοντας υπόψη το επεξεργαζόμενο υλικό, επιλέγονται οι κατάλληλες συνθήκες κατεργασίας και τα κατάλληλα κοπτικά εργαλεία για την επίτευξη λείας παραγόμενης επιφάνειας, με τις απαραίτητες διαστασιολογικές και γεωμετρικές ακρίβειες.

3.2.8 ΜΙΚΡΟΧΥΤΕΥΣΗ

Η μικροχύτευση (micro-molding) αποτελεί τεχνική μικροκατεργασίας που επιτρέπει την κατασκευή μικροδομών και μικροεξαρτημάτων υψηλής ακρίβειας, μέσω της χρήσης καλουπιών (molds), στα οποία εγχέονται ή αποτυπώνονται θερμοπλαστικά ή άλλα υλικά σε θερμικά ή μηχανικά ελεγχόμενες συνθήκες. Η μέθοδος αξιοποιείται ευρέως στην παραγωγή εξαρτημάτων για μικρο-ρευστομηχανικές συσκευές (μικροκανάλια, μικροαντλίες), βιοαισθητήρες, οπτικά στοιχεία και μικροηλεκτρομηχανικά συστήματα (Micro-Electro-Mechanical Systems) (MEMS).

Ο Li Bang-sheng και οι συνεργάτες του [27] επικεντρώθηκαν στην ανάπτυξη και αξιολόγηση της τεχνολογίας χύτευσης ακρίβειας σε κλίμακα μικρομέτρων για τη παραγωγή μικρο-κατασκευών. Η μικρο-ακρίβειας χύτευση αποτελεί μία σύγχρονη τεχνολογία παραγωγής μικρο-κατασκευών, προσφέροντας υψηλή ακρίβεια και δυνατότητα δημιουργίας πολύπλοκων γεωμετριών. Το κράμα Zn-Al₄ επιλέχθηκε ως υλικό μελέτης λόγω των ευνοϊκών μηχανικών και θερμικών ιδιοτήτων του, που το καθιστούν κατάλληλο για μικρο-κατασκευές υψηλής επιφανειακής ποιότητας. Το άρθρο εξετάζει την εφαρμογή μικρο-ακρίβειας χύτευσης για την παραγωγή τρισδιάστατων μικρο-κατασκευών με στόχο την αξιολόγηση της μικρο-δομής και των διαστασιολογικών χαρακτηριστικών τους.

Η πειραματική διαδικασία περιλάμβανε τη χρήση μεταλλικών καλουπιών για την παραγωγή μικρο-κατασκευών από το λιωμένο κράμα Zn-Al₄. Το λιωμένο μέταλλο εισήχθη στα καλούπια με μικρο-δομές και μέσω μικρο-καναλιών, όπου ψύχεται και στερεοποιείται ταχέως, διασφαλίζοντας έτσι υψηλή γεωμετρική ακρίβεια και επιφάνειες με ελάχιστη τραχύτητα. Η διαδικασία πραγματοποιήθηκε υπό ελεγχόμενες συνθήκες θερμοκρασίας και ροής μετάλλου, προκειμένου να παρατηρηθεί η επίδραση της ψύξης στη μικρο-δομή και στον προσανατολισμό των κόκκων, καθώς και να εκτιμηθεί η επαναληψιμότητα των διαστάσεων των παραγόμενων μικρο-κατασκευών, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.11.



Σχήμα 3.11: Μικρο-δομές μακροσκοπικών δειγμάτων κράματος Zn-Al₄ [27]

Τα αποτελέσματα της μελέτης έδειξαν ότι η χύτευση με μικρο-ακρίβεια, με τη χρήση κράματος Zn-Al₄ επιτρέπει την παραγωγή μικρο-κατασκευών με υψηλή διαστασιολογική ακρίβεια και ομοιογενή μικρο-δομή. Η γρήγορη στερεοποίηση και η χρήση μεταλλικών καλουπιών συμβάλλουν στη μείωση της ατέλειας των επιφανειών και στην επίτευξη πολύπλοκων γεωμετριών, καθιστώντας τη μέθοδο αποτελεσματική για εφαρμογές μικρο-μηχανικής και μικρο-τεχνολογιών. Η έρευνα υπογραμμίζει την προοπτική της μεθόδου αυτής, ως οικονομικά αποδοτικής και αξιόπιστης τεχνικής για την κατασκευή τρισδιάστατων μικρο-κατασκευών υψηλής ποιότητας.

3.2.9 ΧΡΟΝΟΛΟΓΙΟ ΜΙΚΡΟΧΥΤΕΥΣΗΣ

Η μικρο-χύτευση (micro-molding) ως τεχνική επεξεργασίας και παραγωγής μικροδομών έχει παρουσιάσει αξιοσημείωτη πορεία τις τελευταίες δεκαετίες. Η εξέλιξή της μπορεί να χωριστεί σε διακριτές περιόδους, με βάση τις τεχνολογικές και επιστημονικές καινοτομίες που την επηρέασαν.

Η μικροχύτευση δεν υπήρχε ως διακριτή τεχνολογία κατά τις πρώτες δεκαετίες της μικροκατασκευής. Από τις αρχές του 1950, η έρευνα επικεντρωνόταν κυρίως στην ανάπτυξη της φωτολιθογραφίας και των τεχνικών κατεργασίας πυριτίου, η ανάγκη κατασκευής εξαρτημάτων μικρής κλίμακας με διαστασιολογική ακρίβεια για ηλεκτρονικά κυκλώματα και μικροσκοπικά μηχανικά συστήματα, οδήγησε στην ανάπτυξη της μεθόδου μικροχύτευσης. Την περίοδο αυτή αναπτύχθηκαν τεχνικές βασισμένες σε παραδοσιακή έγχυση θερμοπλαστικών σε καλούπια (injection molding), με στόχο τη σμίκρυνση γεωμετριών χωρίς απώλεια ακρίβειας.

Η δεκαετία του 1980 σηματοδοτεί τη συστηματική έρευνα και τεχνολογική ανάπτυξη της μικροχύτευσης, με την είσοδο της μικρό-θερμής χάραξης και της μικρό-χύτευσης με έγχυση. Η πρώτη αναφέρεται σε μέθοδο θερμικής αποτύπωσης σε πολυμερή μέσω καλουπιών υψηλής ακρίβειας και η δεύτερη επικεντρώνεται στην προσαρμογή της κλασικής έγχυσης αλλά με τροποποιημένα καλούπια υψηλής ακρίβειας. Την περίοδο εκείνη τοποθετήθηκαν οι βάσεις για τα γεωμετρικά όρια, τις ανοχές και τους θερμικούς περιορισμούς που διέπουν τη διαδικασία της μικροχύτευσης.

Από τα μέσα της δεκαετίας του 1990 η μικροχύτευση καθιερώθηκε ως μία από τις βασικές μεθόδους για την κατασκευή μικροδομών πολυμερών. Η ανακάλυψη και εξέλιξη νέων φωτοευαίσθητων υλικών και ελαστομερών επέτρεψε την εισαγωγή εναλλακτικών μεθόδων, όπως: στερεοποίηση με UV ακτινοβολία (UV Micromolding), χρήση καλουπιών από πολυδιμεθυλοσιλοξάνιο (PDMS) (soft lithography), χύτευση από διαλύματα πολυμερών για βιοσυμβατά υλικά (solvent casting), μεταλλική μικροχύτευση, κυρίως σε κράματα χαμηλού σημείου τήξης (micro casting μετάλλων). Η χρήση των διάφορων αυτών μεθόδων κατέστησε δυνατή τη γρήγορη, επαναλαμβανόμενη και οικονομική παραγωγή μικροδομών με υψηλή ανάλυση, χωρίς την ανάγκη πολύπλοκων συστημάτων.

Στη τελευταία δεκαπενταετία φαίνεται να έχει ωριμάσει πλήρως στις τεχνικές της, η μέθοδος της μικροχύτευσης και στη διεπιστημονική τους εφαρμογή. Έχει παρουσιάσει σημαντική πρόοδο σε μεταλλικές και νανο-σύνθετες μικροχυτεύσεις, όπως η θερμή μεταλλική μικροχύτευση μέσω μικρο-ανάγλυφης αποτύπωσης μετάλλου (embossing). Εστιάζεται στην αυτοματοποίηση και μικρο-γράφηση παραγωγής, με αυτοματοποιημένες μηχανές (CNC)-ελεγχόμενες πρέσες μικροέγχυσης, χρήση νανο-σύνθετων πολυμερών, σύνδεση με τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης, συνδυάζοντας παραδοσιακή χύτευση με προσθετική κατασκευή. Τέλος, η σύγχρονη μικροχύτευση δεν περιορίζεται πλέον στην αναπαραγωγή μικροδομών, αλλά διαμορφώνεται ως τεχνολογική πλατφόρμα μικροκατασκευής για εφαρμογές σε οπτοηλεκτρονική, μικρορομποτική, εύκαμπτα βιοηλεκτρονικά και άλλα.

3.2.10 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΙΚΡΟΧΥΤΕΥΣΗΣ

Η μικροχύτευση ακολουθεί συγκεκριμένα στάδια διασφαλίζοντας τη γεωμετρική μορφολογία και τη λειτουργικότητα του παραγόμενου προϊόντος. Τα βασικά βήματα της διαδικασίας είναι:

- Σχεδίαση και παρασκευή καλούπιού, παράγεται δηλαδή ένα αρνητικό αποτύπωμα. Αυτό γίνεται με:
 - φωτολιθογραφία επάνω σε υπόστρωμα όπως πυρίτιο ή γυαλί,
 - ξηρή χάραξη για υψηλό λόγο διαστάσεων,
 - με τρισδιάστατη εκτύπωση υψηλής ανάλυσης,
 - διαφορετικά, με τη χρήση αυτοματοποιημένων εργαλειομηχανών μικροκατεργασιών.
- Επιλογή και προετοιμασία υλικού χύτευσης, με τα υλικά να μπορούν να είναι:
 - πολυμερή για εύκαμπτες ή βιοσυμβατές εφαρμογές,
 - μέταλλα ή κεραμικά, μέσω μικροέγχυσης ή μικροχυτηρίων υψηλής ακρίβειας.
- Γίνεται η διαμόρφωση, το υλικό που έχει προετοιμαστεί εγχέεται ή αποτυπώνεται μέσα στο καλούπι, με τις μεθόδους που παρατίθενται:
 - θερμή πίεση, θερμαινόμενο καλούπι πιέζει το πολυμερές, το οποίο στη συνέχεια ψύχεται και στερεοποιείται,
 - λιωμένο υλικό εγχέεται υπό πίεση στο καλούπι,
 - το ρευστό πολυδιμεθυλοσιλοξάνιο χύνεται σε καλούπι και πολυμερίζεται.
- Διαδικασία αποκόλλησης, έπειτα από την σκλήρυνση ή ψύξη, η δομή απομακρύνεται προσεκτικά από το καλούπι. Η επιτυχής αποκόλληση εξαρτάται από την επιφανειακή ενέργεια των υλικών ή/και την ύπαρξη επικαλύψεων στο καλούπι.
- Τέλος η διαδικασία ολοκληρώνεται με την μεταεπεξεργασία, η οποία ανάλογα με την εφαρμογή μπορεί να περιλαμβάνει:
 - επιφανειακή τροποποίηση,
 - συγκόλληση με άλλα υποστρώματα,
 - λειτουργικές τροποποιήσεις.

3.2.11 ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΙΚΡΟΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ ΜΕ CNC

Οι μικροκατεργασίες με CNC (Computer Numerical Control), δηλαδή εργαλειομηχανές αριθμητικού ελέγχου με χρήση Η/Υ, αποτελούν σημαντικό κλάδο της σύγχρονης τεχνολογίας υψηλής πιστότητας στη μεταποίηση, επιτρέποντας την παραγωγή μικροδομών με διαστάσεις σε μικροκλίμακα, απαραίτητες σε διάφορους τομείς της βιομηχανίας. Οι κύριες μέθοδοι μικροκατεργασιών με CNC περιλαμβάνουν αφαιρετικές διεργασίες όπως το μικρο-φραιζάρισμα (micro-milling), την ηλεκτροδιαβρωτική κατεργασία μικροκλίμακας (micro-EDM) και τη μικρολείανση (micro-grinding), οι οποίες διαφοροποιούνται ως προς τον μηχανισμό αφαίρεσης υλικού και τις δυνατότητες εφαρμογής τους.

3.2.12 ΜΙΚΡΟ-ΦΡΑΙΖΑΡΙΣΜΑ ΜΕ CNC

Το μικρο-φραιζάρισμα αποτελεί μία από τις σημαντικότερες τεχνικές μικροκατεργασίας, λόγω της δυνατότητάς της να παράγει πολύπλοκες γεωμετρίες υψηλής ακρίβειας και μικροδομών με υψηλό λόγο ύψους προς διάμετρο (aspect ratio). Η διαδικασία είναι παρόμοια με το συμβατικό φραιζάρισμα, αλλά επηρεάζεται έντονα από φαινόμενα μικροκλίμακας, όπως το "μέγεθος της αποκοπής" (minimum chip thickness), το "φαινόμενο μεγέθους" (size effect), η αναλογία γεωμετρίας εργαλείου προς χαρακτηριστικά τεμαχίου, και οι δυναμικές παραμορφώσεις του συστήματος κατεργασίας.

- Η ενέργεια του πρώτου χαρακτηριστικού της διεργασίας αυτής, αναφέρεται στο πάχος του αποκοπτόμενου υλικού, το οποίο προσεγγίζει την ακτίνα της αιχμής του εργαλείου, οδηγώντας σε αύξηση της πλαστικής παραμόρφωσης και αλλαγή του μηχανισμού κοπής, κάτω από ένα κρίσιμο όριο το υλικό δεν αφαιρείται με κοπή, αλλά μέσω πλαστικής παραμόρφωσης, ονομαζόμενο ως «φαινόμενο αυλακώσεως» (ploughing effect), οδηγώντας σε χαμηλή απόδοση κατεργασίας και αυξημένη φθορά εργαλείου.
- Το φαινόμενο μεγέθους περιγράφει τη μη γραμμική συμπεριφορά της διεργασίας κοπής όταν οι διαστάσεις της αποκοπής γίνονται συγκρίσιμες με μικροδομές του υλικού ή με γεωμετρικά χαρακτηριστικά του εργαλείου (π.χ. ακτίνα αιχμής). Αυτό το φαινόμενο προκαλείται από την ασυμμετρία αποκοπής και τη μη αναλογική συμπεριφορά του υλικού σε νανο- και μικροκλίμακα.

Όπως επισημαίνουν ο Nirgude Suyash και οι συνεργάτες του (2025) [23], η έρευνα γύρω από τις CNC φραιζο-μηχανές αναδεικνύει την πρόοδο της βιομηχανικής παραγωγής μέσω του αυτοματισμού και της υψηλής ακρίβειας. Η εφαρμογή της τεχνολογίας CNC υπερβαίνει τους περιορισμούς της χειροκίνητης κατεργασίας, προσφέροντας επαναληψιμότητα, αποδοτικότητα και μείωση κόστους, ενώ ταυτόχρονα επιτρέπει την κατασκευή πολύπλοκων εξαρτημάτων με ελάχιστη ανθρώπινη παρέμβαση. Η σημασία του CNC είναι ιδιαίτερα εμφανής σε κλάδους όπως η αεροναυπηγική, η αυτοκινητοβιομηχανία και η ιατρική τεχνολογία, όπου η ακρίβεια είναι καθοριστικός παράγοντας, ενώ η χρήση CAD/CAM λογισμικού και G-code προγραμματισμού ενισχύει περαιτέρω την παραγωγικότητα.

Όσον αφορά τις μελλοντικές προοπτικές, οι μικρές CNC μηχανές αναμένεται να αποτελέσουν οικονομικές και ελαφριές λύσεις για βιομηχανίες, εκπαιδευτικά ιδρύματα και μικρές επιχειρήσεις. Η ευκολία εγκατάστασης και η προσαρμοστικότητα σε διαφορετικά περιβάλλοντα τις καθιστούν ιδανικές για υποστηρικτική παραγωγή και εξατομικευμένες εφαρμογές, ακόμα και σε περιοχές με περιορισμένες υποδομές. Επιπλέον, η ενσωμάτωση τεχνητής νοημοσύνης και προηγμένου λογισμικού θα ενισχύσει τη λειτουργικότητα και την παραγωγικότητά τους, καθιστώντας τις μίνι CNC μηχανές κομβικό εργαλείο για την ανάπτυξη ευέλικτων και εξατομικευμένων διαδικασιών κατασκευής στο μέλλον.

Για να παραχθεί το τελικό προϊόν στις απαιτούμενες διαστάσεις με τα σωστά γεωμετρικά

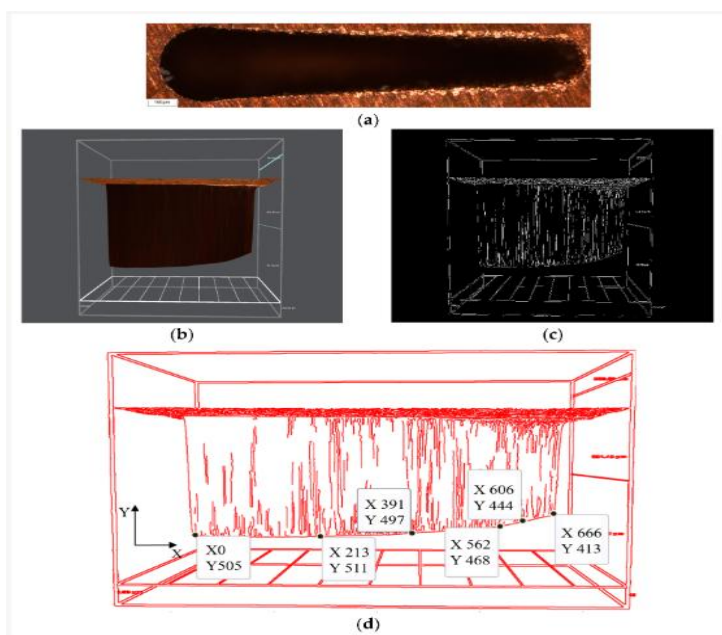
χαρακτηριστικά, απαιτείται ο σωστός συνδυασμός παραμέτρων μικροκοπής. Συγκεκριμένα ο Rajamani R and Leo Kumar S P [21], ανέλυσαν στη διαδικασία του μικρο-φραιζαρίσματος την επίδραση των παραμέτρων στην γεωμετρική ακρίβεια των εξαρτημάτων, στην επιφανειακή ποιότητα και στη φθορά του εργαλείου. Ως υλικό εργασίας επιλέχθηκε ένα μη σιδηρούχο κράμα το Ti-Grade-5 (Ti-6Al-4V), για εργαλείο κοπής χρησιμοποιήθηκε μια μικρο-φραίζα από καρβίδιο βολφραμίου με δύο κοπτικά πτερύγια και διάμετρο 500 μm .

Οι πειραματικές δοκιμές διεξήχθησαν με βάση τον Ορθογώνιο Πίνακα Taguchi L9, σχεδιάστηκαν δηλαδή εννέα πειράματα για τη μελέτη, χρησιμοποιώντας ένα μοναδικό εργαλείο μικροκοπής. Λαμβάνοντας υπόψη το φαινόμενο μεγέθους του εργαλείου, τα αποτελέσματα έδειξαν πως η ταχύτητα κοπής και η πρόωση ασκούν κυρίαρχη επίδραση στην γεωμετρική ακρίβεια, στην επιφανειακή ποιότητα και στη φθορά εργαλείου. Ο συνδυασμός χαμηλών τιμών ταχύτητας κοπής, πρόωσης και βάθους κοπής έφερε ως αποτέλεσμα μεγάλη γεωμετρική ακρίβεια, χαμηλή επιφανειακή τραχύτητα και με ελάχιστη φθορά εργαλείου. Σε αντίθεση όταν αυξήθηκε το βάθος κοπής, αυξήθηκε η φθορά του κοπτικού και η τραχύτητα, μειώνοντας έτσι τη γεωμετρική ακρίβεια. Συμπερασματικά, η βελτιστοποίηση των παραμέτρων κοπής με βάση το φαινόμενο μεγέθους ενισχύει την ακρίβεια και τη διάρκεια ζωής του εργαλείου, με μελλοντικές έρευνες να προτείνουν διερεύνηση εναλλακτικών συνθηκών κοπής, υλικών και επιστρώσεων εργαλείων.

3.2.13 ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΒΡΩΤΙΚΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ

Η μέθοδος Ηλεκτροδιαβρωτικής κατεργασίας Micro-Electrical Discharge Machining (Micro-EDM), είναι μία μη-επαφική αφαιρετική τεχνική, η οποία βασίζεται στην αφαίρεση υλικού μέσω τοπικών ηλεκτρικών εκκενώσεων μεταξύ αγώγιμου εργαλείου και τεμαχίου εντός διηλεκτρικού ρευστού, με τοπική τήξη και εξάτμιση του υλικού. Η απουσία μηχανικής επαφής επιτρέπει την επεξεργασία σκληρών, εύθραυστων ή πολύπλοκων γεωμετρικά υλικών με υψηλή ακρίβεια και καλή επιφανειακή ποιότητα, όπου η μηχανική κοπή αποτυγχάνει. Όμως περιορίζεται αποκλειστικά σε αγώγιμα υλικά και χαρακτηρίζεται από χαμηλό ρυθμό αφαίρεσης υλικού, παρουσιάζοντας επίσης και μορφολογική τραχύτητα εξαρτώμενη από το εύρος του παλμού και στο λόγο της χρονικής διάρκειας ενεργοποίησης του παλμού (on-time) προς το συνολικό κύκλο λειτουργίας (on-time & off-time).

Για τη μέθοδο Ηλεκτροδιαβρωτικής κατεργασίας κρίσιμος παράγοντας για την απόδοση της γεωμετρικής ακρίβειας, του χρόνου κατεργασίας και της επιφανειακής ποιότητας έχει η φθορά του ηλεκτροδίου. Ο Xiaodong Zhang και οι συνεργάτες του [25], εξέτασαν την κατεργασία μικροκαναλιών σε χαλκό μέσω micro-EDM, εστιάζοντας στο πρόβλημα της φθοράς του ηλεκτροδίου που περιορίζει την ακρίβεια. Η μελέτη τους επιδίωξε τη μείωση και αντιστάθμιση της φθοράς μέσω πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης με τη μέθοδο GRA σε πειράματα ορθογώνιου πίνακα, ενώ παράλληλα προτείνουν μια νέα προσέγγιση που συνδυάζει τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, επεξεργασία εικόνας και μη γραμμική μέθοδο σταθερού μήκους αντιστάθμισης, με στόχο την πειραματική επιβεβαίωση της ακρίβειας και αποτελεσματικότητας της.



Σχήμα 3.12: α) Μορφολογική διαμόρφωση των μικροαυλακώσεων χωρίς καμία διόρθωση/αντιστάθμιση σφαλμάτων, β) προφίλ μικροαυλακώσεων χωρίς αντιστάθμιση, γ) η δυαδική αναπαράσταση του προφίλ και β) οι συντεταγμένες της μεταβολής του περιγράμματος της κατώτερης επιφάνειας της μικροαυλακώσεως [25]

Η μελέτη, μέσω ορθογώνιου πειραματικού σχεδιασμού, αναδεικνύει ότι οι ηλεκτρικοί παράγοντες (I_p , U_p , f_p και w_p) έχουν σημαντικότερη επίδραση στον χρόνο κατεργασίας και στη φθορά του ηλεκτροδίου σε σχέση με τον μη ηλεκτρικό παράγοντα Rot . Η βελτιστοποίηση με τη μέθοδο GRA οδήγησε σε συνδυασμό παραμέτρων που μείωσε τον χρόνο κατεργασίας κατά 10,01% και τη φθορά του ηλεκτροδίου, τόσο αξονικά όσο και ακτινικά. Επιπλέον, η εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου μη γραμμικής σταθερού μήκους αντιστάθμισης επέτρεψε την κατασκευή μικροαυλακώσεων με ομοιόμορφο βάθος και πλάτος, βελτιώνοντας σημαντικά την ποιότητα κατεργασίας και επιβεβαιώνοντας την ακρίβεια και τη λειτουργικότητα της προσέγγισης.

3.2.14 ΜΙΚΡΟΛΕΙΑΝΣΗ ΜΕ CNC

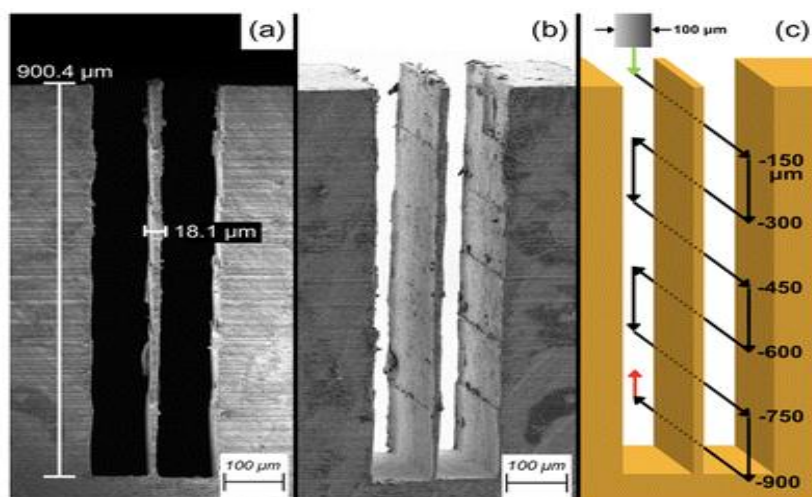
Η μικρολείανση είναι μια αφαιρετική διεργασία υπό μορφή λειαντικής κοπής (abrasive machining), κατάλληλη για την επεξεργασία πολύ σκληρών και εύθραυστων υλικών σε μικροκλίμακα. Πρωτίστως στοχεύει στην επίτευξη εξαιρετικής επιφανειακής ποιότητας, μικρο-διαστασιολογικών δομών με μικρές ανοχές και υψηλή ακρίβεια και ευελιξία σε ποικίλες γεωμετρίες. Η μέθοδος χαρακτηρίζεται από πολύ μικρό βάθος κοπής (3–15 μm), υψηλές ταχύτητες περιστροφής (μέχρι 60.000 rpm), μικρό κομμάτι που δεν αποκόπτεται (σε τάξη μm) και πολύ χαμηλές προώσεις (< 100 $\mu\text{m/s}$).

Το εργαλείο φέρει κόκκους διαμαντιού ή κυβικό νιτρίδιο του Βορίου και η κατανομή και μέγεθός τους επηρεάζουν άμεσα την ποιότητα επιφάνειας και τη φθορά του εργαλείου. Οι μικροδομές που προκύπτουν ελέγχονται σε κλίμακα μικρομέτρων, επιτρέποντας την κατασκευή μικρομηχανικών εξαρτημάτων.

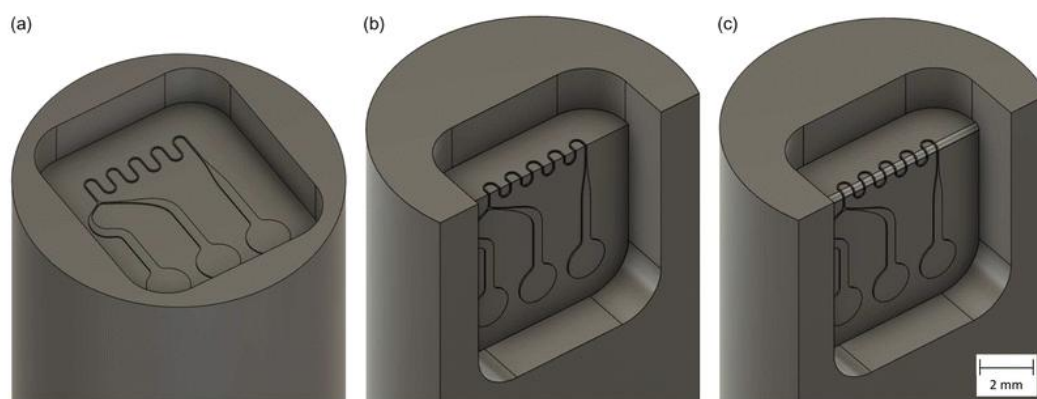
3.2.15 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΜΙΚΡΟΚΟΠΗΣ ΜΕ ΨΗΦΙΑΚΗ ΚΑΘΟΔΗΓΗΣΗ

Ο Mitchell J. C. Modarelli και ο Devin M. Kot-Thompson and Kazunori Hoshino [22] επέλεξαν να μελετήσουν και να κατασκευάσουν μικρο-ρευστοϋδραυλικά κανάλια με τη χρήση μίας πενταξονικής CNC μικρο-φραιζας. Ο συγκεκριμένος τύπος εργαλειομηχανής επιτυγχάνει διπλής κατεύθυνσης επαναληψιμότητα υπο- μm ($\leq 0,23\mu\text{m}$), δυνατότητα κατεργασίας χαρακτηριστικών μικρότερων των 20 μm και όγκο κατεργασιών τάξεως $50 \times 50 \times 68 \text{ mm}$, με αποτέλεσμα να αποδεικνύεται ικανή να

επιτυγχάνει υψηλή ανάλυση ($<20 \mu\text{m}$), κατασκευή σύνθετων γεωμετριών, συμβατότητα με ποικίλα υλικά (όπως τιτάνιο, ορείχαλκο, αλουμίνιο και ακρυλικό), καθώς και χαμηλό κόστος παραγωγής. Η μελέτη αυτή στηρίχτηκε στη κατεργασία ενός λεπτού τοιχώματος (σχήμα 3.13) από ορείχαλκο τύπου 360 με πλάτος $18,1 \mu\text{m}$ και λόγο διαστάσεων περίπου 50:1 και την κατασκευή καλουπιών με μη-επίπεδες γεωμετρίες.

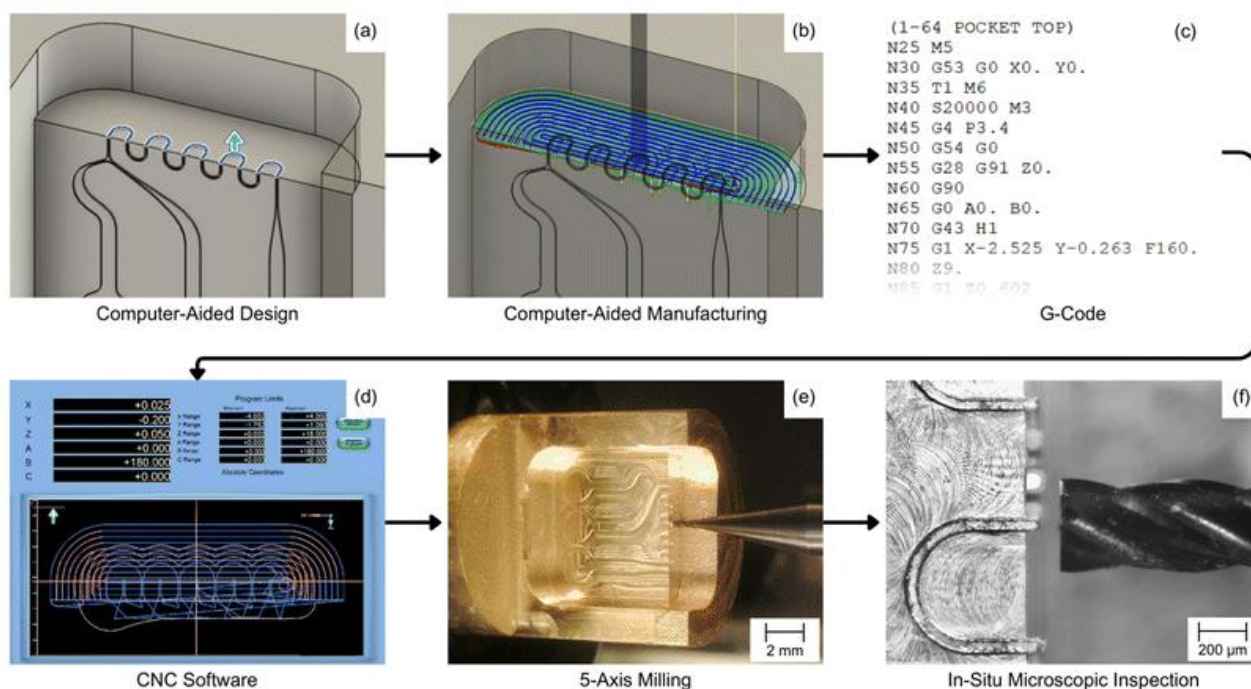


Σχήμα 3.13: Εικόνες από SEM για τα λεπτότοιχα με διαστασιολογικό λόγο 49.7:1 α) πλευρική όψη σε μεγέθυνση 180x, β) πλάγια όψη σε μεγέθυνση 175x, γ) τρισδιάστατη απεικόνιση της διαδρομής του κοπτικού εργαλείου [22]



Σχήμα 3.14: Μοντέλα μικρο-καλουπιών από CAD α) κανάλι 1 με επίπεδο μοτίβο, β) κανάλι 2 με ακμή 90° και γ) κανάλι 3 με καμπύλη ακμή ακτίνας καμπυλότητας $250 \mu\text{m}$ [22]

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τη μελέτη αυτή φαίνεται στο [σχήμα 3.15](#) και περιλαμβάνει τη τρισδιάστατη σχεδίαση (CAD) ενός μικρο-ρευστοϋδραυλικού καναλιού, τον προγραμματισμό και την εκτέλεση των κατεργασιών μέσω του σχεδιαστικού προγράμματος (CAM), την εξαγωγή του κώδικα επικοινωνίας σχεδιαστικού προγράμματος με την εργαλειομηχανή, την υλοποίηση των κατεργασιών από την εργαλειομηχανή και τέλος τον διαστασιολογικό έλεγχο.



Σχήμα 3.15: Σχηματική απεικόνιση πορείας διαδικασιών μελέτης [22]

Ως αποτέλεσμα των μελετητών προκύπτει, πως η μηχανή αποδείχθηκε ικανή να επιτυγχάνει υψηλή ανάλυση ($<20 \mu\text{m}$), κατασκευή σύνθετων γεωμετριών, παρουσιάζοντας συμβατότητα με ποικίλα υλικών (όπως τιτάνιο, ορείχαλκο, αλουμίνιο και ακρυλικό), καθώς και με χαμηλό κόστος παραγωγής. Η αξιοπιστία της κατασκευής τεκμηριώθηκε μέσω παραδειγμάτων μικρο-κατεργασίας, για λεπτά τοιχώματα με λόγο διαστάσεων 49,7:1, ημι-σφαιρικές δομές με εσωτερικά κανάλια και μικροκανάλια μη επίπεδης γεωμετρίας. Επιπλέον, καταγράφηκαν χαμηλές τιμές επιφανειακής τραχύτητας ($<100 \text{ nm}$), ενώ τα καλούπια από ορείχαλκο απέδωσαν ισοδύναμη αντοχή συγκόλλησης PDMS με δείγματα ελέγχου.

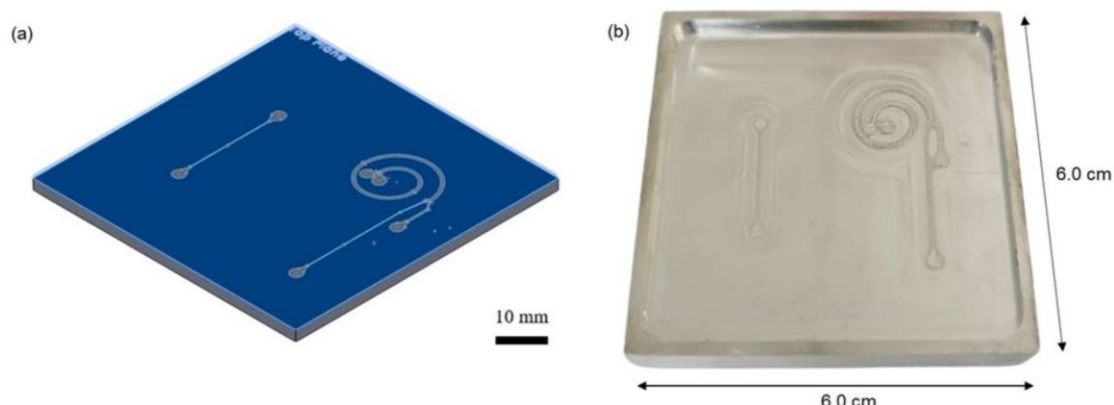
Το σύστημα χαρακτηρίζεται από υψηλή ακρίβεια και επαναληψιμότητα ($\leq 0,23 \mu\text{m}$), ενώ η λειτουργία του περιορίζεται σε CAD και CAM λογισμικό, προσφέροντας ευελιξία σχεδιασμού και απλότητα στη χρήση. Η συμπαγής του διάσταση ($0,72 \text{ m}^3$) και η απουσία ειδικών εργαστηριακών απαιτήσεων το καθιστούν ιδιαίτερα κατάλληλο για μικρής κλίμακας έρευνα και ανάπτυξη. Συνολικά, η μηχανή παρέχει στους ερευνητές τη δυνατότητα αυτόνομης και οικονομικά αποδοτικής κατασκευής πολύπλοκων μικρο-ρευστοϋδραυλικών διατάξεων, ανοίγοντας νέους δρόμους στην εξέλιξη μικρο-ρευστοϋδραυλικών συστημάτων για βιοϊατρικές και επιστημονικές εφαρμογές.

Ο Muhammad Asraf Mansor και οι συνεργάτες του [26] εξέτασαν τη χρήση εργαλειομηχανής CNC micro-milling ως αποδοτικής μεθόδου για την τρισδιάστατη κατασκευή καλουπιών μικρο-ρευστομηχανικών διατάξεων, υπογραμμίζοντας την ακρίβεια, την οικονομία και την ευελιξία της διαδικασίας ως εναλλακτική λύση στις συμβατικές τεχνικές μικροκατεργασίας. Η CNC μικρο-φραιζάρισμα αναδεικνύεται ως μία πολλά υποσχόμενη εναλλακτική, καθώς προσφέρει δυνατότητα τρισδιάστατης κατεργασίας πολύπλοκων γεωμετριών με μικρό-διαστασιολογική ακρίβεια. Η χρήση αυτής της μεθόδου στα υποστρώματα τυπωμένης πλακέτας κυκλώματος, δίνει τη δυνατότητα ταχείας πρωτοτυποποίηση μικρο-ρευστομηχανικών καλουπιών, συνδυάζοντας την ευελιξία της ψηφιακής σχεδίασης με τη σταθερότητα και την επαναληψιμότητα που παρέχει ο αριθμητικός έλεγχος κατεργασιών.

Η αξιοποίηση της διαδικασίας του μικρό-φραιζαρίσματος δεν περιορίζεται μόνο στη μείωση του χρόνου παραγωγής και του κόστους, αλλά επεκτείνεται και στη δυνατότητα δημιουργίας τρισδιάστατων δομών, οι οποίες δύσκολα επιτυγχάνονται με κλασικές δισδιάστατες τεχνικές μικρολιθογραφίας. Παράλληλα, η μέθοδος επιτρέπει τη χρήση διαφορετικών υλικών και την

προσαρμογή σε ποικίλες εφαρμογές, από μικρο-ρευστομηχανικές διατάξεις έως βιοϊατρικά μικροσυστήματα. Έτσι, η διαδικασία αυτή προσφέρει ένα ευέλικτο και προσιτό εργαλείο που γεφυρώνει το χάσμα ανάμεσα στην υψηλή ακρίβεια και την οικονομικά αποδοτική κατασκευή μικροδομών.

Στο πειραματικό μέρος της μελέτης, οι ερευνητές αρχικά σχεδίασαν τρισδιάστατες τις μικρο-ρευστομηχανικές διατάξεις μέσω CAD λογισμικού, λαμβάνοντας υπόψη κρίσιμες παραμέτρους γεωμετρίας όπως το πλάτος και το βάθος των μικροκαναλιών. Οι γεωμετρίες αυτές μετατράπηκαν σε κώδικα G-code, ο οποίος καθοδηγούσε την κίνηση του εργαλείου κοπής σε πέντε άξονες, επιτρέποντας τη δημιουργία πολύπλοκων τοπολογιών όπως φαίνεται στο σχήμα 3.16.



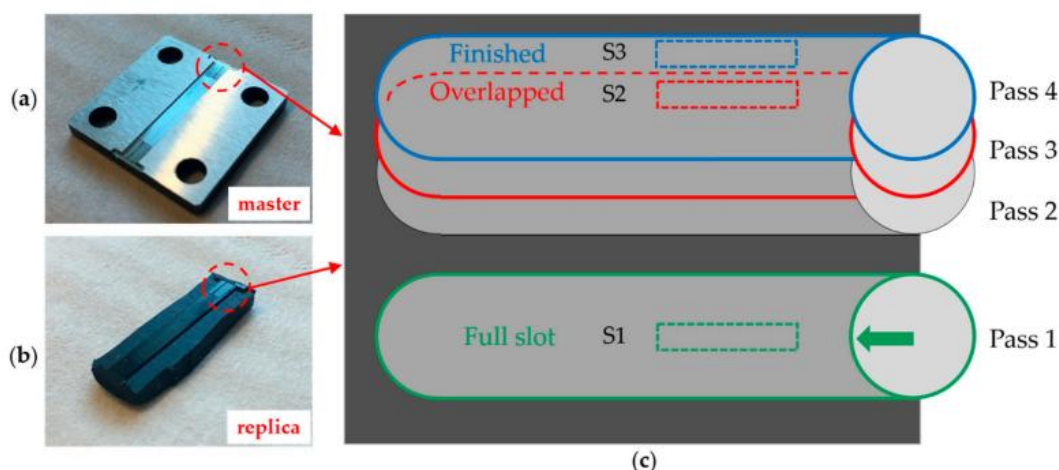
Σχήμα 3.16: Τα στάδια ανάπτυξης του κύριου καλούπιού: α) τρισδιάστατη σχεδίαση, β) καλούπι κατασκευασμένο από το μικρο-φραιζάρισμα [26]

Μετά την κατεργασία, τα καλούπια χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή μικροκαναλιών μέσω χύτευσης με πολυδιμεθυλοσιλοξάνη (PDMS). Οι παραγόμενες μικροδομές αξιολογήθηκαν μικροσκοπικά για τον προσδιορισμό της διαστασιολογικής τους ακρίβειας και της ομοιομορφίας των καναλιών. Επιπλέον, εξετάστηκε η αναπαραγωγιμότητα της μεθόδου, μέσω επαναλαμβανόμενων δοκιμών, με στόχο την επιβεβαίωση της σταθερότητας του μικρο-φραιζαρίσματος.

Τα πειραματικά αποτελέσματα ανέδειξαν ότι η διαδικασία κατεργασιών αυτή σε τυπωμένη πλακέτα κυκλώματος, μπορεί να παράγει μικρορευστομηχανικές διατάξεις με ικανοποιητική ακρίβεια, υψηλή επαναληψιμότητα και χαμηλό κόστος, αποδεικνύοντας τη χρησιμότητά της για γρήγορη πρωτοτυποποίηση.

Ο Federico Baruff και οι συνεργάτες του [28] εξέτασαν και αξιολόγησαν την ακρίβεια ενός εμπορικού σιλικονούχου υλικού αντιγραφής κατασκευάζοντας μήτρες μέσω κατεργασίας μικρο-φραιζαρίσματος (σχήμα 3.17). Μέσα από τη συγκριτική ανάλυση με άμεσες μετρήσεις, εξετάζεται η ικανότητά του να αναπαράγει επιφανειακή τοπογραφία και γεωμετρικές διαστάσεις, με σκοπό να διερευνηθεί η αξιοπιστία της μεθόδου σε περιπτώσεις, όπου οι συμβατικές τεχνικές μετρολογίας είναι περιορισμένες.

Για την αξιολόγηση της πιστότητας αντιγραφής χρησιμοποιήθηκαν δύο δοκίμια σε ανοξείδωτο χάλυβα βαμμένος AISI 440 (AISI 440 H, σκληρότητας = 60 HRC) και χάλυβας AISI 440 ανόπτησης (AISI 440 A, σκληρότητας = 18 HRC). Το πρώτο δοκίμιο εξέτασε την αναπαραγωγή της τραχύτητας επιφανείας, ενώ το δεύτερο αξιολόγησε τη γεωμετρική ακρίβεια μέσω μικρο-θυλάκων διαφορετικού βάθους.



Σχήμα 3.17: Μικρο-κατεργασμένες επιφάνειες και τα αντίγρατά τους: α) Δοκίμιο AISI 440 H. β) Αντίγραφο σιλικόνης του δοκίμιου. Είναι ορατά τα δύο αντίγραφα των κατεργασμένων επιφανειών. γ) Σχηματική απεικόνιση των μικρο-κατεργασμένων επιφανειών. Οι τέσσερις διελεύσεις του κοπτικού εργαλείου παρουσιάζονται με τη σειρά κατεργασίας τους. Οι τρεις μετρούμενες επιφάνειες S1, S2 και S3 υποδεικνύονται με διακεκομμένη γραμμή. Το πράσινο βέλος δείχνει τη διεύθυνση κατεργασίας [28]

Για τις παραπάνω αξιολογήσεις χρησιμοποίησαν οι ερευνητές ένα διμερισματικό σιλικονούχο υλικό αντιγραφής (RepliSet, Struers), το οποίο εφαρμόστηκε στα δοκίμια για τη δημιουργία αρνητικών αντιγράφων, τα οποία στη συνέχεια αναλύθηκαν αντί των αρχικών. Η τοπογραφία της επιφάνειας μετρήθηκε με τη χρήση τρισδιάστατου συνεχισιακού μικροσκοπίου, ενώ οι γεωμετρικές διαστάσεις των κοιλοτήτων αξιολογήθηκαν με όργανο οπτικής μεταβολής εστίασης. Οι αβεβαιότητες μέτρησης εκτιμήθηκαν ώστε να καταστεί δυνατή μία στατιστικά έγκυρη σύγκριση μεταξύ των άμεσων μετρήσεων στα αρχικά δείγματα και των έμμεσων μετρήσεων στα αντίγραφα.

Η μελέτη έδειξε ότι η τεχνική της αντιγραφής με εκμαγείο μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά για την έμμεση μέτρηση μικρο-κατεργασμένων επιφανειών και γεωμετρικών χαρακτηριστικών, ιδιαίτερα όταν η άμεση μέτρηση δεν είναι εφικτή. Διαπιστώθηκε όμως, ότι οι τιμές τραχύτητας στις αντιγραφές τείνουν να υπερεκτιμώνται, ενώ οι γεωμετρικές διαστάσεις υποεκτιμώνται ελαφρώς λόγω συρρίκνωσης του υλικού. Ωστόσο, οι περισσότερες αποκλίσεις βρίσκονταν εντός των ορίων αβεβαιότητας μέτρησης, γεγονός που επιβεβαιώνει τη χρησιμότητα της μεθόδου. Παρά τις συστηματικές αυτές τάσεις, η αντιγραφή με εκμαγείο μπορεί να αποτελέσει αξιόπιστο εργαλείο, υπό την προϋπόθεση ότι εφαρμόζονται κατάλληλες διορθώσεις ή βαθμονόμηση.

3.2.16 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η εξέλιξη των μικροκατεργασιών αντικατοπτρίζει την πορεία της ανθρώπινης δημιουργικότητας και τεχνολογικής ανάπτυξης, από τις πρώτες κατασκευές που εξυπηρετούσαν βασικές ανάγκες επιβίωσης έως τη συστηματική αναζήτηση ακρίβειας και αξιοπιστίας στα παραγόμενα αντικείμενα. Η ανάγκη για ανταλλακτικά και εξαρτήματα υψηλής ποιότητας ανέδειξε την απαίτηση για τυποποίηση και διαστασιολογικό έλεγχο, στοιχείο που αποτέλεσε αφετηρία για τη μετάβαση από τις παραδοσιακές κατεργασίες στις πιο εξελιγμένες μορφές τους.

Η ανάπτυξη και ενσωμάτωση αυτοματοποιημένων εργαλειομηχανών αποτέλεσε καθοριστικό παράγοντα στη βιομηχανική πρόοδο, καθώς επέτρεψε την επίτευξη μικρομετρικών ανοχών με υψηλό βαθμό επαναληψιμότητας. Στο πλαίσιο αυτό, η μικροχύτευση έρχεται να καλύψει τις απαιτήσεις της σύγχρονης παραγωγής, παρέχοντας τη δυνατότητα κατασκευής πολύπλοκων γεωμετριών με εξαιρετική ακρίβεια. Η μέθοδος αυτή διακρίνεται όχι μόνο για την ικανότητά της να ανταποκρίνεται στις αυξημένες απαιτήσεις των βιομηχανικών εφαρμογών, αλλά και για την προσαρμοστικότητά της σε διαφορετικούς τομείς παραγωγής.

Η στρατηγική σημασία της μικροχύτευσης έγκειται κυρίως στη δυνατότητα μαζικής αναπαραγωγής αντικειμένων με σταθερά χαρακτηριστικά ποιότητας, γεγονός που εξασφαλίζει χαμηλότερο κόστος, ταχύτερη παραγωγή και συνεχή τροφοδότηση της καινοτομίας. Επιπλέον, μέσω των μικροκατεργασιών και της μικροχύτευσης, καθίσταται δυνατή η αναπαραγωγή ψηφιδωτών και άλλων πολιτισμικών αντικειμένων με υψηλή πιστότητα, γεγονός που αναδεικνύει όχι μόνο τη βιομηχανική αλλά και την πολιτιστική τους διάσταση. Συνεπώς, ο συνδυασμός μικροκατεργασιών και μικροχύτευσης δεν αποτελεί απλώς μια εξελιγμένη τεχνική, αλλά θεμέλιο λίθο για τη μελλοντική ανάπτυξη και διάσωση της πολιτισμικής κουλτούρας σε διεθνές επίπεδο.

3.2.17 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1]. Vollertsen, F., Schulze Niehoff, H., & Hu, Z. (2006). State of the art in micro forming. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46(11), 1172–1179.
<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.01.033>
- [2]. Koç, M., & Özel, T. (Eds.). (2011). *Micro-Manufacturing: Design and Manufacturing of Micro-Products*. John Wiley & Sons
- [3]. Μαρκόπουλος, Α. (2005). *Μικρο-κατεργασίες* [Πτυχιακή εργασία]. Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- [4]. Αντωνιάδης, Α. (2018). *Μηχανουργική κατεργασία* (3^η έκδ.). Εκδόσεις Τζιόλα.
- [5]. Sancho, A., Arribas, L., & Teixidor, D. (2017). Micro-injection moulding. Στο Y. Qin (Επιμ.), *Micro-manufacturing technologies and their applications* (σσ. 23–66). Springer.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-39651-4_2
- [6]. Thirumalai, J. (2018). *Introductory chapter: The eminence of lithography—New horizons of next-generation lithography*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.70725>
- [7]. Giboz, J., Copponnex, T., & Mélé, P. (2007). Microinjection molding of thermoplastic polymers: a review. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 17(6), R96–R109.
<https://doi.org/10.1088/0960-1317/17/6/R02>
- [8]. Altintas, Y. (Ed.). (2010). *Micromanufacturing engineering and technology* (2nd ed.). CRC Press.
- [9]. Shea, J. J. (2020). *Prehistoric Stone Tools of Eastern Africa*. Cambridge University Press.
<https://doi.org/10.1017/9781108334969>
- [10]. Soressi, M., McPherron, S. P., Lenoir, M., Dogandžić, T., Goldberg, P., Jacobs, Z., Maigrot, Y., Martisius, N. L., Miller, C. E., Rendu, W., Richards, M., Skinner, M. M., Steele, T. E., Talamo, S., & Texier, J.-P. (2013). Neandertals made the first specialized bone tools in Europe. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(35), 14186–14190.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1302730110>
- [11]. David English. (2016). *Example of turning a bar between centers with a lathe*.
https://en.wikipedia.org/wiki/Lathe_center#/media/File:Turning_Between_Centers.jpg
- [12]. Yang, C.-K., Chen, Y.-H., Chuang, T.-J., Shankhwar, K., & Smith, S. (2020). An augmented reality-based training system with a natural user interface for manual milling operations. *Virtual Reality*, 24(3), 527–539. <https://doi.org/10.1007/s10055-019-00415-8>
- [13]. GUERGOV, S. (2018). A review and analysis of the historical development of machine tools into complex intelligent me *MECHATRONIC SYSTEMS*. *Journal of Machine Engineering*, Vol.18(No.1), 108–120. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0010.8828>
- [14]. Leo Kumar, S. P., Jerald, J., Kumanan, S., & Prabakaran, R. (2014). A Review on Current Research Aspects in Tool-Based Micromachining Processes. *Materials and Manufacturing Processes*, 29(11–12), 1291–1337. <https://doi.org/10.1080/10426914.2014.952037>
- [15]. Gupta, K. (Ed.). (2017). *Advanced Manufacturing Technologies*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-56099-1>
- [16]. GeeksforGeeks. (2023, 6 Οκτωβρίου). What is photolithography? Retrieved August 20, 2025, from <https://www.geeksforgeeks.org/electrical-engineering/what-is-photolithography/>
- [17]. Seethaler, V. (2016, 10 Μαρτίου). *Mit der Kraft des Lichts*. *fertigung.de*. Ανακτήθηκε 21 Αυγούστου 2025, από <https://www.fertigung.de/tools-more/werkzeuge/mit-der-kraft-des-lichts-260.html>
- [18]. Bhole, K. S., & Kale, B. (2022). *Techniques to minimise stair-stepping effect in micro-stereolithography process: A Review*. *Advances in Materials and Processing Technologies*.
<https://doi.org/10.1080/2374068X.2021.1970997>
- [19]. Qin, Y. (2010). *Micromanufacturing Engineering and Technology* (1st ed.). William Andrew

- [20]. Peng, L., Deng, Y., Yi, P., & Lai, X. (2014). Micro hot embossing of thermoplastic polymers: a review. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. <https://doi.org/10.1088/0960-1317/24/1/013001>
- [21]. R, R., & S P, L. K. (2025). Micro-milling cutting conditions influence on part geometrical accuracy, surface quality and tool wear in Ti-Grade-5 alloy. *Materials Research Express*, 12(2), 025403. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/adb37c>
- [22]. Modarelli, M. J. C., Kot-Thompson, D. M., & Hoshino, K. (2025). 5-Axis CNC micro-milling machine for three-dimensional microfluidics. *Lab on a Chip*, 25(2), 127–142. <https://doi.org/10.1039/D4LC00496E>
- [23]. Suyash, N., Chetan, N., Milind, R., Avadhoot, P., Pushkaraj, P., & Ketki, S. (2025). Mini CNC Milling Machine. 2025 3rd International Conference on Disruptive Technologies (ICDT), 1079–1084. <https://doi.org/10.1109/ICDT63985.2025.10986418>
- [24]. Stubblefield, R. S., GUANG, L., Xiaodong, Z., & Akoi, S. B. (2025). Simulation and Optimization of 3 Axis Cnc Milling Machine Structure. *International Journal of Mechanical Engineering*, 10.
- [25]. Zhang, X., Zhang, W., Yu, P., & Li, Y. (2025). Research on Machining Parameter Optimization and an Electrode Wear Compensation Method of Microgroove Micro-EDM. *Micromachines*, 16(4), 481. <https://doi.org/10.3390/mi16040481>
- [26]. Mansor, M. A., Hui, H. J., Ahmad, M. R., Hoa, T. S., Petru, M., & Koloor, S. S. R. (2025). Cost-efficient and rapid fabrication of PCB-based microfluidic molds using a CNC approach without cleanroom requirements. *Microchemical Journal*, 217, 115015. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2025.115015>
- [27]. LI, B., REN, M., YANG, C., & FU, H. (2008). Microstructure of Zn-Al4 alloy microcastings by micro precision casting based on metal mold. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 18(2), 327–332. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(08\)60057-6](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(08)60057-6)
- [28]. F. Baruffi, P. Parenti, F. Cacciato, M. Annoni, and G. Tosello, “On the Application of Replica Molding Technology for the Indirect Measurement of Surface and Geometry of Micromilled Components,” *Micromachines*, vol. 8, no. 6, p. 195, June 2017, doi: [10.3390/mi8060195](https://doi.org/10.3390/mi8060195).
- [29]. B. Stampone, V. Pulcini, G. Vitale, and A. Grieco, “Towards Industry 5.0 within Micro-Injection moulding Production and Industrialisation: a proof of concept,” *Procedia Computer Science*, vol. 253, pp. 3007–3014, 2025, doi: 10.1016/j.procs.2025.02.025.
- [30]. Fico, D., Rizzo, D., Montagna, F., & Esposito Corcione, C. (2023). Fused Filament Fabrication and Computer Numerical Control Milling in Cultural Heritage Conservation. *Materials*, 16(8). <https://doi.org/10.3390/ma16083038>
- [31]. [1] T. Pereira, J. V. Kennedy, and J. Potgieter, “A comparison of traditional manufacturing vs additive manufacturing, the best method for the job,” *Procedia Manufacturing*, vol. 30, pp. 11–18, 2019, doi: 10.1016/j.promfg.2019.02.003.