

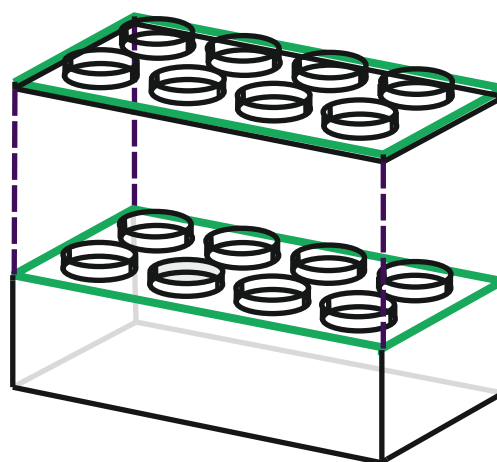


ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΙΚΡΟΚΟΠΗΣ & ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

**ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ ΜΕ
ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΦΡΑΙΖΑΡΙΣΜΑΤΟΣ
ΚΑΙ ΠΑΡΑΛΛΗΛΗ ΑΠΟΠΕΡΑΤΩΣΗ
ΜΕ ΧΑΡΑΞΗ ΜΕ LASER**



ΠΑΡΘΕΝΑΚΗ ANNA-MARIA

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΑΡΙΣΤΟΜΕΝΗΣ ΑΝΤΩΝΙΑΔΗΣ
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**

Στον Φραγκίσκο, την Άννα, την Ιωάννα

...και στον Λευτέρη

Ευχαριστώ θερμά τον καθηγητή Αριστομένη Αντωνιάδη που μου έδωσε την ευκαιρία να συνεργαστώ μαζί του, να μάθω απ' αυτόν και να δουλέψω στο εργαστήριο Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης. Πιο πολύ ακόμα, τον ευχαριστώ για το ενδιαφέρον του και για την προσοχή που μου έδωσε και δίνει σε καθέναν από μας, γνωρίζοντας πόσο σημαντικό είναι αυτό για τους φοιητές.

Οφείλω επίσης ένα μεγάλο ευχαριστώ στους υποψήφιους διδάκτορες Δημήτρη Βακόνδιο και Ταξιάρχη Μπελή για την πολύτιμη βοήθεια και συνεργασία μαζί τους.

Σε κάθε έναν από τους δικούς μου ανθρώπους - στις φίλες, τους φίλους και συντρόφους όλων αυτών των χρόνων , αντί για ευχαριστώ, οφείλω μια δέσμευση...

« Η πιο όμορφη θάλασσα είναι αυτή που δεν την αρμενίσαμε ακόμα.
Το πιο όμορφο παιδί, δε μεγάλωσε ακόμα.
και τις πιο όμορφες μέρες μας δε τις ζήσαμε ακόμα»

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	2
2. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΥΠΑΡΧΟΝΤΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΟΜΗΧΑΝΩΝ ΜΙΚΡΟΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ	3
2.1 Μικροκατεργασίες	3
2.2 Τεχνολογικά στοιχεία εργαλειομηχανών που χρησιμοποιούνται σε μικροκατεργασίες	7
2.3 Τεχνική έκθεση εργαλειομηχανών και σύγκριση μεταξύ τους	14
2.3.1 DT-110 της εταιρίας Mikrottools	14
2.3.2 W-408 της εταιρίας Willemin	17
2.3.3 Hyper 2J της εταιρίας Makino	19
2.3.4 Microgantry της εταιρίας Kugler	21
2.3.5 HSPC (High speed precision cutting) 2216 της εταιρίας Kern	24
2.3.6 KERN Micro	25
2.3.7 Ultimill V3000 της εταιρίας Moriseiki	29
2.3.8 DMU 50 eco της εταιρίας DMG	30
2.3.9 LASERTEC 40 της εταιρίας DMG	32
2.3.10 Σύγκριση εργαλειομηχανών	33
3. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ / ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	35
3.1 Σχεδιασμός και κατασκευή καλουπιού με κατεργασία φραιζαρίσματος	35
3.2 Μηδενισμός επιφάνειας και αποπεράτωση με laser	36
4. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ	41
4.1 Πείραμα 1 : καλούπι τετραγωνικής διατομής	41
4.2 Πείραμα 2 : καλούπι με καμπύλη επιφάνεια ελεύθερης μορφής	43
5. ΣΥΝΟΨΗ / ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	49
6. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	50
7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	55

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σκοπός αυτής της εργασίας είναι η δημιουργία ενός καλουπιού από αλουμίνιο 7075 T6 με δύο διαφορετικές κατεργασίες. Αρχικά, κατασκευάζεται το στερεό στο κέντρο κατεργασίας 3+2 αξόνων DMU 50 eco με κατεργασία φραιζαρίσματος. Στη συνέχεια, γίνεται το φινίρισμα της επιφάνειας του καλουπιού με κατεργασία χάραξης με laser στην εργαλειομηχανή laser engraving 3+2 αξόνων LASERTEC 40, δηλαδή η αφαίρεση ενός στρώματος λίγων μικρομέτρων της επιφάνειας του καλουπιού.

Κατά την κατασκευή ενός καλουπιού, βασική επιδίωξη είναι η δημιουργία όσο το δυνατόν καλύτερης και πιο λείας επιφάνειας. Η χάραξη με laser, είναι η πιο κατάλληλη κατεργασία για την επίτευξη του καλύτερου δυνατού αποτελέσματος από πλευράς ακρίβειας και ποιότητας τελικής επιφάνειας ($Ra=0.8 \mu m$ σε PCD και πάνω από $Ra=1.0 \mu m$ σε σκληρούς χάλυβες).

Δεδομένου του ότι, η κοπή με laser μπορεί να επιτύχει βάθη κοπής της τάξης των μικρομέτρων, η κατασκευή του καλουπιού εξ' ολοκλήρου με αυτή τη διαδικασία μπορεί να γίνει αρκετά χρονοβόρα. Στην εργασία λοιπόν αυτή εξετάζεται, με μια διαδικασία πειραμάτων, ο τρόπος με τον οποίο μπορεί να κατασκευαστεί μια επιφάνεια με συνδυασμό των δύο κατεργασιών στις δύο εργαλειομηχανές. Ο τρόπος με τον οποίο στην ήδη σχηματισμένη επιφάνεια (από την κατεργασία φραιζαρίσματος), θα επιτευχθεί η αποπεράτωση με laser (αφαιρώντας ένα στρώμα της επιφάνειας λίγων μικρομέτρων), απαιτεί πολύ υψηλή ακρίβεια στο μηδενισμό του τεμαχίου στην εργαλειομηχανή laser engraving, γιατί ο τελευταίος γίνεται με αισθητήρα που ελέγχεται από ενσωματωμένη στη μηχανή κάμερα.

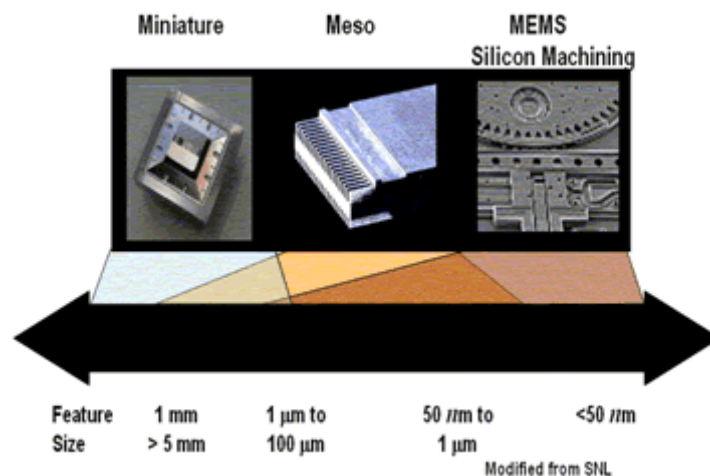
Σε κάθε πείραμα, σχεδιάζεται και κατασκευάζεται ένα καλούπι με την παραπάνω διαδικασία, ξεκινώντας με μια απλή δομή της μορφής του τετραγώνου (πείραμα 1). Στη συνέχεια, κατασκευάζεται μια πιο σύνθετη επιφάνεια ελεύθερης μορφής με καμπύλες (πείραμα 2).

2. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΥΠΑΡΧΟΝΤΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΟΜΗΧΑΝΩΝ ΜΙΚΡΟΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

2.1 Μικροκατεργασίες

Με τον όρο μικροκατεργασίες εννοούμε τις τεχνικές διαμόρφωσης εξαρτημάτων μικροκλίμακας και μεσοκλίμακας με διαστατική και γεωμετρική ακρίβεια της τάξεως του μικρομέτρου (μm) ή και δεκάτων του μικρομέτρου. Τα τελευταία χρόνια αυξάνεται ραγδαία το βιομηχανικό ενδιαφέρον για την παραγωγή προϊόντων σε μικροκλίμακα. Τα προϊόντα αυτά βρίσκουν πληθώρα εφαρμογών στην αεροδιαστημική, αυτοκινητοβιομηχανία, εμβιομηχανική, ηλεκτρονική και οπτική. Παράλληλα με τις παραδοσιακές τεχνικές μικροκατεργασιών με αφαίρεση υλικού (μικροφραιζάρισμα, μικρολείανση, μικροδιάτρηση κλπ.) εισήχθησαν νέες, μη συμβατικές τεχνικές μικροκατεργασιών για την επίτευξη υψηλότερης ακρίβειας παρέχοντας επίσης τη δυνατότητα κατεργασίας μη-μεταλλικών υλικών. Οι τεχνικές αυτές περιλαμβάνουν τις κατεργασίες με χρήση ακτίνων Laser, ηλεκτροδιάβρωσης (EDM), φωτολιθογραφία, μικροκατεργασία μέσω υπερήχων (USM), κλπ.

Οι τεχνολογίες των μικροκατεργασιών συνδέονται στενά με την πρόσφατη εξέλιξη των μικρο-ηλεκτρο-μηχανικών συστημάτων (MEMS- Micro Electro Mechanical Systems). Ωστόσο μεγάλο ενδιαφέρον δίνεται στη διαμόρφωση μηχανικών μικροεξαρτημάτων με πολύπλοκα σχήματα και τρισδιάστατες ανάγλυφες επιφάνειες υψηλής ακρίβειας. Σήμερα τόσο οι μεσοκατεργασίες (1-10 mm) όσο και οι μικροκατεργασίες (1-1000 μm) εμφανίζονται ως μια σημαντική τεχνολογία, ειδικά στις περιοχές όπου η κατασκευή εξαρτημάτων μικροκλίμακας αποφέρει οικονομικά και τεχνικά πλεονεκτήματα. Και οι δύο κατηγορίες των παραπάνω κατεργασιών βρίσκουν εφαρμογή για την παραγωγή προϊόντων από μεταλλικά και μη μεταλλικά υλικά.



Σχήμα 2.1 : Διαστατικές κλίμακες κατεργασιών

Με την έλευση των εργαλειομηχανών ψηφιακού ελέγχου μέσου υπολογιστή (CNC) η ακρίβεια, ομοιομορφία και η επαναληψιμότητα των κατεργασιών μηχανικών εξαρτημάτων έχουν βελτιωθεί και η παραγωγή σύνθετων γεωμετρικά προϊόντων έχει κερδίσει μεγάλη ευελιξία. Από την άλλη πλευρά, η σμίκρυνση των μηχανών και συσκευών οδηγεί στη ζήτηση εξαρτημάτων με διαστάσεις της τάξης των μερικών μικρομέτρων ή μερικών εκατοντάδων

μικρομέτρων. Αυτό δημιουργεί την ανάγκη περαιτέρω βελτίωσης των τεχνικών παραγωγής προϊόντων σε μικροκλίμακα, ακόμη δε και προϊόντων σε νανοκλίμακα όπως NEMS (Nano Electro Mechanical Systems).

Είναι επίσης γεγονός σήμερα ότι η ζήτηση των βιομηχανιών για μικροκατεργασίες διαφόρων τύπων υλικών (μεταλλικά, κεραμικά και πλαστικά) αυξάνεται μέρα με τη μέρα. Εξαρτήματα μινιατούρες έχουν εφαρμογές σε διάφορους βιομηχανικούς κλάδους. Μερικά από τα παραδείγματα των προϊόντων που απαιτούν κατεργασίες μικροκλίμακας είναι πολύ μικρές τρύπες σε οπτικές ίνες, μικροακροφύσια για υψηλές θερμοκρασίες σε αεροσκάφη, κλπ. Οι συμβατικές μέθοδοι κατεργασιών (τόρνευση, φραιζάρισμα, διάτρηση, κλπ) με τις τροποποιημένες εκδόσεις τους έχουν χρησιμοποιηθεί για μικροκατεργασίες διαφόρων τύπων υλικών. Όμως οι συνθήκες κατεργασίας για τη διαμόρφωση ενός μικροεξαρτήματος με αφαίρεση υλικού περιορίζονται καθώς λαμβάνουν χώρα φαινόμενα σε ατομική κλίμακα. Το βάθος της κοπής είναι της τάξης των νανομέτρων (10^{-9}m).

Στην περίπτωση των προηγμένων μηχανουργικών κατεργασιών με την αφαίρεση υλικού σε μικροκλίμακα, είτε με μηχανικά μέσα (USM, AJM, MAF), είτε μέσω θερμικής διάβρωσης (EBM, LBM) ή ανοδικής διάλυσης (ECM), είτε μέσω χημικής αντίδρασης ή συνδυασμό δύο ή περισσότερων από τις παραπάνω κατεργασίες (υβριδικές μέθοδοι), οι μικροκατεργασίες μπορούν να ενταχθούν στην ομάδα των κατεργασιών πολύ υψηλής ακρίβειας (ultraprecision machining). Περαιτέρω οι μικροκατεργασίες μπορούν να διαιρεθούν σε δύο κατηγορίες, τις επιφανειακές μικροκατεργασίες (surface μ-machining), όταν η αφαίρεση του υλικού γίνεται για την επιφανειακή βελτίωση του εξαρτήματος σε κλίμακα κάτω του μικρομέτρου και μικροκατεργασίες διαμόρφωσης στερεάς γεωμετρίας κάποιου εξαρτήματος (bulk μ-machining), όπου συγκριτικά αφαιρείται μεγάλη ποσότητα υλικού.

Παρακάτω απαριθμούνται όλες οι μέθοδοι και τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για τη διαμόρφωση προϊόντων σε μικροκλίμακα

• Συμβατικές Μικροκατεργασίες

- a) Micromilling
- b) Microturning
- c) Microgrinding

• Προηγμένες Μίκρο – Νάνο-Κατεργασίες

- a) Abrasive Micromachining
- b) Diamond Microgrinding / Microturning
- c) Ultrasonic Micromachining
- d) Electro discharge Micromachining
- e) Laser beam Micromachining
- f) Electrochemical and Chemical Micromachining

g) Ion Beam Machining

h) Photochemical Etching

• **Μίκρο – Νάνο κατεργασίες αποπεράτωσης**

a) Abrasive Flow Finishing

b) Magnetic Abrasive Finishing

c) Magnetorheological Abrasive Flow Finishing

d) Magnetic Float Polishing

e) Magnetorheological finishing

• **Μικροδιαμορφωτικές κατεργασίες**

a) Micro/Nano-Embossing(Hot and UV embossing)

b) Micro-Injection Moulding

c) Micro-Bulk Forming

d) Micro-Sheet Forming

e) Micro-Hydroforming

f) Micro-Laser Forming

• **Μικροκατεργασίες σύνδεσης**

a) Laser Beam Microwelding / Microjoining

b) Electron Beam Microwelding / Microjoining

c) Microsoldering

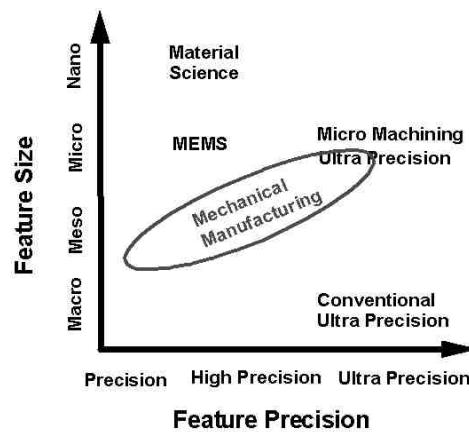
• **Μικρο-χύτευση**

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των διάφορων τεχνικών που χρησιμοποιούνται στις μικροκατεργασίες. Επίσης καταδεικνύεται το ελάχιστο διαστατικό μέγεθος για το οποίο είναι κατάλληλη η καθεμία τεχνική

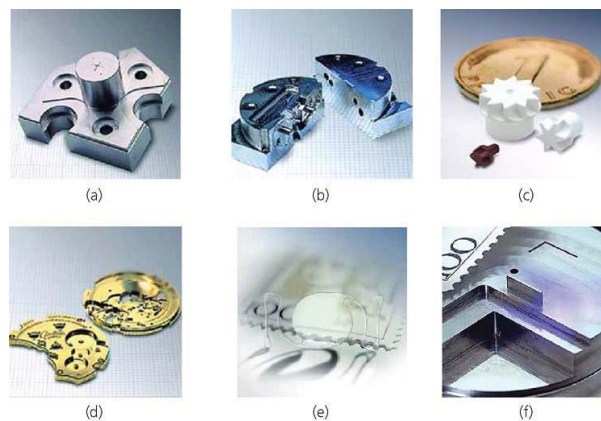
Process	Principle	Minimum Feature Size		Advantages	Disadvantages
μ -Molding & Casting	Solidification	500 μm	0.019"	Mass-production	Spring-back
μ -Punching	Plastic deformation	50 μm	0.0019"	Mass-production	Need uniform clearance
μ -Milling & Grinding	Force	25 μm	0.00098"	Good geometric accuracy Good surface finish	Tool deflection/ damage due to the cutting forces
Stereo-Lithography	Lamination	12 μm	0.00047"	Complex 3D shape	Limited work materials
Excimer Laser	Ablation	10 μm	0.00039"	No heat damage on surfaces	Limited work material
μ -EDM & Laser	Melting ~ Vaporization	5 μm	0.00019"	Negligible force	Possible Surface damage and low MRR
FIB	Sputtering	0.2 μm	0.0000080"	Stress-free	Low MRR

Table 1
Micro Machining Process Evaluation

Πίνακας 2.1 : Σύγκριση τεχνολογιών μικροκατεργασιών



Σχήμα 2.2 : Μικροκατεργασίες και επιτυγχανόμενη ακρίβεια



Σχήμα 2.3 : Προϊόντα μικροκατεργασιών με αφαίρεση υλικού

2.2 Τεχνολογικά στοιχεία εργαλειομηχανών που χρησιμοποιούνται σε μικροκατεργασίες

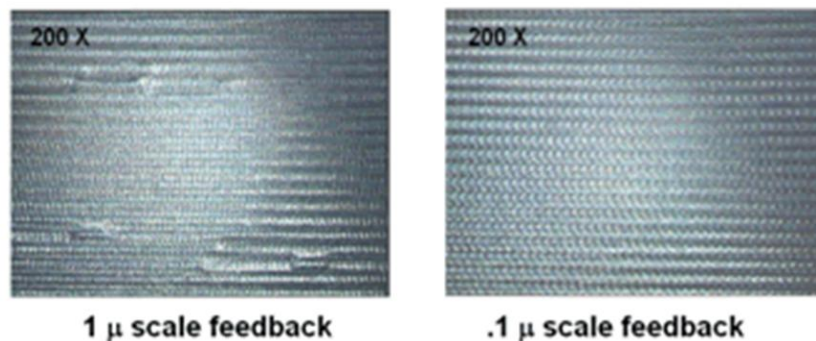
Η διατήρηση του ελέγχου του συνόλου των συνθηκών που επηρεάζουν τη μικροκατεργασία, συμπεριλαμβανομένης της εργαλειομηχανής, των τεχνολογικών παραμέτρων κοπής, των εργαλείων και του περιβάλλοντος, είναι αρκετά δύσκολη υπόθεση καθώς τα παραπάνω έχουν τεράστια αθροιστική επίδραση στο τελικό αποτέλεσμα της κατεργασίας.

Σε τέτοιες μικρές διαστάσεις τεμαχίων η ακρίβεια κατεργασίας παίρνει μια εντελώς νέα έννοια. Για παράδειγμα, μία ανοχή της τάξεως των $\pm 5 \mu\text{m}$ είναι πολύ διαφορετική, αν η διάσταση του προϊόντος που πρόκειται να κατασκευαστεί είναι 5mm έναντι μόνο 0,05mm. Για το λόγο αυτό, καθίσταται αναγκαία η εκ νέου αντίληψη της έννοιας της ακρίβειας. Υπάρχουν αρκετά στοιχεία ενδιαφέροντος που πρέπει να σκεφθούμε, όταν τα μιλάμε για κατεργασίες αυτής της κλίμακας. Όπως για παράδειγμα:

1. Περιβαλλοντικές αλλαγές που έχουν άμεσο αντίκτυπο στην επιτυγχανόμενη ακρίβεια
2. Επαναληψιμότητα και προβλεψιμότητα της κατεργασίας
3. Ταλαντωτικές διεγέρσεις (εσωτερικές ή εξωτερικές)
4. Διαχείριση του τεμαχίου σε όλες τις φάσεις κατεργασίας
5. Υγρά κοπής και ρευστομηχανική των υγρών κοπής

Η διαστατική ανάλυση (resolution) του ελέγχου των κινήσεων του εργαλείου, η μορφή και οι ιδιότητες των εργαλείων, καθώς και όλα τα βοηθητικά εξαρτήματα της εργαλειομηχανής που λαμβάνουν μέρος στην μικροκατεργασία αποκτούν ιδιαίτερη σημασία σε παραγωγή προϊόντων σε μικροκλίμακα.

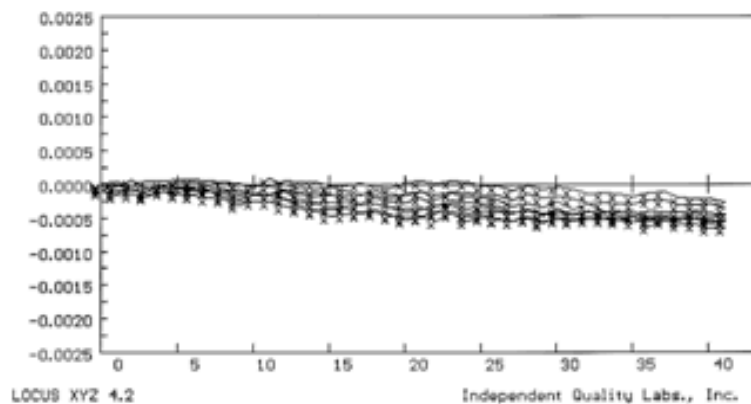
Μολονότι η ακρίβεια των συστημάτων ελέγχου θέσης στις σύγχρονες CNC εργαλειομηχανές έχουν βελτιωθεί πολύ τα τελευταία χρόνια και ως τούτου περιορίζονται φαινόμενα μικροολίσθησης των σερβοκινητήρων, εν τούτοις υπάρχει ανάγκη περαιτέρω βελτίωσης του ελέγχου κίνησης των εργαλείων. Η εικόνα παρακάτω δείχνει τη διαφορά λόγω μικροολίσθησης του σερβοκινητήρα σε δύο περιπτώσεις με κανονική (1 μm) και υψηλή (0,1 μm) ανάλυση του συστήματος ελέγχου θέσης με ανάδραση (feedback resolution).



Σχήμα 2.4 : Διαφορά στην ποιότητα κατεργασίας λόγω διαφορετικής ανάλυσης του συστήματος ελέγχου θέσης σε μικροκοπή

Γενικά στις μικροκατεργασίες η ανάλυση των συστημάτων ελέγχου θέσης των κινήσεων του εργαλείου ή της τράπεζας κατεργασίας πρέπει να κυμαίνεται στην τάξη των δεκάτων του μικρομέτρου (μm). Ένας χρυσός κανόνας που ισχύει για την ακρίβεια της εργαλειομηχανής που θα χρησιμοποιηθεί σε μικροκατεργασίες είναι να είναι αυτή δέκα φορές καλύτερη από την επιθυμητή ακρίβεια που θέλουμε να πετύχουμε. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι αν θέλουμε να κατεργασθούμε ένα τεμάχιο με ανοχή $5\mu\text{m}$ το σύστημα κατεργασίας θα πρέπει να διασφαλίζει ακρίβεια $0,5\mu\text{m}$. Σήμερα οι εργαλειομηχανές που προορίζονται για μικροκατεργασίες προσφέρουν έλεγχο κινήσεων (feedback resolution) της τάξεως των 10-50 νανομέτρων. Παρ' όλα αυτά η τεχνική αυτή προδιαγραφή από μόνη της δεν μπορεί να εξασφαλίσει το τελικό αποτέλεσμα της μικροκοπής.

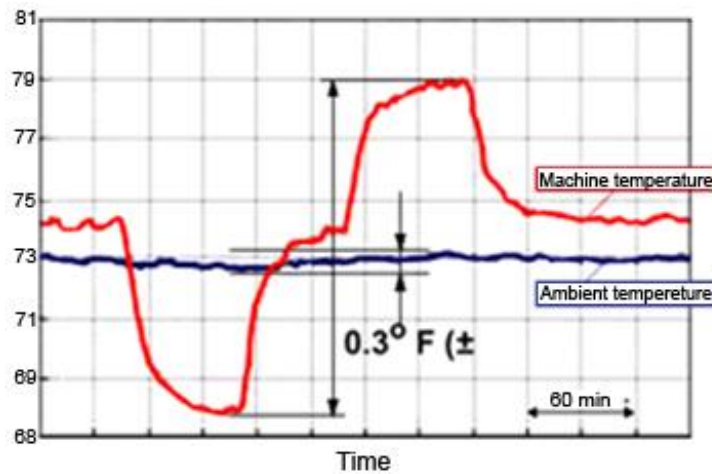
Η πραγματική ακρίβεια θέσης κατά την κίνηση των αξόνων εξαρτάται από τον αριθμό των εμπλεκόμενων ταυτοχρόνως αξόνων καθώς επίσης και από την καθετότητα, παραλληλότητα και ευθυγραμμότητα των αξόνων. Η παρακάτω εικόνα δείχνει την ογκομετρική ακρίβεια αφαίρεσης υλικού σε ένα κέντρο μικροκατεργασιών.



Σχήμα 2.5 : Ακρίβεια αφαίρεσης όγκου υλικού σε κάθετο κέντρο μικροκατεργασιών

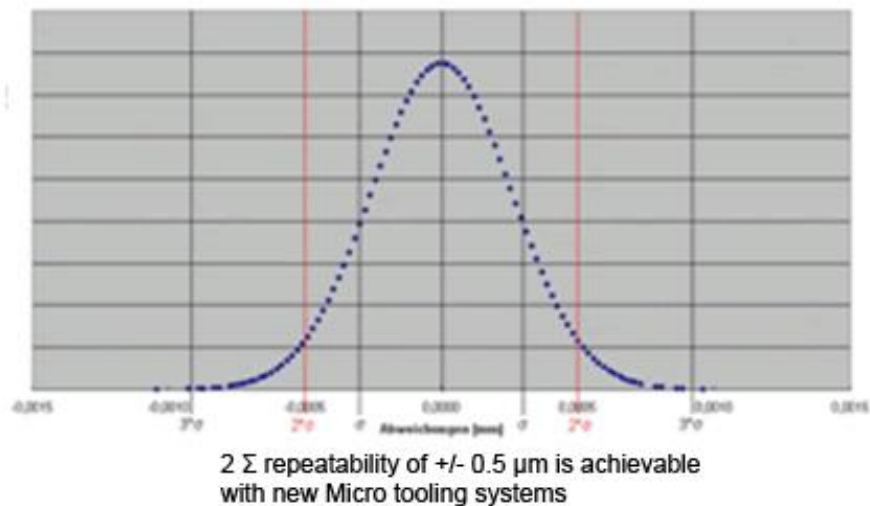
Είναι γνωστό ότι οι περιβαλλοντικές συνθήκες του χώρου εργασίας αλλάζουν κατά τη διάρκεια της ημέρας. Ακόμη και ένας βαθμός αλλαγής της θερμοκρασίας επηρεάζει την ακρίβεια της εργαλειομηχανής σε μικροκατεργασίες της τάξεως των δεκάτων του μικρομέτρου. Σε πολλές περιπτώσεις ακόμη και έλεγχος της θερμοκρασίας του χώρου δεν είναι αρκετός αφού διαστατικές αλλαγές που προκαλούνται από θερμοκρασιακές μεταβολές σχετίζονται και με τη μάζα των δομικών στοιχείων της εργαλειομηχανής. Έτσι η απαγωγή θερμότητας ποικίλει από εργαλειομηχανή σε εργαλειομηχανή βάσει της μάζας του συστήματος. Για το λόγο αυτό σύγχρονες εργαλειομηχανές μικροκατεργασιών εξαιρετικής ακρίβειας ενσωματώνουν ειδικούς θαλάμους για την επίτευξη ελεγχόμενων περιβαλλοντικών συνθηκών.

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η θερμική σταθερότητα της εργαλειομηχανής που επιτυγχάνεται μέσω ενός κατάλληλου θερμομονωμένου θαλάμου σε σύγκριση με θερμοκρασιακές μεταβολές του περιβάλλοντος χώρου. Τόσο η θερμοκρασία του αέρα όσο και η ροή του αέρα ελέγχονται για να διατηρούνται σταθερές οι συνθήκες στο χώρο της κατεργασίας. Για το λόγο αυτό τοποθετούνται ειδικοί θερμικοί ανιχνευτές στα δομικά στοιχεία της μηχανής και παρακολουθούνται οι συνθήκες σε πραγματικό χρόνο.

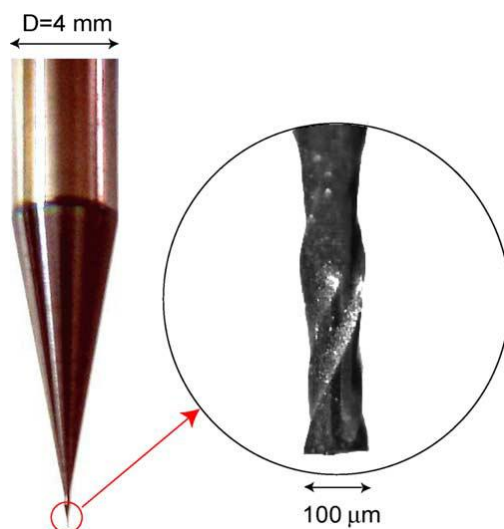


Σχήμα 2.6 : Διατήρηση σταθερής θερμοκρασίας στο χώρο της κατεργασίας μέσω ειδικού θαλάμου

Ένας άλλος παράγοντας που λαμβάνεται σοβαρά υπόψη στις εργαλειομηχανές μικροκατεργασιών είναι η ακρίβεια των συστημάτων πρόσδεσης των εργαλείων. Στο τομέα αυτό έγιναν σημαντικά βήματα έτσι ώστε σήμερα να είναι διαθέσιμα ειδικά συστήματα πρόσδεσης μικροεργαλείων που διασφαλίζουν υψηλή επαναληψιμότητα και ακρίβεια τοποθέτησης της τάξεως των δεκάτων του μικρομέτρου. Η παρακάτω εικόνα (σχήμα 2.7) παρουσιάζει την κατανομή της ακρίβειας πρόσδεσης ενός εργαλείου σε εργαλειομηχανή υψηλή ακρίβειας όπου η επαναληψιμότητα εμφανίζει απόκλιση $\pm 0,5 \mu\text{m}$. Τα σύγχρονα συστήματα πρόσδεσης μικροεργαλείων είναι δύο φορές πιο ακριβή από ότι στο παρελθόν.



Σχήμα 2.7 : Κατανομή της ακρίβειας πρόσδεσης του εργαλείου



Σχήμα 2.8 : Εργαλείο φραιζαρίσματος μικροκοπής από καρβίδιο του βολφραμίου με δύο κοπείς

Το μεγάλο πρόβλημα που δημιουργείται στις μικροκατεργασίες είναι οι δυνάμεις κοπής που καταπονούν το εργαλείο και οδηγούν σε κάμψη του εργαλείου με αποτέλεσμα να κινδυνεύει αυτό να σπάσει.

Η άτρακτος του εργαλείου πρέπει να είναι όσο το δυνατό πιο στιβαρή και από την άλλη πλευρά να εμφανίζει μηδενικές θερμικές διαστολές. Επίσης πρέπει να εμφανίζει κατάλληλη απόσβεση των ταλαντώσεων στη θέση κοπής και σε συνεργασία με το σύστημα συγκράτησης του εργαλείου να μην επιτρέπει καμία εκκεντρότητα.

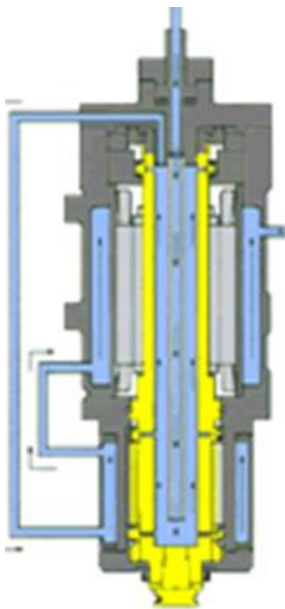


Σχήμα 2.9 : Κοπτικά εργαλεία μικροκατεργασιών (λήψη ηλεκτρονικού μικροσκοπίου)

Ένα από τα βασικά προβλήματα που εμφανίζονται στο μικροφραιζάρισμα λόγω του υψηλού σχετικά ρυθμού αφαίρεσης υλικού είναι οι δυνάμεις κοπής. Μία λύση που υιοθετήθηκε πριν από μερικά χρόνια είναι η χρήση ενσωματωμένου συγκρατητή εργαλείου στην άτρακτο του εργαλείου. Με αυτό τον τρόπο εξαλείφεται η εκκεντρότητα από τη πρόσθετη χρήση εργαλειοδέτη. Σε κάθε περίπτωση είτε χρησιμοποιείται άτρακτος με ενσωματωμένο εργαλειοδέτη είτε όχι, η άτρακτος πρέπει να είναι αρκούντως στιβαρή για την απόσβεση ταλαντώσεων και να ελαχιστοποιεί την θερμική της διαστολή. Στο σχήμα παρακάτω εμφανίζεται μία υψηλόστροφη άτρακτος εργαλειομηχανής μικροφραιζαρίσματος με ενσωματωμένο σύστημα ψύξης.

Η ψύξη και λίπανση της ατράκτου περιορίζει άμεσα τη θερμική διαστολή της κατά τη διάρκεια της κατεργασίας. Η από μέσα προς τα έξω μέσω ειδικά διαμορφωμένων καναλιών ροή του ψυκτικού μέσου προσδίδει την απαραίτητη ψύξη του πυρήνα της ατράκτου και ταυτόχρονα εξασφαλίζεται ομαλή ροή λόγω της φυγόκεντρης δύναμης που δρα στο ψυκτικό μέσο.

Το μέγεθος και η ποιότητα των προϊόντων μικροκλίμακας εξαρτάται από τις ιδιότητες των εργαλειομηχανών που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή τους, συμπεριλαμβανομένης της συνολικής τους ακρίβειας και της δυναμικής τους συμπεριφοράς. Οι δυνατότητες και η ποιότητα των εργαλειομηχανών είναι ζωτικής σημασίας για τις απαιτήσεις της κατεργασίας, που είναι το μέγεθος του κατεργαζόμενου τεμαχίου, η ακρίβεια, η τραχύτητα της επιφάνειας και η διαστατική επαναληψιμότητα.



Σχήμα 2.10 : Άτρακτος μικροεργαλειομηχανής για μικροκατεργασία

Τα τρία κύρια συστήματα των εργαλειομηχανών ακριβείας είναι η άτρακτος, η τράπεζα ακριβείας και η ηλεκτρονική μονάδα κεντρικού ελέγχου της εργαλειομηχανής. Στις μικροκατεργασίες, η ταχύτητα περιστροφής της ατράκτου πρέπει να είναι πολύ υψηλή για τη διατήρηση της παραγωγικότητας σε αποδεκτά επίπεδα, καθώς η μικρή διάμετρος του εργαλείου μειώνει το ρυθμό αφαίρεσης αποβλίπτου. Όταν οι απαιτήσεις ροπής είναι υψηλές, χρησιμοποιούνται ηλεκτροκινητήρες με υβριδικά ρουλεμάν. Αυτό περιορίζει τη μέγιστη ταχύτητα σε περίπου 80.000 rpm δεδομένου ότι λόγω της τριβής στα ρουλεμάν δημιουργείται θερμική διαστολή της ατράκτου. Σε επίπεδο εργαστηρίου, η ταχύτητα της ατράκτου μπορεί να φθάσει τις 500.000 rpm αλλά με χρήση μαγνητικών εδράνων. Όταν απαιτείται ακόμη υψηλότερη ταχύτητα περιστροφής, χρησιμοποιούνται ειδικά έδρανα αέρος, αλλά η ροπή της ατράκτου είναι πολύ χαμηλή. Στην περίπτωση αυτή η άτρακτος υπερβαίνει τις 200.000 rpm. Τέτοιες άτρακτοι είναι διαθέσιμες στο εμπόριο.

Μια υψηλής ακρίβειας τράπεζα έδρασης του κατεργαζόμενου τεμαχίου (XY stage) είναι αναγκαία για την επίτευξη των επιθυμητών αποτελεσμάτων σε μικροκατεργασίες. Επίσης γραμμικοί κινητήρες (Linear Drive) και συστήματα ελέγχου θέσης εξαιρετικής ακρίβειας χρησιμοποιούνται στις εργαλειομηχανές μικροκατεργασιών. Συγκριτικά με τους συμβατικούς μηχανισμούς κίνησης, όπως είναι οι ένσφαιροι κοχλίες κίνησης, οι γραμμικοί κινητήρες δεν έχουν αθροιστικά λάθη από τριβή, από τη σύζευξη με τον κινητήρα, από μείωση ακρίβειας λόγω φθοράς, και κανένα τζόγο. Μπορούν επίσης να προσφέρουν πολύ υψηλές επιταχύνσεις. Η τυπική ακρίβεια για εργαλειομηχανές με γραμμικά συστήματα κίνησης είναι της τάξης του $\pm 1 \mu\text{m}$.

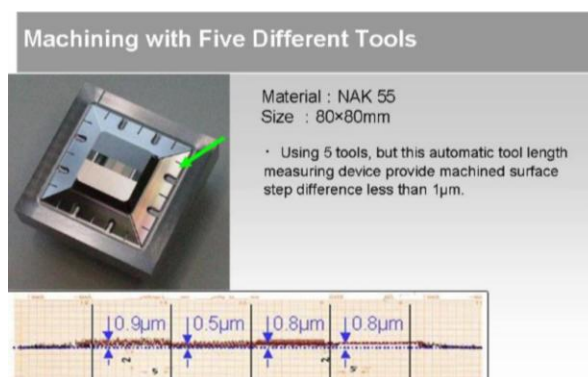


Σχήμα 2.11 : Γραμμικός κινητήρας εργαλειομηχανής μικροφραιζαρίσματος

Οι σύγχρονες εργαλειομηχανές που χρησιμοποιούνται σε μικροκατεργασίες είναι εφοδιασμένες με αυτόματα συστήματα μέτρησης της γεωμετρίας του εργαλείου. Τα συνηθέστερα είναι τύπου Laser , αλλά στη χρήση τους σε εργαλεία πολύ μικρής διαμέτρου φθάνουν στα όριά τους.



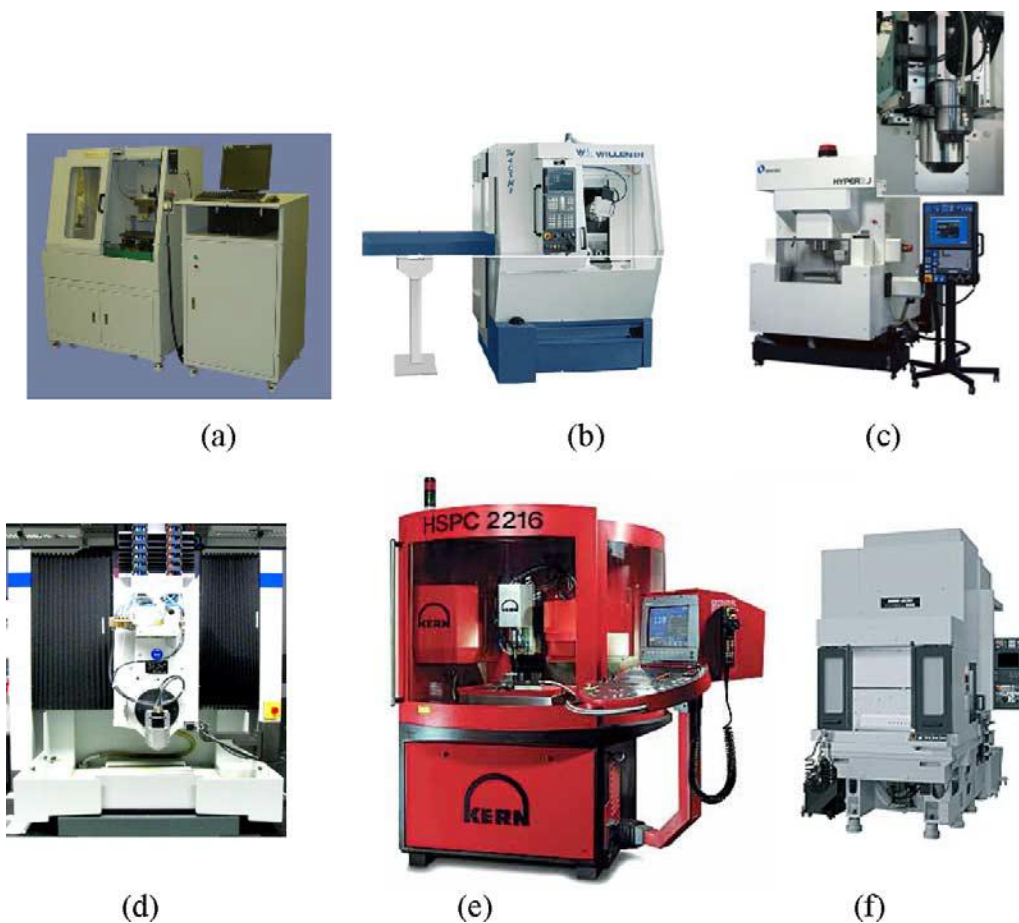
Σχήμα 2.12 : Σύστημα μέτρησης εργαλείου με Laser



Σχήμα 2.13 : Μικροκατεργασία τεμαχίου

Τελευταία εξελίχθηκαν κατάλληλα υβριδικά συστήματα μέτρησης του εργαλείου (ATLM) τόσο μέσω επαφής όσο και χωρίς επαφή, τα οποία εξασφαλίζουν άριστα αποτελέσματα χωρίς να επηρεάζονται από τη θερμική διαστολή της ατράκτου. Η παραπάνω εικόνα δείχνει την ακρίβεια κατεργασίας στη διάρκεια τεσσάρων ωρών και μάλιστα μετά από 5 διαδοχικές αλλαγές εργαλείου

Οι υψηλής ακρίβειας εργαλειομηχανές που προορίζονται για μικροκατεργασίες έχουν σημαντικά πλεονεκτήματα όπως υψηλή στιβαρότητα, μεγάλη απόσβεση και ακριβή καθοδήγηση μέσω της χρήσης αισθητήρων ακρίβειας και ενεργοποιητών. Από την άλλη πλευρά η υιοθέτηση τεχνολογιών που εξασφαλίζουν υψηλή ακρίβεια κατεργασίας μπορεί να προσθέσει πολύ υψηλό κόστος για την κατασκευή προϊόντων μικροκλίμακας. Τα πλέον ενδεικτικά παραδείγματα των διαθέσιμων στο εμπόριο κέντρων ακρίβειας για μικροκατεργασίες απεικονίζονται στην παρακάτω εικόνα.



Σχήμα 2.14 : Διάφοροι τύποι εμπορικών εργαλειομηχανών υψηλής ακρίβειας κατάλληλων για μικροκατεργασίες: (a) DT-110 της εταιρείας Mikrottools; (b) W-408MT της εταιρείας Willemin, (c) Hyper2j της εταιρείας Makino; (d) MikroGantry της εταιρείας Kugler; (f) HSPC 2216 της εταιρείας Kern; (f) της εταιρείας MoriSeiki

Για την επίτευξη υψηλού μέτρου απόσβεσης και την απορρόφηση των ταλαντωτικών διεγέρσεων κατά την κατεργασία τα δομικά μέρη των εργαλειομηχανών υψηλής ακρίβειας κατασκευάζονται από συνθετικό μπετόν που περιέχει πολυμερικές ρητίνες.



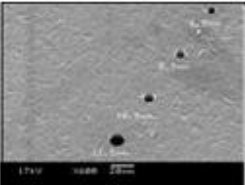
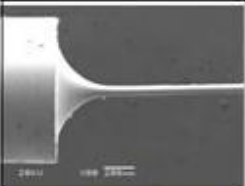
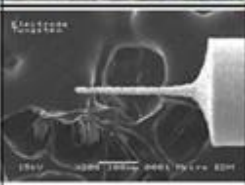
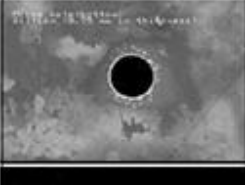
Σχήμα 2.15 : Βελτίωση της απόσβεσης εργαλειομηχανής υψηλής ακρίβειας με χρήση πολυμερούς μπετόν

2.3 Τεχνική έκθεση εργαλειομηχανών και σύγκριση μεταξύ τους

2.3.1 DT-110 της εταιρίας Mikrotools:

Ανήκει στην κατηγορία των μηχανών που μπορούν να εκτελέσουν πολλαπλές διεργασίες – υβριδικές μικροκατεργασίες. (hybrid micro machining : υβριδικές κατεργασίες με υψηλή ακρίβεια για την παραγωγή προϊόντων με πολύπλοκη γεωμετρία. Είναι ένας συνδυασμός μικροκατεργασιών φραιζαρίσματος ή λείανσης και κατεργασιών με χρήση laser, οι οποίες βελτιώνουν σημαντικά την ακρίβεια και την απόδοση της κατεργασίας κατά την παραγωγή 3D μικροκατασκευών). Οι μικροκατεργασίες που μπορεί να εκτελέσει η μηχανή είναι οι εξής (σχήμα 2.16) :

- Micro milling (φραιζάρισμα)
- Micro turning (τόρνευση)
- Micro EDM (Electrical discharge milling - φραιζάρισμα με ηλεκτροδιάβρωση : κατεργασία ακριβείας που επιτυγχάνει τη δημιουργία μικροδομών εξαιρετικής ποιότητας από οποιοδήποτε αγωγίμο υλικό. Το υλικό του τεμαχίου διαβρώνεται από μια σειρά σπινθήρων που προέρχονται από ηλεκτρόδιο εμβαπτισμένο σε διηλεκτρικό υγρό)
- Micro wire EDM (κοπή μετάλλου με ειδικό μεταλλικό προγραμματιζόμενο ηλεκτρόδιο)
- Micro wire EDG (Electrical discharge grinding – λείανση με ηλεκτροδιάβρωση)
- Micro grinding (λείανση)

	Micro EDM οπές διαμέτρου μέχρι και 6.5 μm και λόγος διαστάσεως 7.5
	Micro turning άξονες διαμέτρου 30 μm με λόγο διαστάσεων μέχρι και 200
	Micro milling πτερύγια 70 μm
	Micro milling εγκοπές 100μm
 	Micro EDM άξονες 30 μm οπές 50 μm
	Micro - Wire cut EDM εγκοπες πάχους 50 μm
	Υβριδικές μικροκατεργασίες δυνατότητα κατεργασίας "δύσκολων" υλικών όπως γυαλί

Σχήμα 2.16 : Μικροκατεργασίες που μπορεί να εκτελέσει η μηχανή

Η DT-110 καλύπτει τις απαιτήσεις για την κατασκευή εξαρτημάτων αρκετών διαφορετικών εφαρμογών όπως οπτικές ίνες, ιατρικά εμφυτεύματα, καλούπια, εξαρτήματα αεροδυναμικής, ρομποτικής, μικρο-ηλεκτρονικής, μικρο-μηχανικής.

Τα κύρια πλεονεκτήματα της μηχανής αυτής είναι η δυνατότητα εκτέλεσης πολλών κατεργασιών σε μια μηχανή, η δυνατότητα κατασκευής των ηλεκτροδίων της κατεργασίας EDM από την ίδια τη μηχανή, η ύπαρξη συστήματος ελέγχου της φθοράς του εργαλείου κατά τη διάρκεια της κατεργασίας EDM.



Σχήμα 2.17 : Εργαλειομηχανή και τράπεζα εργασίας DT-110 της εταιρίας Mikrottools

ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ		
Άξονες	Άξονας x	200mm
	Άξονας y	100mm
	Άξονας z	100mm
Τράπεζα	τράπεζα εργασίας	350x200mm
	διαμόρφωση t-slot	6mmx7x25mm
Άτρακτος	άτρακτος AC σερβοκινητήρα	100W(1 έως 5.000 rpm)
	άτρακτος υψηλής ταχύτητας	10.000 έως 60.000 rpm
	πνευματική άτρακτος	20.000 έως 200.000 rpm
Ενεργειακές απαιτήσεις	παροχή ηλεκτρικής ισχύος	230v, 50/60Hz
	πνευματική παροχή	6 έως 7kg/sq.cm
Μέγεθος μηχανής	ύψος	1900mm
	εσωτερικός χώρος	1.5x1.1m
Ακρίβεια μηχανής	ανάλυση	100nm
	ακρίβεια	± 1μm
	επαναληψιμότητα	1μm για όλους τους άξονες
Στάνταρ εξολισμός	tank για όλες τις κατεργασίες	
Επιπλέον εξαρτήματα	σύρμα EDM	
	σύρμα EDC	
	ενσωματωμένη CCD based camera	
	ενσωματωμένος αισθητήρας αφής	

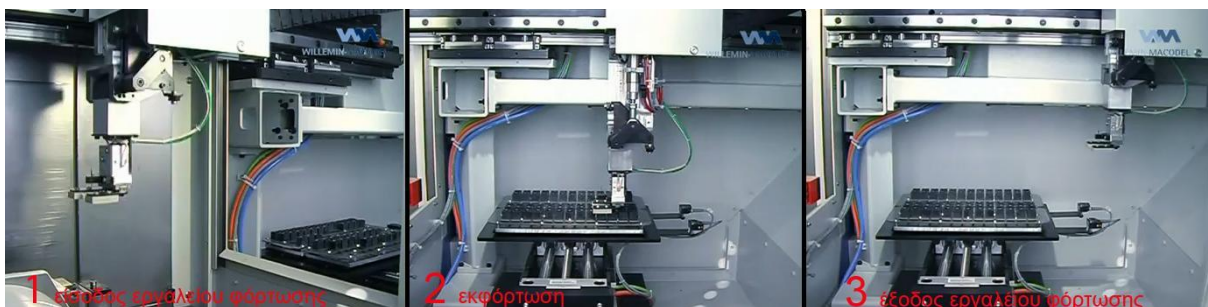
Πίνακας 2.2 : Προδιαγραφές εργαλειομηχανής DT-110 της εταιρίας Mikrottools

2.3.2 W-408 της εταιρίας Willemín

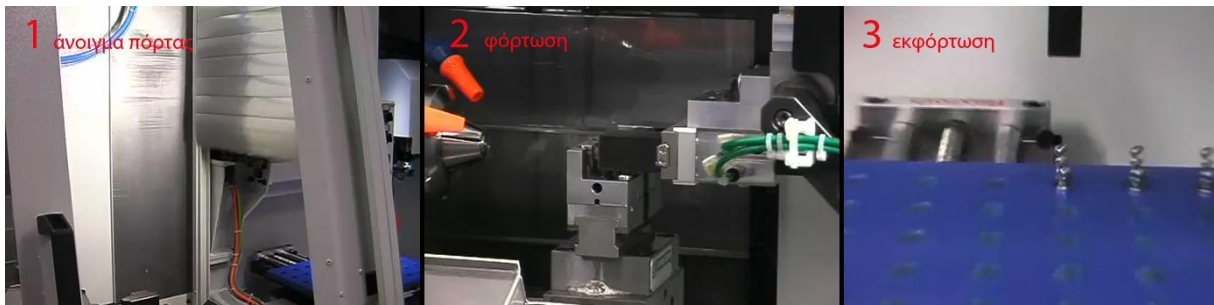
Πρόκειται για ένα κέντρο κατεργασίας CNC περιστρεφόμενου άξονα για φραιζάρισμα και τórνευση. Υπάρχει δυνατότητα κίνησης σε 5 άξονες ταυτόχρονα και δυνατότητα για επεξεργασία μεταλλικών ράβδων (bar stock) διαμέτρου μέχρι 36mm. Επίσης, οι αυτόματες back working devices, με σύσφιξη από μέγγενη αυτόματου κεντραρίσματος ή με τσοκ, εξασφαλίζουν μια ευελιξία κατά την διάρκεια της κατεργασίας. Παράλληλα υπάρχουν δύο συστήματα. Ένα που τροφοδοτεί τη μηχανή με το αντικείμενο προς κατεργασία (μεταλλικές ράβδοι) και ένα που εκφορτώνει και αποθηκεύει τα έτοιμα τεμάχια. Έτσι, η μηχανή αυτή λειτουργεί σαν μια μικρή γραμμή παραγωγής.



Σχήμα 2.18 : Σύστημα τροφοδότησης της μηχανής με μεταλλικές ράβδους (bar feeder)



Σχήμα 2.19 : Εργαλείο συστήματος εκφόρτωσης και αποθήκευσης κατεργασμένων τεμαχίων (part unloading and conditioning)



Σχήμα 2.20 : διαδικασία εκφόρτωσης και αποθήκευσης κατεργασμένου τεμαχίου (οδοντικό εμφύτευμα - γέφυρα)



ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ:

Η W-408 καλύπτει τις απαιτήσεις για την κατασκευή εξαρτημάτων αρκετών διαφορετικών εφαρμογών όπως:

- ηλεκτρονικά εξαρτήματα
- οδοντικά εμφυτεύματα
- κοσμήματα
- ρολόγια
- μηχανικά εξαρτήματα

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ:

Τα βασικά πλεονεκτήματα της μηχανής είναι η δυνατότητα κατασκευής σύνθετων βιομηχανικών καλουπιών με συγκεκριμένη στρατηγική κατεργασίας (υψηλή ταχύτητα στην άτρακτο άρα εξοικονόμηση χρόνου και κόστους), η παροχή υψηλής ακρίβειας σε κατεργασία κομματιών πολύ μικρού μεγέθους και η ευελιξία που επιτυγχάνεται στην παραγωγική διαδικασία λόγω των αυτόματων συστημάτων τροφοδότησης πρώτης ύλης (bar feeders) και εκφόρτωσης/αποθήκευσης κατεργασμένου τεμαχίου.

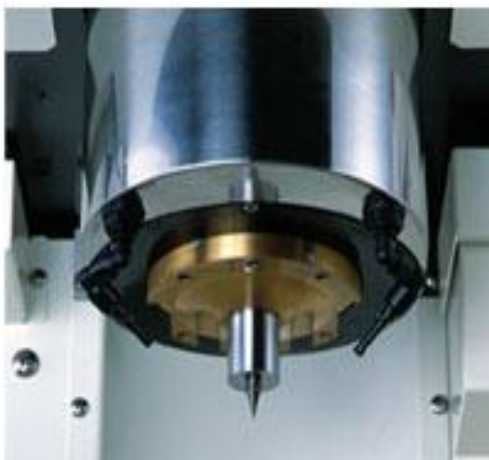
Σχήμα2.21 : Εφαρμογές

ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ		
Άξονες	διαμήκης άξονας x εγκάρσιος άξονας y κάθετος άξονας z	250mm 200mm 300mm
περιστρ. Άξονες (4ος,5ος)	B άξονας	κίνηση : 360° ταχ. Περιστροφής : 20 rpm
	A άξονας	κίνηση : 360° ταχ. Περ. για φραιζάρισμα: 100 rpm ταχ. Περ. για τόννευση: 6.000 rpm μέγιστη διάμετρος ράβδου: 32 mm
Άτρακτος	taper ταχύτητα περιστροφής ισχύς	E40 HSK 30.000 rpm S1:10/13 KW
χώρος αποθήκευσης εργαλειών	στάνταρ στο δίσκο	24 θέσεις
CNC σύστημα ελέγχου	Fanuc 31i - AS	

Πίνακας 2.3 : Προδιαγραφές εργαλειομηχανής W-408 της εταιρίας Willemijn

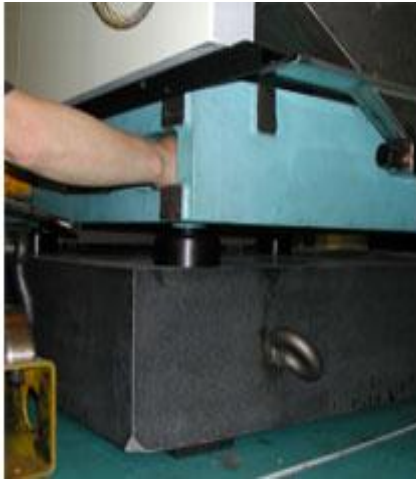
2.3.3 Hyper 2J της εταιρίας Makino

Η Hyper 2J είναι ένα κέντρο κατεργασίας υψηλών ταχυτήτων 3 αξόνων με κάθετη φραιζα.



Η άτρακτος της εργαλειομηχανής έχει ειδικό σύστημα σύσφιξης που κρατάει το εργαλείο σε ευθεία διεύθυνση έτσι ώστε να ελαχιστοποιούνται οι επιδράσεις της παραμόρφωσης λόγω περιστροφής που προκαλούνται από υψηλές ταχύτητες περιστροφής όταν χρησιμοποιείται συγκρατητής εργαλείου ή τσοκ. Με αυτό τον τρόπο διαμορφώνεται η τελική επιφάνεια με αρκετά βελτιωμένο φινίρισμα ενώ παράλληλα παρατείνεται η διάρκεια ζωής του εργαλείου σε όλο το εύρος στροφών (από χαμηλές σε υψηλές ταχύτητες λειτουργίας

Σχήμα 2.22 : Άτρακτος

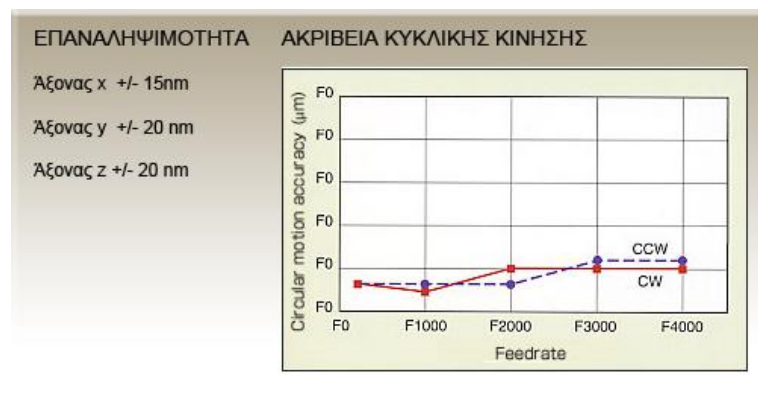


Οι άξονες έχουν γωνιακούς οδηγούς με φινίρισμα ακριβείας οι οποίοι έχουν έξι restrained faces που σε συνδυασμό με την υψηλή ακαμψία της μηχανής εξασφαλίζουν την υψηλή ακρίβεια στην κατεργασία. Επίσης, το σύστημα είναι κατασκευασμένο με τέτοιο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιούνται οι επιδράσεις της θερμότητας που παράγεται από τους κινητήρες(feed motors) και κοχλίες πρόωσης(feed screws) σε κάθε άξονα. Η μηχανή παρέχει ακρίβεια μικρότερη του μικρόμετρου(sub-micron accuracy). Η βάση από γρανίτη που βρίσκεται στο κάτω μέρος της μηχανής ελαχιστοποιεί τις επιδράσεις στην κατεργασία από τις δονήσεις του δαπέδου και από θερμοκρασιακές μεταβολές.

Σχήμα 2.23 : Βάση από γρανίτη



Σχήμα 2.24 : Hyper 2J της εταιρίας Makino



Σχήμα 2.25 : επαναληψιμότητα (F100) και ακρίβεια κυκλικής κίνησης της εργαλειομηχανής

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ:

Η Hyper 2j καλύπτει τις απαιτήσεις για την κατασκευή εξαρτημάτων αρκετών διαφορετικών εφαρμογών όπως: ιατρικά όργανα, προϊόντα βιοτεχνολογίας, οθόνες υγρών κρυστάλλων και ασφαιρικούς φακούς (φακοί των οποίων το επιφανειακό προφίλ δεν είναι τμήμα από σφαίρα ή κύλινδρο)



ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ:

Η μηχανή είναι κατασκευασμένη με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε ο χειριστής να έχει πρόσβαση στην άτρακτο, στην τράπεζα και το κατεργαζόμενο τεμάχιο από τρεις πλευρές, ώστε να διευκολύνεται η οπτική επαφή και η δυνατότητα για άμεση επέμβασή του.

Η μηχανή εξασφαλίζει ακρίβεια μικρότερη του μικρομέτρου (sub-micrometer accuracy).

Σχήμα 2.26 : Πρόσβαση χειριστή από 3 πλευρές

ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ		
Άξονες	διαμήκης άξονας x εγκάρσιος άξονας y κάθετος άξονας z	200mm 150mm 150mm
Τράπεζα εργασίας	μέγεθος μέγιστο επιτρεπόμενο βάρος	300mm x 200mm 40 kg.
Άτρακτος	εύρος ταχυτήτων	3.000 έως 40.000 /min
Εύρος ρυθμού τροφοδοσίας κοπής	0,1 έως 12.000 mm/min	

Πίνακας 2.4 : Προδιαγραφές εργαλειομηχανής Hyper 2J της εταιρίας Makino

2.3.4 Microgantry της εταιρίας Kugler

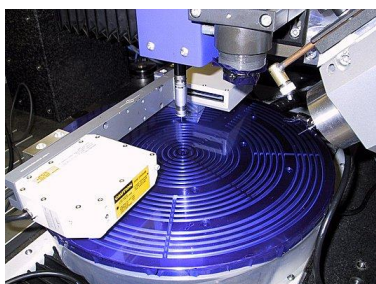
Η Microgantry είναι μια σειρά από μοντέλα εργαλειομηχανών μικροκατεργασίας 3 έως 5 αξόνων της Γερμανικής εταιρίας Kugler. Τα μοντέλα είναι τα Microgantry nano 3/5x και Microgantry micro 3/5x. Οι κατεργασίες που μπορούν να εκτελέσουν είναι φραιζάρισμα, διάτρηση και κοπή με laser. Έχουν τη δυνατότητα να επεξεργαστούν αρκετά μικρές δομές κατ' ευθείαν από το 3D μοντέλο (σύστημα CAD/CAM). Εκτός από το σύστημα CAD/CAM υπάρχει και σύστημα μέτρησης πάνω στη μηχανή καθώς και συμμετρική βαθμονόμηση των αξόνων που εξασφαλίζει την ακρίβεια στην κατεργασία. Έτσι επιτυγχάνεται τελική ακρίβεια μικρότερη του μικρομέτρου (sub-micron accuracy). Μπορούν να εκτελεστούν υβριδικές κατεργασίες. Για παράδειγμα το εργαλείο μπορεί να κινείται από την περιστρεφόμενη άτρακτο και παράλληλα να υπάρχει η δυνατότητα για χρήση laser. Έτσι το τεμάχιο μπορεί να επεξεργάζεται με φραιζάρισμα και με χρήση δέσμης laser ταυτόχρονα.



Σχήμα 2.27 : Microgantry nano

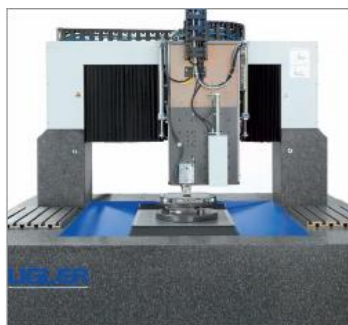


Σχήμα 2.28 : Microgantry micro



Η μηχανή είναι επίσης εφοδιασμένη με αισθητήρα αφής που υπολογίζει τη θέση του κατεργαζόμενου τεμαχίου και ακόμα αποτυπώνει τη γεωμετρία του.

Σχήμα 2.29 : Αισθητήρας αφής



Η βάση της μηχανής είναι κατασκευασμένη από στερεό λεπτόκοκκο γρανίτη πράγμα που εμποδίζει της εκτεταμένες φθορές από το χρόνο και τη διάβρωση και εμφανίζει μικρή θερμική διαστολή, μηχανική σταθερότητα και αντίσταση στους κραδασμούς.

Σχήμα 2.30 : Βάση από γρανίτη

Οι μικροκατεργασίες που μπορεί να εκτελέσει η Microgantry nano είναι:

- μικροκατεργασία 2.5 D και 3D κατασκευών
- διάτρηση και μικροκοπή
- φραιζάρισμα
- Αποπεράτωση επιφάνειας με χρήση laser
- 3/5 – αξονική microchip removal
- μικρολείανση με pin mills



Σχήμα 2.31 : Περιστρεφόμενη μονάδα, αισθητήρας αφής, κεφαλή laser, άτρακτος

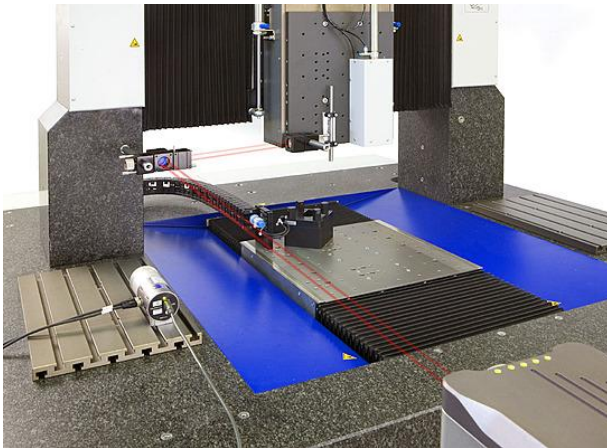
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ:

Η σειρά Microgantry καλύπτει τις απαιτήσεις για την κατασκευή εξαρτημάτων αρκετών διαφορετικών εφαρμογών όπως: μηχανικά / ηλεκτρονικά μικροεξαρτήματα, μικροεξαρτήματα οπτικής, μικροδομές κατασκευασμένες από έγχυση σε καλούπι, οπές ακροφυσίων.

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ:

Κάποια βασικά πλεονεκτήματα είναι :

1. η κατασκευή καλουπιών από πολύ σκληρά υλικά και με πολύ μικρές διαστάσεις λόγω aerostatic bearing axes (πνευματικοί άξονες – κίνηση με αέρα)
2. η δυνατότητα εκτέλεσης διάτρησης ακριβείας – οπές με αιχμηρότητα σε εύρος μικρομέτρου με διάμετρο μικρότερη από 200μm
3. ταυτόχρονη, αυτόματη και συνεχής μέτρηση και ευθυγράμμιση πριν και μετά αλλά και κατά τη διάρκεια της 5 αξονικής κατεργασίας
4. δυνατότητα παράλληλης ή εναλλακτικής χρήσης laser (hybrid micromachining)



Σχήμα 2.32 : Εφαρμογή μέτρησης (3)



Σχήμα 2.33 : Υβριδική κατ. (4)

2.3.5 HSPC (High speed precision cutting) 2216 της εταιρίας Kern

Πρόκειται για μια εργαλειομηχανή CNC μικροφραιζαρίσματος και μικροδιάτρησης 5 αξόνων. Οι αρκετά υψηλές ταχύτητες περιστροφής της ατράκτου (της τάξεως 40.000 και 90.000 rpm), εξασφαλίζουν πολύ καλή ποιότητα τελικής επιφάνειας. Τα υλικά που μπορεί να επεξεργαστεί είναι χάλυβας, άλλα μέταλλα, κάποια πολυμερή και κάποια κεραμικά. Η μηχανή έχει τη δυνατότητα να κατασκευάσει αρκετά μικρά εξαρτήματα καθώς και καλούπια – μήτρες για χυτά αντικείμενα. Τα κοπτικά εργαλεία που συνήθως χρησιμοποιούνται είναι διαμέτρου 0.1mm.



Σχήμα 2.34 : HSPC 2216 της εταιρίας Kern

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ / ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ:

- 5 – αξονική κατεργασία πολύ μικρών τεμαχίων με χαρακτηριστικά κάτω από 50-100μm και λόγο πλαισίου 3-10 (μη σιδηρούχα), 1-2 (σιδηρ.)



- πρότυπο καλούπτι για μικρορευστοποιητή. Το καλούπτι είναι φτιαγμένο από ορείχαλκο, ιδανικό για παραγωγή μικρών ποσοτήτων καλουπιών.



ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ		
Άξονες	διαμήκης άξονας x εγκάρσιος άξονας y κάθετος άξονας z	220mm 160mm 248mm
Τράπεζα	τράπεζα εργασίας μέγιστο επιτρεπόμενο βάρος	365x240mm 40kg.
Άτρακτος	taper ταχύτητα περιστροφής	HSK 25 40.000 έως 90.000rpm
Χώρος αποθ.εργαλείων	32 θέσεις	
Μέγιστη διάμετρος εργαλείου	50mm	
Ελεγκτής	Heidenhain CNC	

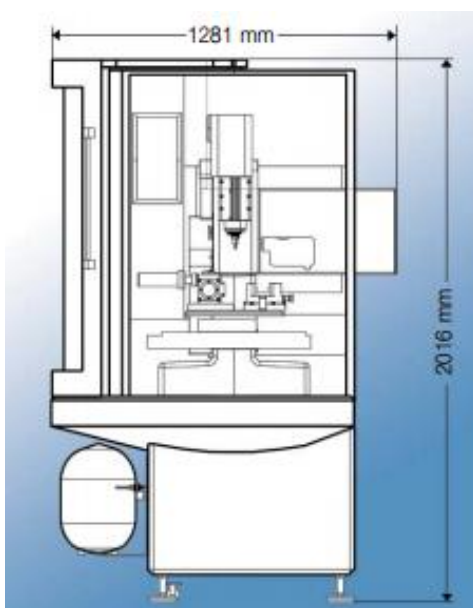
Πίνακας 2.5 : Προδιαγραφές HSPC 2216 της εταιρίας Kern

2.3.6 KERN Micro

Πρόκειται για ένα κέντρο κατεργασίας CNC υψηλής ακρίβειας 5 αξόνων με δυνατότητα κατεργασίας ενός κομματιού ή παραγωγή μιας μικρής σειράς προϊόντων. Η κατασκευή της μηχανής από συνθετικό μπετόν με πολυμερικές ρητίνες (σχήμα 2.15) έχει σκοπό την επίτευξη υψηλού μέτρου απόσβεσης και την απορρόφηση των ταλαντωτικών διεγέρσεων κατά την κατεργασία. Η μηχανή μπορεί να εκτελέσει κατεργασίες με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά: τελική ποιότητα επιφάνειας $Ra \leq 0.2\mu m$, φραιζάρισμα χάλυβα – μη σιδηρούχων μετάλλων – πλαστικών – κεραμικών, σύσφιξη ενός ή πολλών κομματιών.



Σχήμα 2.35 : Εργαλειομηχανή KERN Micro



Η μηχανή φέρει μια σειρά από εξαρτήματα και πρόσθετα όπως :

- CNC precision dividing head (precision dividing head: ειδικό εργαλείο που τοποθετείται στην τράπεζα μιας φραιζας και εκτελεί την κίνηση του τεμαχίου προς κατεργασία εύκολα, γρήγορα και με ακρίβεια).
- αυτόματο σύστημα αλλαγής εργαλείων με 20 θέσεις και χρόνο αλλαγής 6.5 sec.
- αυτόματο σύστημα μέτρησης ύψους και ακτίνας εργαλείου με χρήση ακτίνας laser διαμέτρου 30μm.
- αισθητήρα αφής για αυτόματη μέτρηση τεμαχίου

Σχήμα 2.36 : Πλάγια όψη εργαλειομηχανής

Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει ανάλογα με τις ανάγκες και τα χαρακτηριστικά της κατεργασίας μέσα από μια γκάμα εξαρτημάτων. Ενδεικτικά:

ΑΤΡΑΚΤΟΙ



500 – 30,000 rpm μόνιμη λίπανση γράσου, 2.5 kW
προσανατολισμένη

500 – 50,000 rpm μόνιμη λίπανση γράσου, 0.8 Nm 3.4kW vector-
controlled

30,000– 90,000 rpm μόνιμη λίπανση γράσου 0.17 kW

60,000– 160,000 λίπανση λαδιού/αέρα 0.5 kW



ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ

20 θέσεων HSK 25

χρόνος αλλαγής 6.5 s

μέγιστο μήκος εργαλείου 110 mm

μέγιστη διάμετρος εργαλείου 40 mm

μέγιστη διάμετρος στελέχους εργαλείου 10 mm



CNC PRECISION DEVIDING HEAD (4^{ος}/5^{ος} άξονας)

Περιστρ. άξονας, 2 axes or 1 axis system DC motor driven

τσοκ: μέγιστη χωρητικότητα Ø 20 mm,

ρυθμός τροφοδοσίας C/B 1600 / 800 °/min

εύρος περιστροφής από –10 μέχρι +100°

Height of centres 40 mm

PS< 3", ακρίβεια στο τεμάχιο < 10"



ΜΕΤΡΗΣΗ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ ΜΕ LASER

Ακτίνα laser διαμέτρου 30 μm , μετρά το εργαλείο. Τα δεδομένα μεταφέρονται αυτόματα στον ελεγκτή κατά τη διάρκεια της κατεργασίας.



ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΑΦΗΣ ΜΕ ΑΣΥΡΜΑΤΗ ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΜΕΣΩ ΥΠΕΡΥΘΡΩΝ ΑΚΤΙΝΩΝ

Μέτρηση του κομματιού προς κατεργασία και υπολογισμός της ακριβούς θέσης του.



ΟΠΤΙΚΗ ΣΥΣΚΕΥΗ ΜΕΤΡΗΣΗΣ

Μικροσκοπιο κεντραρίσματος και ελέγχου με μεγέθυνση διεπαφής

- 30 φορών
- 50
- 100



ΜΕΓΓΕΝΗ ΜΕ ΣΙΑΓΩΝΕΣ

για την σύσφιξη στο τσοκ

ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ		
Άξονες	διαμήκης άξονας x εγκάρσιος άξονας y κάθετος άξονας z μέγιστη περιοχή σύσφιξης δίσκοι μέγιστο επιτρεπόμενο βάρος ρυθμός τροφοδοσίας επιτάχυνση	250mm 220mm 200mm 350mm x 230 mm ψηφιακοί (AC servo) 30kg. 0,01 έως 6.000mm.min 2m/s ²
Άτρακτος	taper σύστημα αλλαγής εργαλείου μέγιστη διάμετρος εργαλείου	HSK 25 20 θέσεις 40 mm
Ακρίβεια (VDI/DGQ3441)	ανάλυση Ps P ακρίβεια πάνω στο τεμάχιο	0,1μm ± 1 μm ± 1 μm ± 2 μm
Μηχανή	βάρος ελεγκτής ελάχιστος απαιτούμενος χώρος εγκατάστασης	1700 kg. Heidenhain 2,5 m x 2,2m x 2,1m
4ος/5ος άξονας	περιστρεφόμενος περιστροφή ακρίβεια πάνω στο τεμάχιο ρυθμός τροφοδοσίας	360 ° συνεχόμενα από -10 °μέχρι +100° ≤10" C/B 1600 / 800 °/min

Πίνακας 2.6 : Προδιαγραφές εργαλειομηχανής Kern Micro

2.3.7 Ultimill V3000 της εταιρίας Moriseiki

Η Ultimill V3000 είναι ένα ιδανικό κατακόρυφο κέντρο κατεργασίας για μαζική παραγωγή (υψηλή παραγωγικότητα). Φέρει No.30 taper αντί για No.40 που είναι αρκετά πιο γρήγορη άτρακτος ενώ παράλληλα δίνεται η δυνατότητα βαθιάς κοπής. Το αυτόματο σύστημα αλλαγής εργαλείων ελαχιστοποιεί το χρόνο μη κοπής αφού η διάρκεια της διαδικασίας αλλαγής είναι μόλις 900msec.



Σχήμα 2.37 : Ultimill V3000 της εταιρίας Moriseiki

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ:

Τα βασικά πλεονεκτήματα της μηχανής είναι η δυνατότητα για δημιουργία μιας γραμμής παραγωγής με υψηλή απόδοση και η ύπαρξη 2 -station turn type APC για ελάττωση του tact time (βήμα βιομηχανικών γραμμών παραγωγής).

ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ		
Άξονες	διαμήκης άξονας x εγκάρσιος άξονας y κάθετος άξονας z	500mm 300mm 400mm
Τράπεζα εργασίας	επιφάνεια εργασίας μέγιστο επιτρεπόμενο βάρος	700mm x 340mm 150 kg.
Άτράκτος	μέγιστη ταχύτητα	15.000 rpm
Χωρητικότητα αποθήκης εργαλείων	24,20 ή 30 θέσεις	

Πίνακας 2.7 : Προδιαγραφές εργαλειομηχανής Ultimill V3000 της εταιρίας Moriseiki

2.3.8 DMU 50 eco της εταιρίας DMG

Το κέντρο κατεργασίας γενικής χρήσης CNC DMU 50 eco είναι εξοπλισμένο με ισχυρή άτράκτο μέχρι 8.000 rpm, 83 Nm (40% ED), ισχύ ατράκτου 13 kW (40% ED) και 12 m/min γρήγορη μετατόπιση. Το περιστρεφόμενο τραπέζι του καθιστά εφικτή την κατασκευή πολύ σύνθετων τεμαχίων κατεργασίας. Η υδραυλική σύσφιξη εμπεριέχεται στο περιστρεφόμενο τραπέζι και η περιοχή περιστροφής μέχρι τις 115° (-5° / +110°) καθιστά εφικτές κλίσεις μέχρι 20°. Ο εργαλειοφορέας με 16 θέσεις και το αποσπώμενο χειριστήριο καθιστούν εφικτή την απλή και άνετη εκτέλεση των διαφόρων εργασιών φραιζαρίσματος. Η κατασκευή είναι με χυτοσίδηρο σκελετό, για μέγιστη ακρίβεια και ποιότητα επιφανειών. Το εργονομικό DMG

SLIMline® Panel με οθόνη TFT 15", SIEMENS 810D powerline και λογισμικό ShopMill καθιστούν εφικτό τον απλό προγραμματισμό και την τρισδιάστατη προσομοίωση.



Σχήμα 2.38 : DMU 50 eco της εταιρίας Moriseiki



Σχήμα 2.39 : Κατεργασία στους 5 άξονες

2.3.9 LASERTEC 40 της εταιρίας DMG

Η εργαλειομηχανή Lasertec 40 είναι ένα κέντρο κατεργασίας 3 γραμμικών και 2 οπτικών αξόνων με αυτοματοποιημένη καθοδήγηση CNC. Διαθέτει παλμικό fibre τύπο laser με ισχύ 20Watt, πλήρη προστασία καμπίνας και παράθυρο ασφαλείας Laser safety glass 1 και σύστημα ελέγχου CNC με λογισμικό προγραμματισμού με δυνατότητα εισαγωγής stl και dxf αρχείων.

Με τη LASERTEC 40 κατεργάζονται λεπτά σχήματα και κοιλότητες όπως και πολύπλοκα κομμάτια με απότομα τοιχώματα, με υψηλή ακρίβεια και χωρίς κόστος εργαλείων. Έχει τη δυνατότητα κατεργασίας διαφόρων υλικών όπως σκληροί χάλυβες, κεραμικά, γραφίτη, καρβίδια, CBN και PCD, με υψηλή ποιότητα επιφανείας ($Ra = 0.8 \mu m$ σε PCD και πάνω από $Ra = 1.0 \mu m$ σε σκληρούς χάλυβες)



Σχήμα 2.40 : LASERTEC 40 της εταιρίας Moriseiki



Σχήμα 2.41 : Δέσμη laser



Σχήμα 2.42 : Αισθητήρας μηδενισμού (probe)

2.3.10 Σύγκριση εργαλειομηχανών

Όλες οι μηχανές που παρουσιάστηκαν και αναλύθηκαν πιο πάνω έχουν τη δυνατότητα να εκτελέσουν μικροκατεργασίες κοπής με αρκετά υψηλή ακρίβεια. Κάθε μια όμως από αυτές έχει ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και προδιαγραφές που την κάνουν κατάλληλη για συγκεκριμένες χρήσεις. Πιο κάτω αναφέρονται επιγραμματικά :

A. DT-110 της εταιρίας Mikrottools :

- πολλές διαφορετικές κατεργασίες όλες σε μια μηχανή – αυτό δίνει αρκετή ευελιξία στο χρήστη ο οποίος προσαρμόζει και επιλέγει το είδος της κατεργασίας που θα εκτελέσει ανάλογα με τα δεδομένα της.
- ταχύτητα περιστροφής της πνευματικής ατράκτου μέχρι 200.000 rpm – αυτό μπορεί να εξασφαλίσει αρκετά υψηλή ακρίβεια και τελική ποιότητα επιφάνειας.

Έτσι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εργασίες που απαιτούν πολλές διαφορετικές κατεργασίες για την πραγματοποίησή τους όπως σύνθετες δομές.

B. W-408 της εταιρίας Willemin :

- ύπαρξη συστήματος συνεχούς τροφοδοσίας πρώτης ύλης – στην περίπτωση κατασκευής μεγάλου αριθμού τεμαχίων με κατεργασία τόννευσης το συνεχές δέσιμο των ακατέργαστων και το λύσιμο των κατεργασμένων τεμαχίων αποτελεί σημαντικό τμήμα των νεκρών χρόνων κατεργασίας. Επομένως με τη χρήση του συστήματος αυτού εξασφαλίζεται εξοικονόμηση χρόνου και κόπου για μια αυτοματοποιημένη παραγωγή μεγάλης κλίμακας.
- ύπαρξη συστήματος εκφόρτωσης και αποθήκευσης κατεργασμένου τεμαχίου – σε συνδυασμό με το παραπάνω , παρέχεται τελικά μια γραμμή παραγωγής.

Είναι μια ιδανική εργαλειομηχανή για εργασίες που απαιτούν αυτοματοποίηση και όσο γίνεται λιγότερη επέμβαση του χειριστή.

C. Hyper 2J της εταιρίας Makino :

- sub-micron accuracy – πολύ υψηλή τελική ακρίβεια στην κατεργασία
- πρόσβαση στο τεμάχιο από 3 πλευρές – εύκολος άμεσος και συνεχής έλεγχος του χρήστη

Πρόκειται για μια μηχανή κατάλληλη για κατεργασίες με πολύ υψηλές απαιτήσεις σε ακρίβεια καθώς και για εργασίες που απαιτούν τον συνεχή έλεγχο με το χρήστη.

D. Microgantry της εταιρίας Kugler :

- σύστημα CAD/CAM – χρειάζεται μόνο το τρισδιάστατο σχέδιο του τελικού τεμαχίου
- υβριδική κατεργασία – μπορεί να συνδυαστεί η διαδικασία του φραιζαρίσματος με παράλληλη αποπεράτωση με χρήση laser για το καλύτερο τελικό αποτέλεσμα στο τεμάχιο βάσει του σχεδίου.
- sub-micron accuracy – πολύ υψηλή τελική ακρίβεια στην κατεργασία

Λόγω του συστήματος CAD/CAM, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή τεμαχίων από το τρισδιάστατο σχέδιο απευθείας άρα δεν χρειάζεται προγραμματισμός της κοπής. Αυτό μπορεί να αποδειχθεί αρκετά χρήσιμο για κατεργασίες με αρκετά πολύπλοκη δομή.

E. HSPC 2216 της εταιρίας Kern

- η άτρακτος μπορεί να φτάσει τις 90.000 rpm – προσφέρεται αρκετά υψηλή ακρίβεια στην κατεργασία
- μέγιστη διάμετρος εργαλείου 50mm - δυνατότητα για χρήση αρκετά μεγάλου κοπτικού.

Η δυνατότητα για χρήση μεγάλου εύρους κοπτικών παρέχει ευελιξία στην κατεργασία από την άποψη ότι μπορούν να κατασκευαστούν δομές και λίγο μεγαλύτερων διαστάσεων.

F. Micro της εταιρίας Kern

- η άτρακτος μπορεί να φτάσει τις 160.000 rpm – προσφέρεται αρκετά υψηλή ακρίβεια στην κατεργασία και αρκετά καλή ποιότητα τελικής επιφάνειας.

G. Ultimill V3000 της εταιρίας Moriseiki

- υψηλή παραγωγικότητα σε συνδυασμό με αρκετά καλή ταχύτητα – αυτό μπορεί να προσφέρει τη δυνατότητα μαζικής παραγωγής.
- επιφάνεια τράπεζας 700mm x 340mm και μέγιστο επιτρεπόμενο βάρος 150 kg – αρκετά μεγαλύτερες διαστάσεις σε σχέση με τις τράπεζες των υπολοίπων εργαλειομηχανών πράγμα που δίνει μεγαλύτερο εύρος αντικειμένων που μπορεί να κατεργαστεί.

Η μηχανή αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περιπτώσεις που υπάρχει ανάγκη για δημιουργία πολλών κομματιών και σε σύντομο χρονικό διάστημα. Επίσης μπορεί να κατεργαστεί τεμάχια με αρκετά μεγαλύτερες διαστάσεις και βάρος μέχρι και 150 kg. τη στιγμή που οι περισσότερες από τις υπόλοιπες κατεργάζονται τεμάχια με μέγιστο βάρος 30 έως 40 kg.

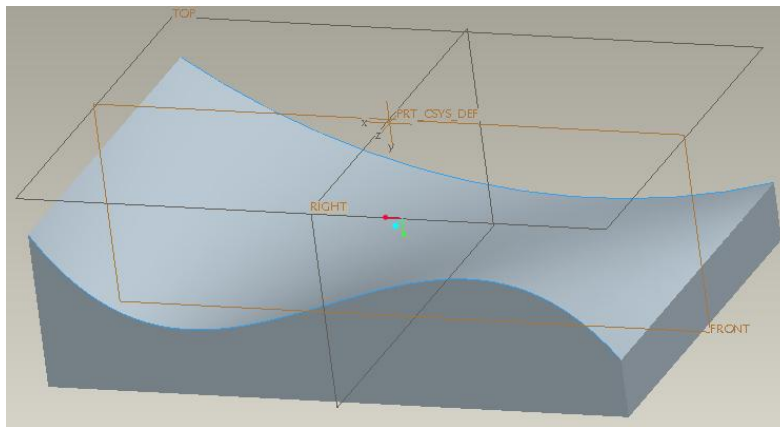
3. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ / ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

3.1 Σχεδιασμός και κατασκευή καλούπιου με κατεργασία φραιζαρίσματος

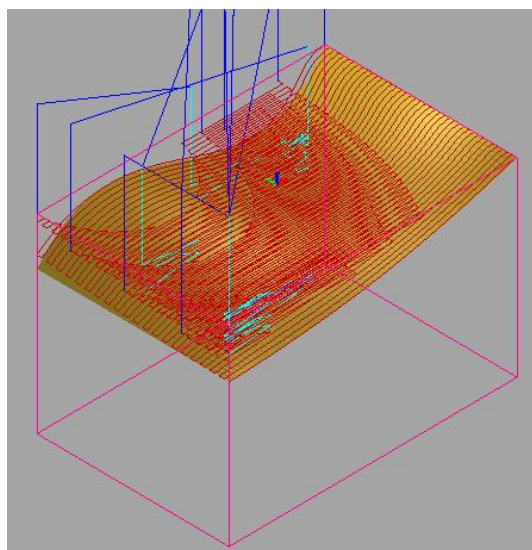
Αρχικά σχεδιάζεται το καλούπι σε κάποιο σχεδιαστικό πακέτο όπως Pro engineer (σχήμα 3.1). Εξάγεται (export) το στερεό σε αρχείο της μορφής .stl, το οποίο εισάγεται (import) στο πρόγραμμα Artcam Pro.

Πρόκειται για ένα CAD/CAM λογισμικό που παρέχει τη δυνατότητα για τρισδιάστατη σχεδίαση στερεού και παράλληλη εξαγωγή G-κώδικα για την κατασκευή του με ψηφιακά καθοδηγούμενο φραιζάρισμα. Η διαδικασία αυτή επιτυγχάνεται με τον υπολογισμό των toolpaths (σχήμα 3.2), ενώ παρέχεται η δυνατότητα επιλογής κατάλληλου εργαλείου αλλά και ο προσδιορισμός των συνθηκών κατεργασίας, εξ' ολοκλήρου από το λογισμικό.

Από το Artcam, εξάγεται το αρχείο .tap, το οποίο περιέχει τον G-κώδικα, που εισάγεται στο κέντρο κατεργασίας DMU50 eco για την κατασκευή του καλούπιου.



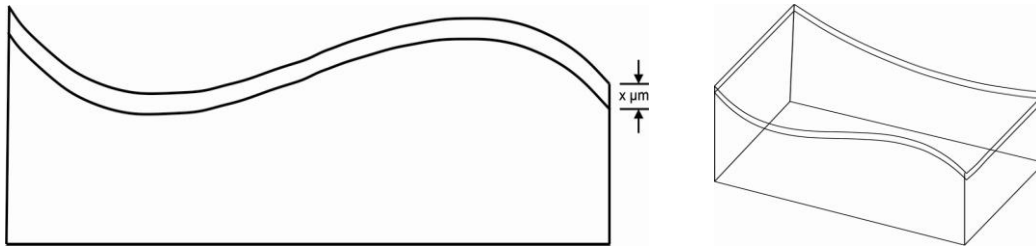
Σχήμα 3.1 : Στερεό με καμπυλόγραμμη επιφάνεια που θα αποτελέσει την επιφάνεια του καλούπιου



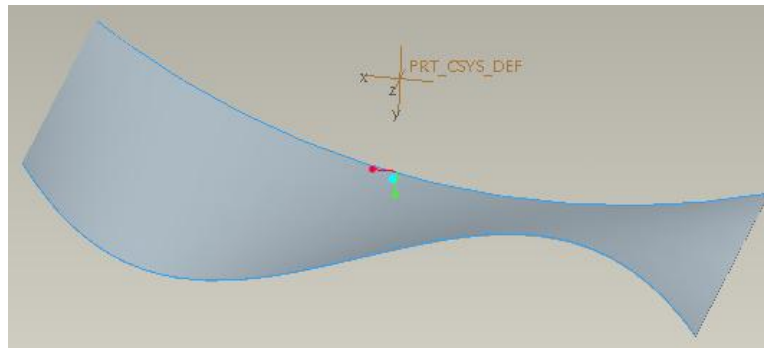
Σχήμα 3.2 : Toolpaths για την κατασκευή της επιφάνειας

3.2 Μηδενισμός επιφάνειας και αποπεράτωση με laser

Στην εργαλειομηχανή laser engraving κόβεται ένα λεπτό στρώμα της επιφάνειας του καλουπιού (σχήμα 3.3). Σαν import δίνεται το αρχείο της μορφής .stl που πρόκειται να αποπερατωθεί. Επομένως εξάγεται το στρώμα λίγων μικρομέτρων από το ίδιο το στερεό που έχει σχεδιαστεί προηγουμένως στο ProE, δίνοντας ένα offset μεγέθους όσο είναι το πάχος του στρώματος που πρόκειται να κοπεί (σχήμα 3.4).



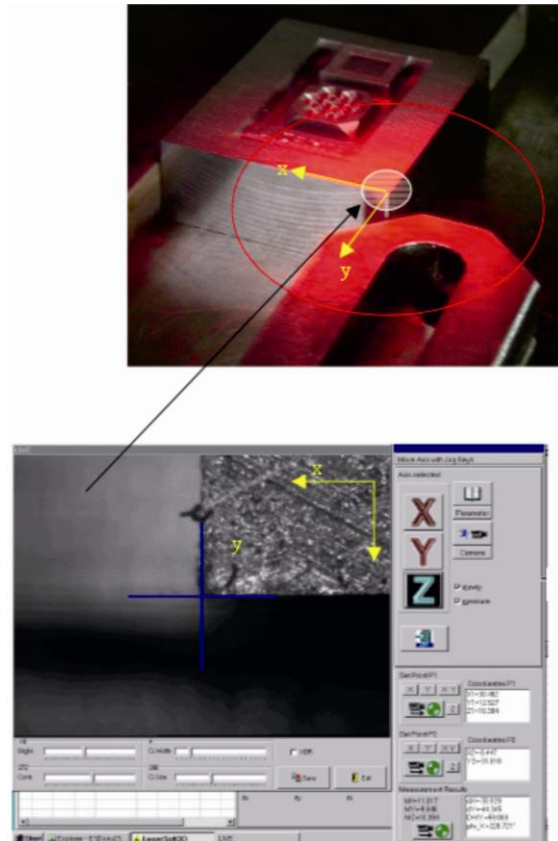
Σχήμα 3.3 : Στρώμα $x \mu m$ που αφαιρείται από την επιφάνεια του στερεού σε πλάγια όψη



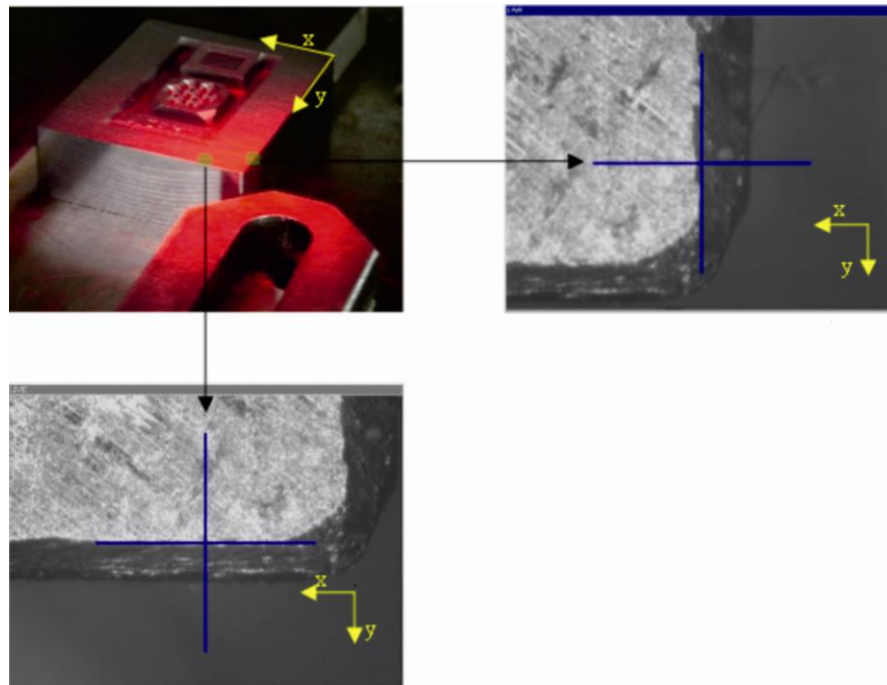
Σχήμα 3.4 : Layer από την επιφάνεια του στερεού που θα κοπεί στην εργαλειομηχανή laser engraving

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, στην εργαλειομηχανή χάραξης με laser, ο μηδενισμός του τεμαχίου γίνεται μέσω ενσωματωμένης κάμερας, με την τοποθέτηση του σημείου (0,0) των αξόνων x και y αντίστοιχα (σχήμα 3.5) πάνω στο δοκίμιο απ' ευθείας από τον χρήστη με χρήση του λογισμικού laser soft 3d. Εναλλακτικά, ο μηδενισμός μπορεί να επιτευχθεί επιλέγοντας με την κάμερα δύο σημεία πάνω στο δοκίμιο, ένα σε κάθε ακμή και στη συνέχεια με την τομή των δύο ακμών αρκεί η μια ακμή να είναι παράλληλη στον άξονα x και η άλλη στον άξονα y (σχήμα 3.6).

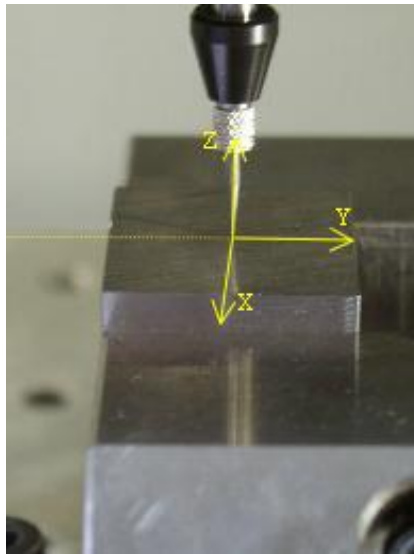
Ο μηδενισμός του άξονα z γίνεται με τη χρήση του αισθητήρα, ο οποίος τοποθετείται στην πάνω ελεύθερη επιφάνεια του δοκιμίου (σχήμα 3.7). Αν υπάρχει ήδη κομμένη επιφάνεια σε κάποιο βάθος a και σκοπός είναι η αποπεράτωση της, δίνεται ένα offset μεγέθους a .



Σχήμα 3.5 : Παράδειγμα μηδενισμού αξόνων x, y απ' ευθείας πάνω στο κομμάτι



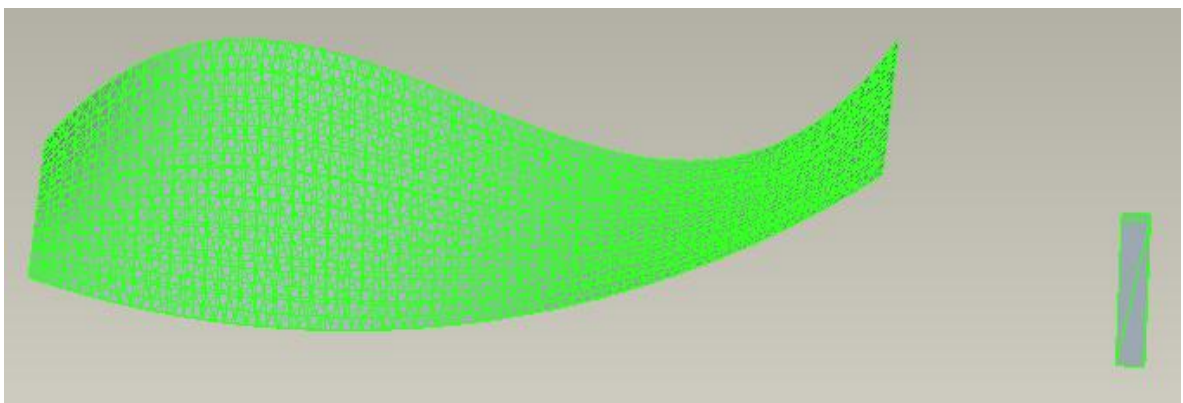
Σχήμα 3.6 : Παράδειγμα μηδενισμού αξόνων x, y στο σημείο τομής των δύο ακμών



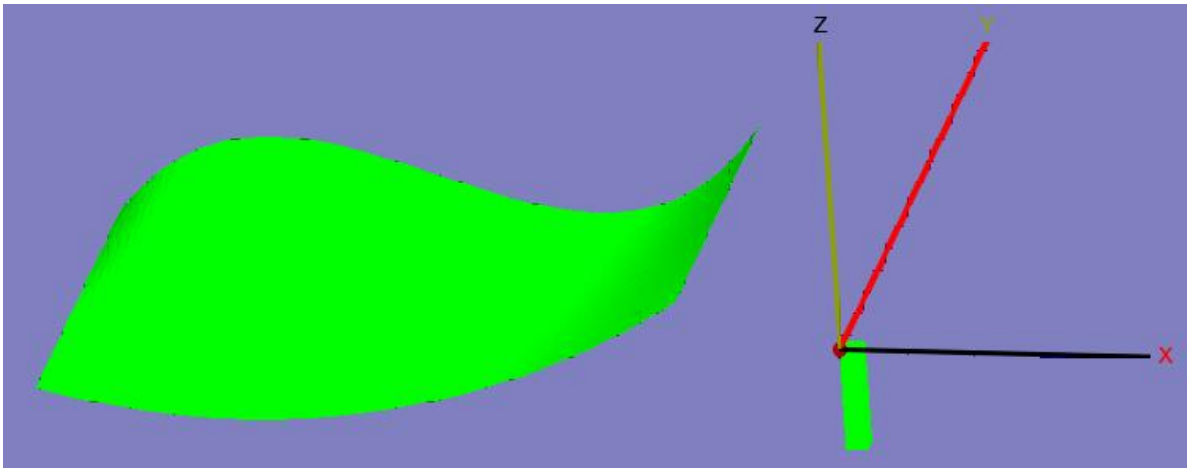
Σχήμα 3.7 : Παράδειγμα μηδενισμού κάθετου άξονα z με τον αισθητήρα αφής

Για την περίπτωση που υπάρχει επιφάνεια ελεύθερης μορφής ήδη κατασκευασμένη, σκοπός είναι να βρεθεί ο τρόπος με τον οποίο ο μηδενισμός της επιφάνειας επιτυγχάνεται με την καλύτερη δυνατή ακρίβεια. Για το σκοπό αυτό, σχεδιάζεται στο ProE ,στο ίδιο αρχείο που περιέχει την επιφάνεια προς αποπεράτωση (στρώμα πάχους λίγων μικρομέτρων), πυργίσκος τετραγωνικής διατομής σε σημείο που ορίζει ο χρήστης και αποθηκεύεται σε μορφή .stl για να δοθεί σαν input στην εργαλειομηχανή laser engraving (σχήμα 3.8). Στη συνέχεια, ο μηδενισμός γίνεται σε μια από τις πάνω γωνίες της τετραγωνικής διατομής του πυργίσκου (σχήμα 3.9), η οποία συμπίπτει με γνωστό και διακριτό σημείο πάνω στο τεμάχιο ώστε να είναι εύκολο στο χρήστη να το εντοπίσει από την κάμερα της μηχανής (σχήμα 3.10). Στο σημείο αυτό τοποθετείται ο σταυρός (σημείο (0,0) των αξόνων x και y).

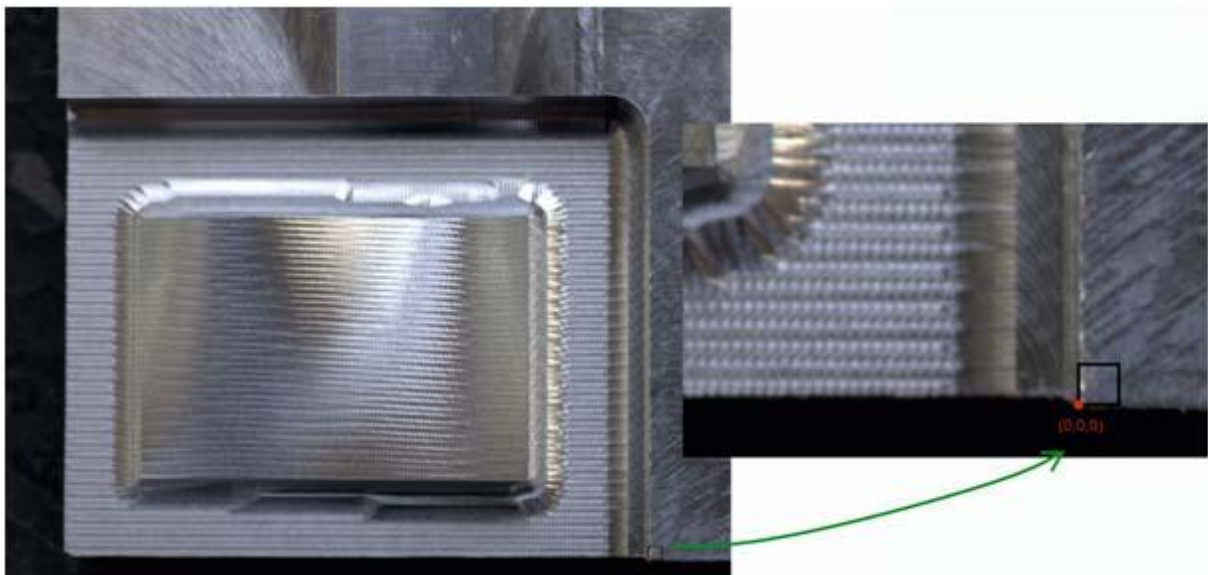
Όσον αφορά τον άξονα z, ο μηδενισμός του μπορεί να γίνει σε οποιοδήποτε σημείο της ακατέργαστης επιφάνειας του δοκιμίου εφ' όσον το στερεό καλούπι έχει κατασκευαστεί με κατεργασία φραιζαρίσματος επομένως το υψηλότερο σημείο του ανάγλυφου πάντα θα συμπίπτει με την πάνω ελεύθερη επιφάνεια του τεμαχίου.



Σχήμα 3.8 : Στερεό σε αρχείο της μορφής .stl που δίνεται σαν input στην laser engraving

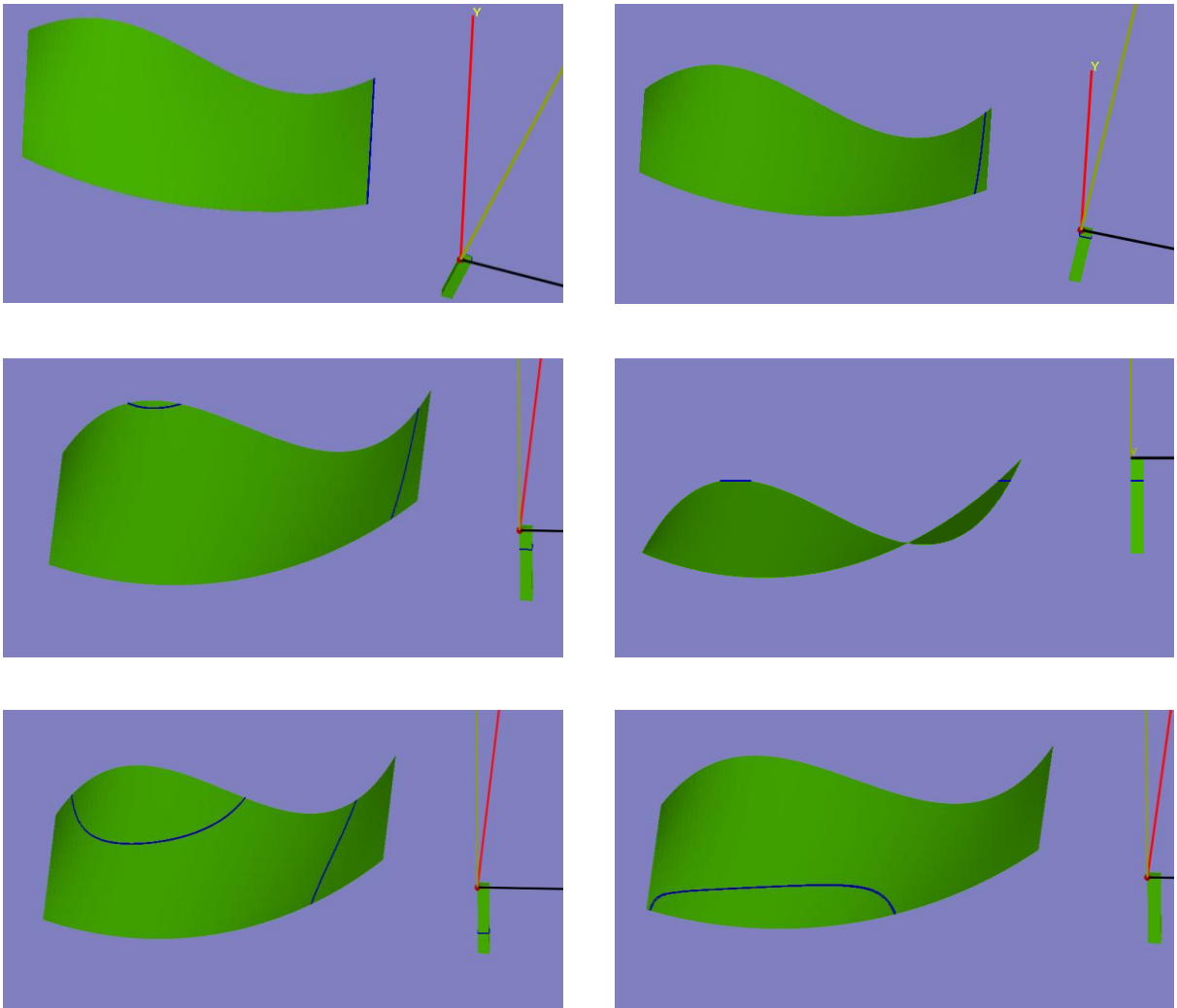


Σχήμα 3.9 : Τοποθέτηση σημείου (0,0,0) πάνω στο στερεό με το λογισμικό LpsWin



Σχήμα 3.10 : Η θέση του σημείο (0,0,0) πάνω στο τεμάχιο

Εφ' όσον έχει τοποθετηθεί το σημείο μηδέν στο σωστό σημείο στο αρχείο .stl, ορίζεται από τον χρήστη, ο αριθμός των περασμάτων που θα πραγματοποιηθούν με την δέσμη laser, δίνοντας στο χωρίο thickness του παραθύρου caving options του λογισμικού LpsWin το πάχος κάθε στρώματος που θα αφαιρείται σε κάθε πέρασμα της δέσμης. Στη συνέχεια ακολουθεί το programming, η διαδικασία δηλαδή που εκτελεί το πρόγραμμα για να στρωματοποιήσει το στερεό που βρίσκεται στο αρχείο .stl (σχήμα 3.11). Στο αρχείο .L4d που έχει δημιουργηθεί, γίνεται μια προσομοίωση της κοπής ενώ στο λογισμικό Lasersoft 3d, ορίζονται οι συνθήκες κοπής από τον χρήστη φτιάχνοντας το technology. Ακολουθεί ο μηδενισμός του κομματιού στο σωστό σημείο (0,0) – άξονες x, y, που όπως έχει αναφερθεί πρέπει να είναι ένα διακριτό σημείο ώστε να εξασφαλιστεί ότι θα συμπίπτει με το σημείο μηδενισμού πάνω στο στερεό στο αρχείο .stl που έχει δοθεί. Τέλος, ξεκινά η διαδικασία κοπής από την μηχανή.

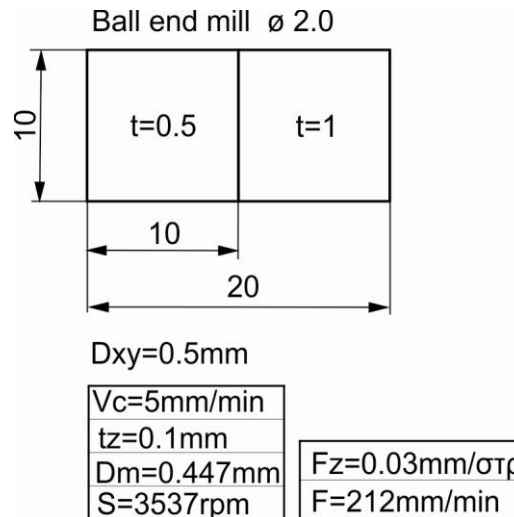


Σχήμα 3.11 : Διαδικασία στρωματοποίησης (programming)

4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ

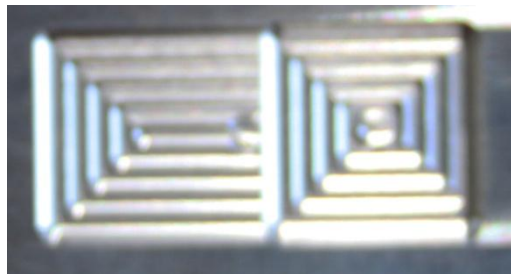
4.1 Πείραμα 1: κατασκευή καλουπιού τετραγωνικής δομής

Στο πείραμα αυτό κατασκευάζεται μια σχετικά απλή δομή της μορφής του τετραγώνου. Κατασκευάζονται δύο σκαλιά με βάθος 0.5 mm και 1mm αντίστοιχα (σχήμα 4.1). Εδώ δεν γίνεται χρήση κάποιου CAD/CAM λογισμικού δεδομένης της απλής μορφής του σχήματος. Ο κώδικας εξάγεται με την χρήση ποκέτας τετραγωνικής μορφής απ' ευθείας από την ψηφιακά καθοδηγούμενη φραιζα. Ο συνολικός χρόνος κατεργασίας στη φραιζα είναι περίπου 14 λεπτά.



Σχήμα 4.1 : Φύλλο κατεργασίας με τα χαρακτηριστικά της δομής και τις συνθήκες κοπής

Δεδομένων των παραπάνω συνθηκών, στην κατεργασμένη επιφάνεια εμφανίζεται έντονο ανάγλυφο λόγω της κίνησης του κοπτικού εργαλείου (σχήμα 4.2). Το ανάγλυφο αυτό παρουσιάζεται λόγω του αρκετά μεγάλου ακτινικού βάθους κοπής.



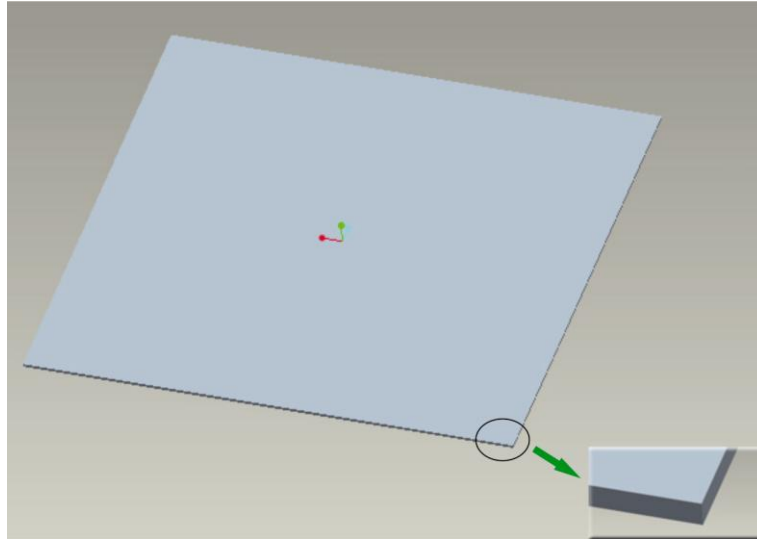
Σχήμα 4.2 : Κατεργασμένη επιφάνεια δύο σκαλοπατιών από φραιζάρισμα

Το ακτινικό βάθος κοπής ορίζεται ως η ακτινική μετατόπιση του κοπτικού εργαλείου (D_{xy}). Η μείωση του ακτινικού βάθους κοπής βελτιώνει την ποιότητα της κατεργασμένης επιφάνειας.

Ακολουθεί τραχυμέτρηση του σκαλοπατιού βάθους 0.5mm με το τραχύμετρο DIAVITE Compact η οποία δίνει $R_t=60\mu m$.

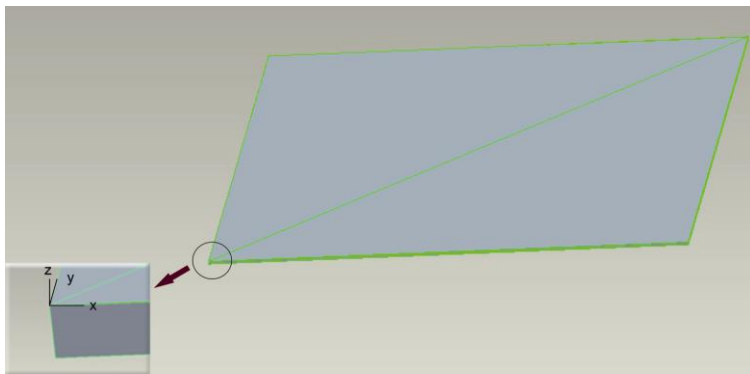
Για την αποπεράτωση του τετραγώνου με laser, κατασκευάζεται στο σχεδιαστικό πακέτο Pro Engineer το στρώμα 60μm τετραγωνικής διατομής (σχήμα 4.3) το οποίο αποθηκεύεται στη μορφή .stl για να δοθεί σαν input στην εργαλειομηχανή laser engraving. Επιλέγεται το πάχος

του στρώματος που θα αποπερατωθεί να είναι ίσο με το R_t που εξάχθηκε από την τραχυμέτρηση.

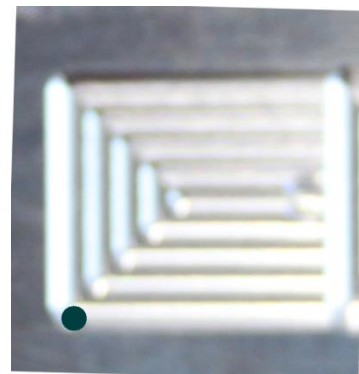


Σχήμα 4.3 : Στρώμα πάχους 60 μm που αποπερατώνεται στη laser

Η τοποθέτηση του σημείου $(0,0)$ των αξόνων x και y στην εργαλειομηχανή laser engraving γίνεται με την τοποθέτηση του σταυρού στο σημείο του κομματιού εκείνο που συμπίπτει με το σημείο $(0,0)$ που έχει τοποθετηθεί στο στερεό (σχήμα 4.4) στο λογισμικό LpsWin. Εδώ επιλέγεται η κάτω αριστερή γωνία του τετραγώνου. Το σημείο αυτό είναι εύκολο να εντοπιστεί από την κάμερα της μηχανής δεδομένου του ότι είναι ένα διακριτό σημείο (σημείο τομής δύο ακμών).

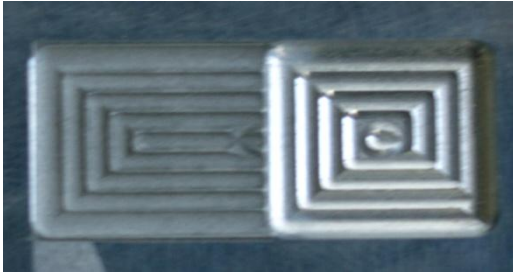


Σχήμα 4.4 : Σημείο $(0,0,0)$ του στερεού στρώματος



Σχήμα 4.5 : Σημείο $(0,0,0)$ στο κομμάτι

Το σημείο μηδέν του άξονα z στο στερεό τοποθετείται στην επάνω πλευρά του. Επομένως ο μηδενισμός του κομματιού γίνεται με τη χρήση του αισθητήρα (probe) σε κάποιο τυχαίο σημείο της ελεύθερης επάνω ακατέργαστης επιφάνειας του δοκιμίου και στη συνέχεια δίνοντας ένα offset μεγέθους όσο το βάθος κοπής της κατεργασίας φραιζαρίσματος ($t=0.5 \text{ mm}$).

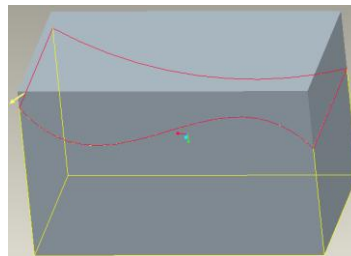


Σχήμα 4.6 : επιφάνεια μετά την αποπεράτωση με laser (αριστερό σκαλί βάθους 0.5)

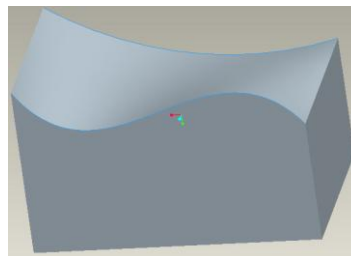
Μετά την αποπεράτωση με laser εξάγεται μια επιφάνεια με βελτιωμένη ποιότητα. Παρατηρείται όμως ότι το ανάγλυφο που δημιουργήθηκε σαν αποτέλεσμα της κατεργασίας φραιζαρίσματος, διατηρήθηκε (σχήμα 4.6). Ο χρόνος κατεργασίας είναι 6 λεπτά.

4.2 Πείραμα 2: κατασκευή καλουπιού με επιφάνεια ελεύθερης μορφής

Στο πείραμα αυτό, αρχικά σχεδιάζεται το στερεό στο σχεδιαστικό πακέτο Pro/Engineer Wildfire 2.0. Πρόκειται για ένα καλούπι με ορθογωνική βάση και επάνω ελεύθερη καμπυλόγραμμη επιφάνεια που επιτυγχάνεται αρχικά με το σχεδιασμό δύο sp-lines και στη συνέχεια με την εντολή boundary blend. Με την εντολή solidify, αφαιρείται το επάνω κομμάτι του στερεού (σχήμα 4.7) και προκύπτει το τελικό τρισδιάστατο (σχήμα 4.8).

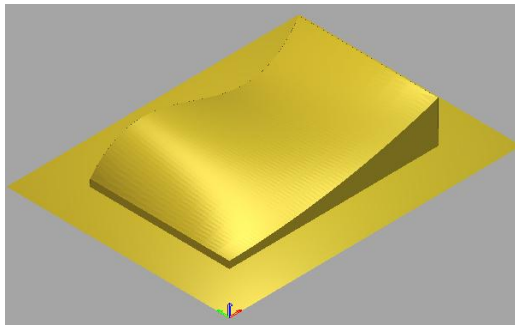


Σχήμα 4.7 : Solidify to boundary blend



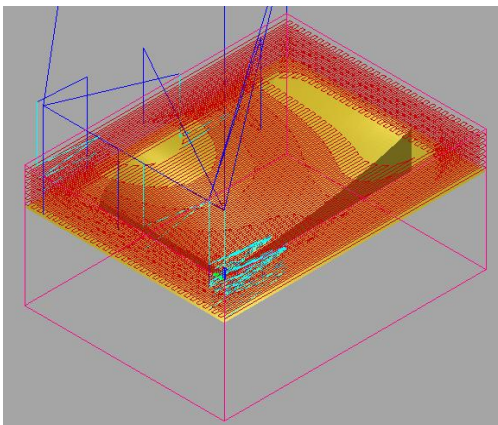
Σχήμα 4.8 : Τελικό στερεό

Το στερεό που κατασκευάστηκε στο ProE, αποθηκεύεται σε μορφή .stl και εισάγεται στο Artcam Pro 8. Τοποθετείται με τέτοιο τρόπο ώστε να δημιουργηθεί με το φραιζάρισμα αυλάκι γύρω από την επιφάνεια για λόγους ασφαλείας του κοπτικού εργαλείου (σχήμα 4.9). Το υλικό του καλουπιού είναι αλουμίνιο 7075 T6 (ντουραλουμίνιο), με αρκετά υψηλή σκληρότητα.

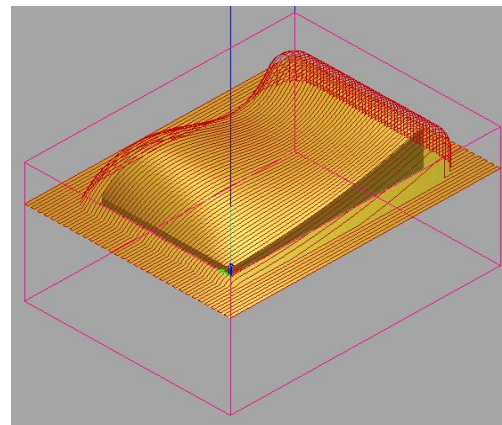


Σχήμα 4.9 : Στερεό που πρόκειται να κατασκευαστεί στην ψηφιακά καθοδηγούμενη φραιζα

Προκειμένου να εξαχθεί ο G-κώδικας για την κατασκευή του στερεού, δημιουργούνται δύο toolpaths στο λογισμικό Artcam: το “roughing toolpath” ([σχήμα 4.10](#)), για την εκχόνδριση της επιφάνειας του δοκιμίου με κονδύλι φραιζαρίσματος (end mill) διαμέτρου 6mm και το “surface toolpath” ([σχήμα 4.11](#)) για τη δημιουργία της τελικής επιφάνειας με εργαλείο σφαιρικής απόληξης (ball end mill) διαμέτρου 6mm. Το “roughing toolpath” κατασκευάζεται με την εντολή *z level rouhing* ενώ το “surface”, με την εντολή *machine relief*. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι συνθήκες κοπής ([πίνακας 4.1](#)) καθώς και οι παράμετροι του εργαλείου κοπής ορίζονται εξολοκλήρου μέσα στο πρόγραμμα. Το εργαλείο κοπής επιλέγεται από το παράθυρο *tool groups database* και οι συνθήκες κοπής ορίζονται στο παράθυρο *edit tool*.



Σχήμα 4.10 : “Roughing toolpath”

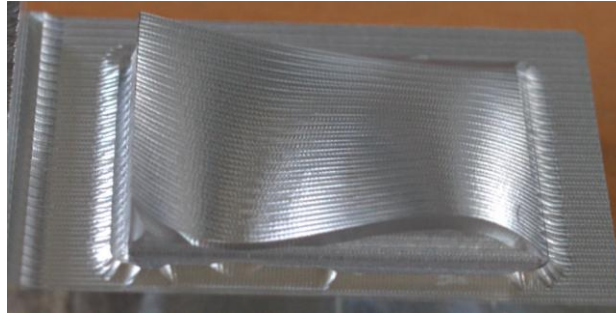


Σχήμα 4.11 : “Surface toolpath”

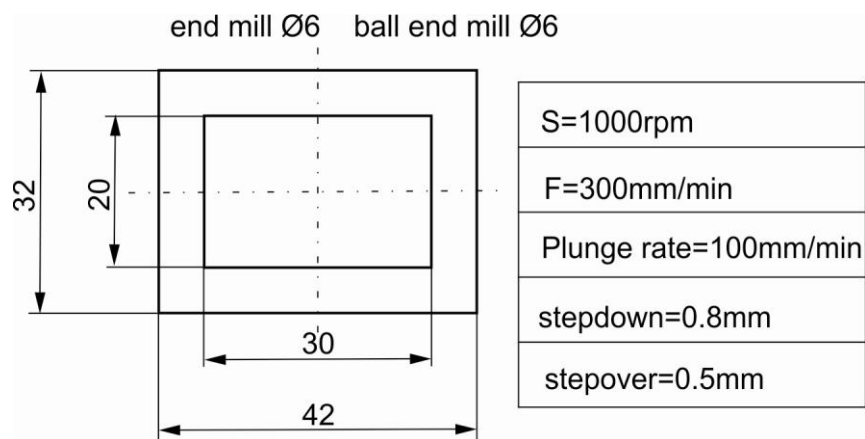
stepdown	0.8 mm	η απόσταση που διανύει το εργαλείο κάθετα σε κάθε βήμα στον z άξονα
stepover	0.5 mm	η απόσταση που διανύει το εργαλείο οριζοντίως στο επόμενο πέρασμα
spindle speed	1000 rpm	η ταχύτητα περιστροφής της ατράκτου
feed rate	300 mm/min	η πρόωση
plunge rate	100 mm/min	η ταχύτητα με την οποία κινείται το εργαλείο στον άξονα z σε κάθε βήμα βυθίσματος

Πίνακας 4.1 : Συνθήκες κοπής

Στη συνέχεια, ο κώδικας αποθηκεύεται σε μορφή .tap και εισάγεται στην ψηφιακά καθοδηγούμενη φραιζα για να κατασκευαστεί το στερεό (σχήμα 4.12). Οι χρόνοι κατεργασίας είναι 43 λεπτά για το roughing toolpath και 10 λεπτά για το surface.



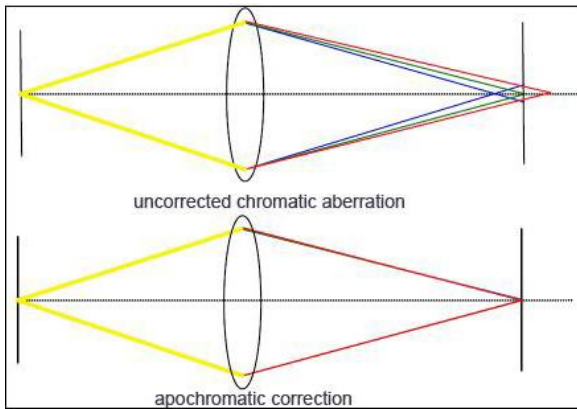
Σχήμα 4.12 : Κατεργασμένη επιφάνεια



Σχήμα 4.13 : Φύλλο κατεργασίας

Προκειμένου να αποτυπωθεί η επιφάνεια με σκοπό να συγκριθεί με την τελική επιφάνεια που θα προκύψει μετά την αποπεράτωση με laser, το στερεό τοποθετείται στο στερεοσκόπιο Leica M125 (σχήμα 4.14). Πρόκειται για ένα στερεομικροσκόπιο με ζουμ 12.5:1 που παρέχει ευρεία επισκόπηση του στερεού και της κατασκευαστικής λεπτομέρειας του με ανάλυση κάτω από 1.5 μm . Ανήκει στην κατηγορία των αποχρωματικών οπτικών συσκευών (apochromatic corrected stereomicroscope) οι οποίες επιτυγχάνουν χρωματική διόρθωση πολύ υψηλού επιπέδου.

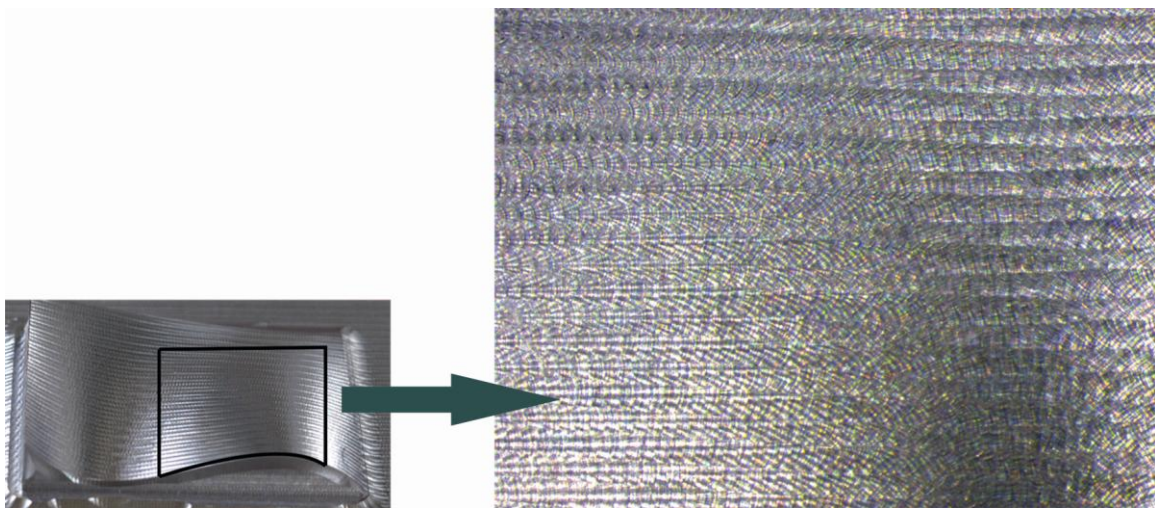
Όταν το φως περνά μέσα από ένα οπτικό σύστημα, εμφανίζεται ένα πρισματικό αποτέλεσμα (διάφορα μήκη κύματος του φωτός που ανακλώνται σε διαφορετικές εκτάσεις). Με την τεχνολογία των αποχρωματικών συσκευών, το δευτεροβάθμιο φάσμα (secondary spectrum), πρακτικά εξαλείφεται (σχήμα 4.15) ενώ επιτυγχάνεται εξαιρετικά καλή ανάλυση εικόνας (σχήμα 4.16) με πολύ υψηλή αντίθεση και δυνατότητα επισκόπησης στις τρεις διαστάσεις (κατά βάθος) (σχήμα 4.17).



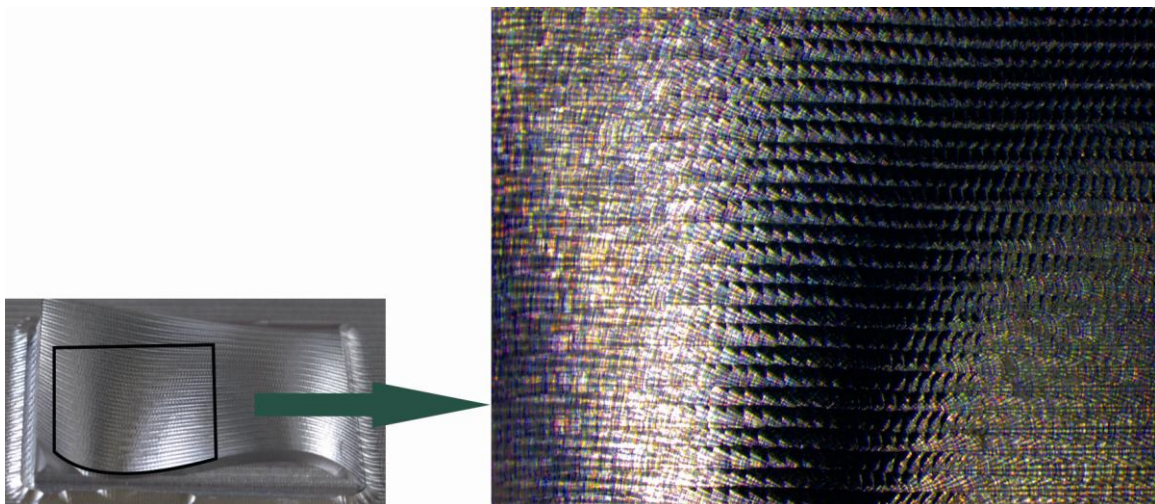
Σχήμα 4.15 : Εξάλειψη δευτεροβάθμιου φάσματος



Σχήμα 4.14 : Στερεοσκόπιο Leica



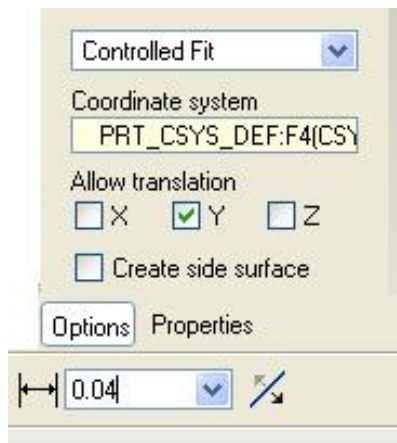
Σχήμα 4.16 : Τμήμα της επιφάνειας του στερεού αποτυπωμένο από το στερεοσκόπιο



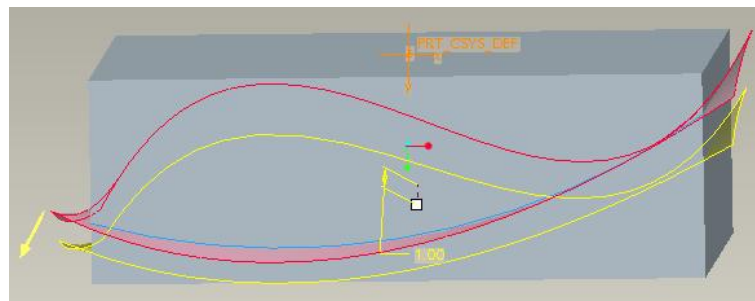
Σχήμα 4.17 : Τμήμα της επιφάνειας του στερεού σε 3d αποτύπωση από το στερεοσκόπιο

Εφ' όσον το στερεό έχει κατασκευαστεί, ακολουθεί η αποπεράτωση με χάραξη με laser με κοπή ενός στρώματος της εξωτερικής επάνω επιφάνειας του καλουπιού. Εδώ επιλέγεται να αφαιρεθεί ένα στρώμα πάχους 40 μm .

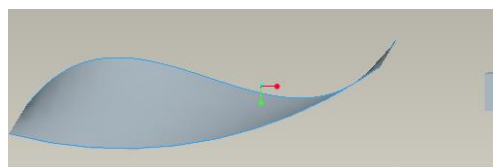
Στο στερεό που έχει κατασκευαστεί στο σχεδιαστικό πακέτο δίνοντας ένα κάθετο offset (σχήμα 4.18) στην επιφάνεια του στερεού προς τα κάτω (σχήμα 4.19), και με την εντολή solidify, εξάγεται το στρώμα 40 μm που θα αφαιρεθεί. Τοποθετείται και πυργίσκος τετραγωνικής διατομής όπως έχει περιγραφεί στο κεφάλαιο 3.2 διαστάσεων 1mm x 1mm ύψους 3mm και το αρχείο αποθηκεύεται στη μορφή .stl για να δοθεί σαν input στην laser engraving (σχήμα 4.20). Σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 3.2, ακολουθεί ο μηδενισμός του κομματιού και η κοπή του παραπάνω στρώματος με laser (σχήμα 4.21). Ο χρόνος κατεργασίας είναι περίπου 4 ώρες.



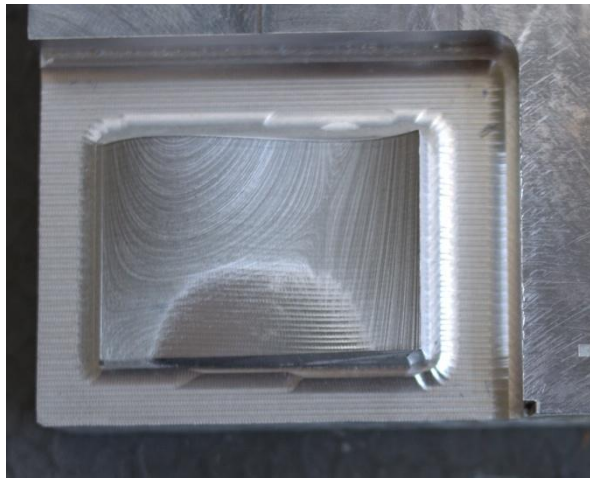
Σχήμα 4.18 : Ορισμός offset



Σχήμα 4.19 : Κάθετο offset προς τα κάτω που θα πάρει την τιμή 0.04mm

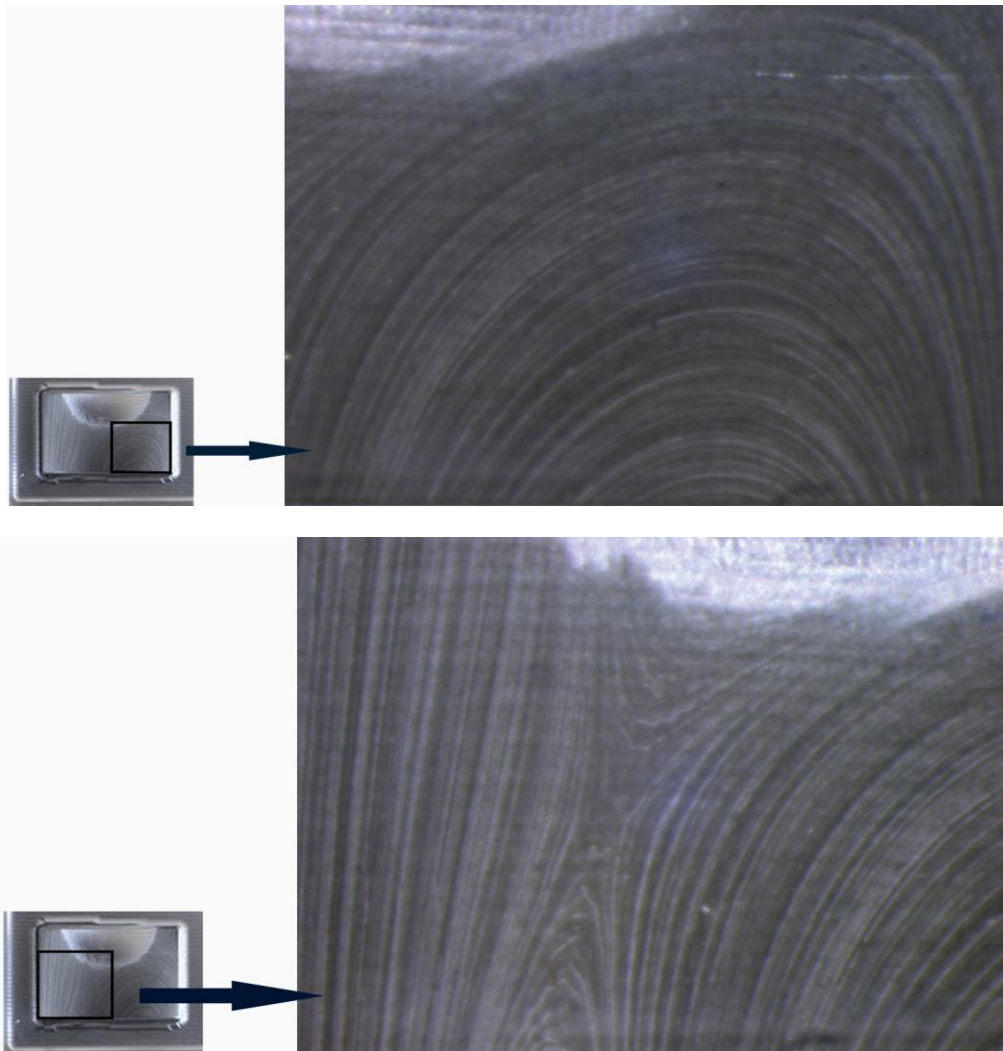


Σχήμα 4.20 : Τελικό στερεό που δίνεται σαν input στη laser για να αποπερατωθεί σε δύο διαφορετικές προοπτικές



Σχήμα 4.21 : Τελικό στερεό μετά την αποπεράτωση με laser

Ακολουθεί η στερεοσκοπική του κομματιού για την αποτύπωση της επιφάνειας (σχήμα 4.22).



Σχήμα 4.22 : Τμήματα της επιφάνειας όπως αποτυπώνονται στο στερεοσκόπιο

5. ΣΥΝΟΨΗ / ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάστηκε ο τρόπος με τον οποίο διασυνδέονται δυο διαφορετικές κατεργασίες - η εφαρμογή δηλαδή της αποπεράτωσης με χάραξη με laser σε μια ήδη κατεργασμένη επιφάνεια με φραιζάρισμα με τέτοιο τρόπο ώστε να εξασφαλίζεται η ακρίβεια της χάραξης στην υφιστάμενη επιφάνεια. Η μέθοδος που προτείνεται διαφέρει ανάλογα με το σχήμα και την πολυπλοκότητα του στερεού. Στη γενική περίπτωση, προτείνεται η κατασκευή δομής τετραγωνικής διατομής σε γνωστό και διακριτό σημείο που ορίζει ο σχεδιαστής και χρήστης ως «σημάδι» για τον ακριβή μηδενισμό. Για τις πειραματικές διαδικασίες μελετήθηκε και εφαρμόστηκε μεθοδολογία CAD/CAM με τη χρήση κατάλληλου λογισμικού. Τα πειράματα έγιναν στην ψηφιακά καθοδηγούμενη φραιζα DMU 50 eco και στην ψηφιακά καθοδηγούμενη εργαλειομηχανή χάραξης με laser LASERTEC 40. Παράλληλα εξετάστηκαν σε ένα βαθμό η αποτελεσματικότητα και η χρονική αποδοτικότητα της μεθόδου κατασκευής επιφάνειας με παράλληλη χάραξη με laser, όπως αναφέρονται παρακάτω στα συμπεράσματα.

- Το πρώτο συμπέρασμα εξάγεται από το πείραμα 1 και αφορά στην στερεή επιφάνεια που δέχεται σαν input η εργαλειομηχανή laser engraving : καθώς δίνεται σαν input το στρώμα τετραγωνικής διατομής, παρατηρείται διατήρηση του αναγλύφου, ενώ σκοπός είναι η αφαίρεσή του εφ' όσον αποτελεί συνέπεια «κακών συνθηκών» κοπής. Το γεγονός αυτό αποφεύγεται στο πείραμα 2 με την εξαγωγή του στρώματος αποπεράτωσης από το ίδιο το στερεό που σχεδιάστηκε για να κατασκευαστεί στη φραιζα.
- Το επόμενο συμπέρασμα αφορά στη χρονική αποδοτικότητα της μεθόδου : ο συνολικός χρόνος κατεργασιών του πειράματος 2 φτάνει τις 5 ώρες περίπου, μιας και το στερεό έχει σχετικά μεγάλο μέγεθος (επιφάνεια 20mm x 30mm), χρόνος ο οποίος κατά τα 4/5 του εξαντλείται στην αποπεράτωση με laser. Επομένως, η μέθοδος αυτή της κατασκευής του στερεού με διαδοχικές κατεργασίες, φαίνεται να είναι αποδοτικότερη από πλευράς χρόνου σε δομές αρκετά μικρής κλίμακας και σχετικά απλής μορφής. Ενδεικτικό είναι το γεγονός ότι ο συνολικός χρόνος των δύο κατεργασιών στο πείραμα 1 ανέρχεται στα 13 λεπτά ενώ ο χρόνος κατεργασίας του ίδιου τετραγώνου εξ' ολοκλήρου από φραιζάρισμα με βελτιωμένες συνθήκες κοπής ($D_{xy}=10\%$), ανέρχεται σε 30 λεπτά.

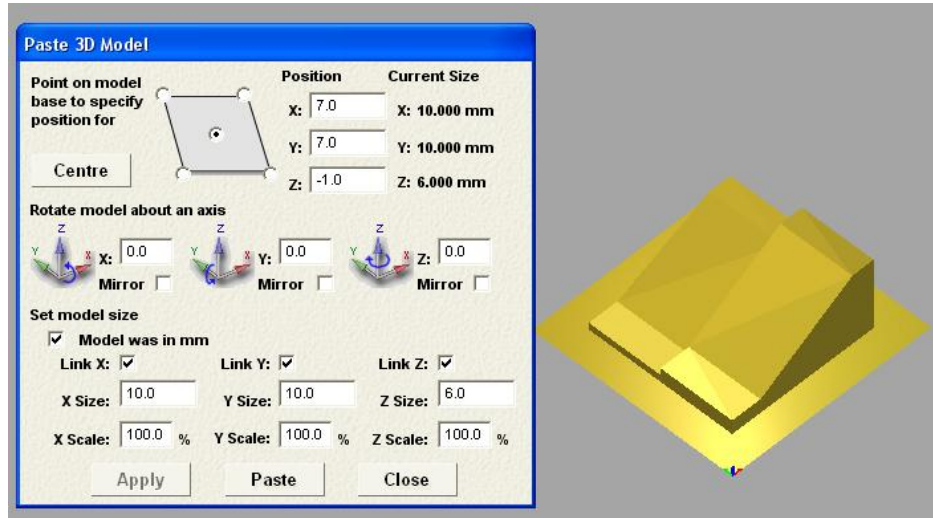
6. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ – ΕΓΧΕΙΡΙΔΙΟ ΧΡΗΣΗΣ CAD/CAM ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ

Παρακάτω παρουσιάζεται ένα σύντομο εγχειρίδιο χρήσης του λογισμικού CAD/DAM Artcam Pro 8 που χρησιμοποιήθηκε. Το εγχειρίδιο αφορά στο κομμάτι της εξαγωγής του g-κώδικα από ένα 3d στερεό που εισάγεται με import στο λογισμικό.

6.1 Εισαγωγή στερεού

Εντολή *File→import→3d model*

Εισάγεται ένα αρχείο της μορφής .stl και τοποθετείται από το χρήστη στο κατάλληλο σημείο ορίζοντας τις παραμέτρους στο παράθυρο **paste 3d model** με τις εντολές *allpy→paste*



6.2 Κατασκευή των toolpath

Σε σύνθετες μορφές είναι προτιμότερο να δημιουργούνται δύο ειδών toolpath. Ένα για την εκχόνδριση του δοκιμίου (“roughing”) και ένα για τη δημιουργία του τελικού αναγλύφου της επιφάνειας που πρόκειται να κατασκευαστεί (“surface”).

- ROUGHING TOOLPATH

αριστερό κλικ στο κουμπί *toolpaths* κάτω αριστερά στην οθόνη

Toolpaths

αριστερό κλικ στο κουμπί *Z lever roughing*



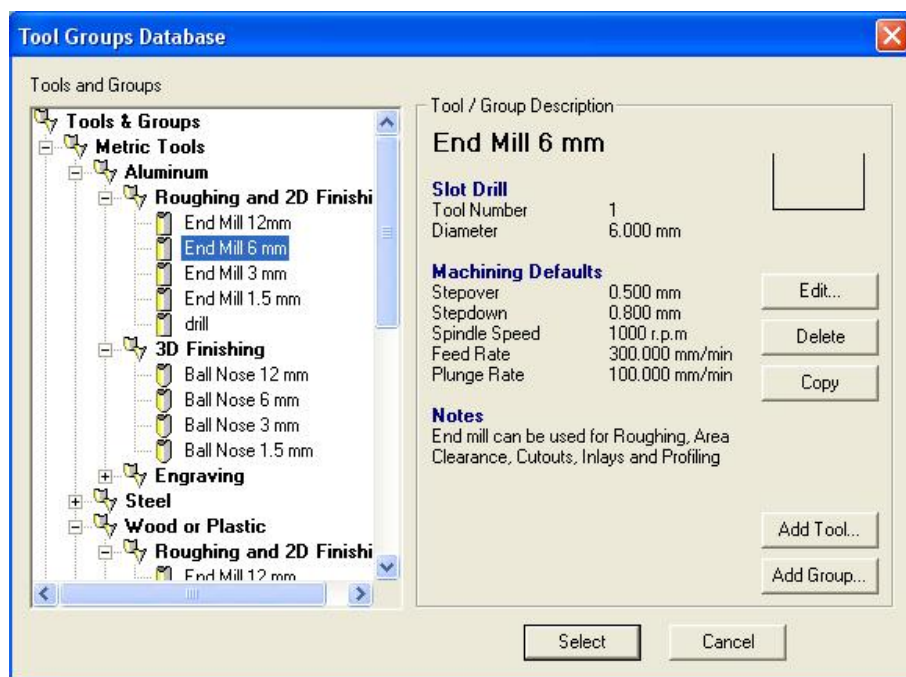
αριστερό κλικ στην επιλογή :



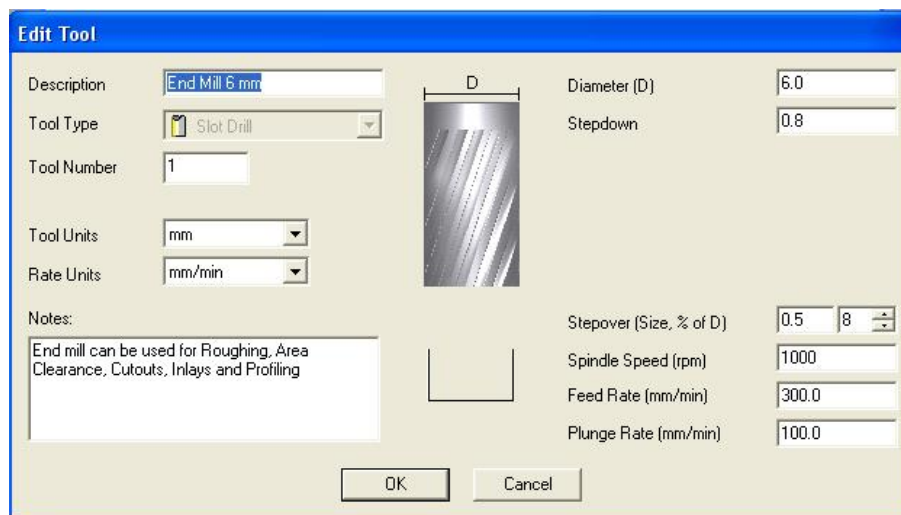
αριστερό κλικ στο κουμπί *select* της επιλογής roughing tool για επιλογή εργαλείου που θα χρησιμοποιηθεί στη δημιουργία του roughing toolpath



Στο παράθυρο **tool groups database** → επιλογή εργαλείου τύπου end mill

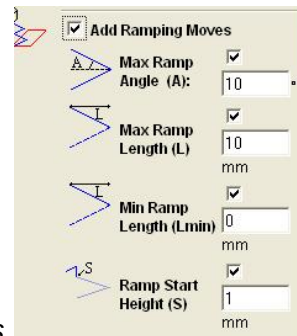


Επιλογή εργαλείου και αριστερό κλικ στο κουμπί *edit* → παράθυρο **edit tool** για ορισμό παραμέτρων



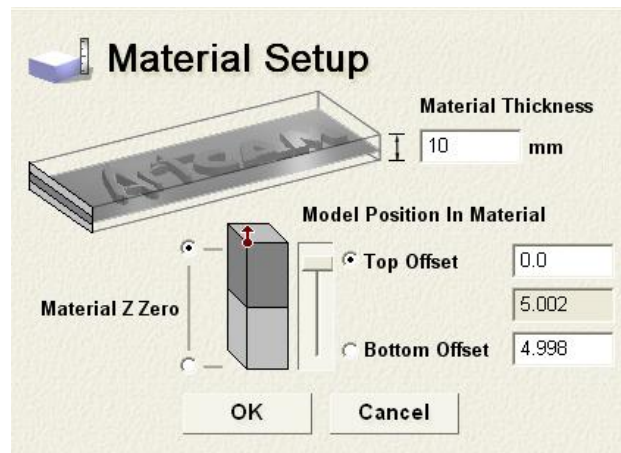
OK στο παράθυρο *edit tool*

select στο παράθυρο **tool groups database**



Αριστερό κλικ στην επιλογή *Add Ramping moves*

Επιλογή *Material*→ *select* για ορισμό του πάχους του τεμαχίου που θα χρησιμοποιηθεί για την δημιουργία του στερεού (*Material thickness*)→ OK



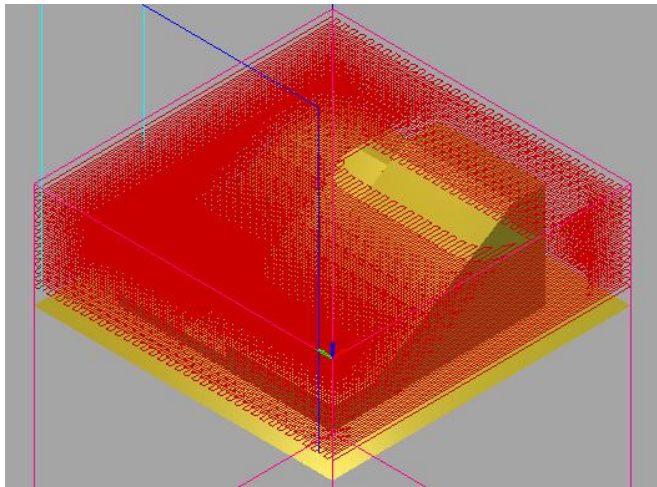
Επιλογή *Z slices*→ *apply*



Ορισμός *Machine safe z* (η κατακόρυφη απόσταση που θα πηγαίνει το εργαλείο κάθε φορά που θα ολοκληρώνεται ένα στρώμα αποπεράτωσης) και *Home position* (ένα σημείο στο χώρο απ' όπου θα ξεκινήσει το εργαλείο)

Επιλογή *Name*→ πληκτρολόγηση ονόματος *toolpath* → αρ. κλικ στο *later*

εντολή *close*



Σχήμα 6.1 : Roughing toolpath

- SURFACE TOOLPATH

αριστερό κλικ στο κουμπί *toolpaths* κάτω αριστερά στην οθόνη



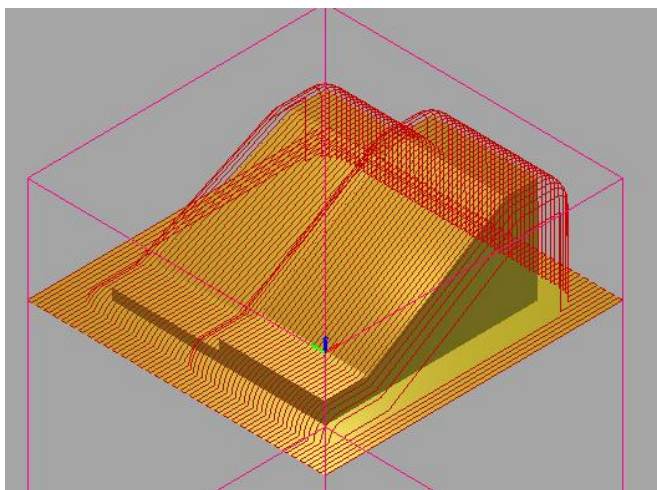
αριστερό κλικ στο κουμπί *machine relief*



αριστερό κλικ στην επιλογή :



αριστερό κλικ στο κουμπί *select* της επιλογής *tool* για επιλογή εργαλείου που θα χρησιμοποιηθεί στη δημιουργία του surface toolpath (ομοίως με παραπάνω αλλά εδώ επιλέγεται εργαλείο της μορφής ball nose)



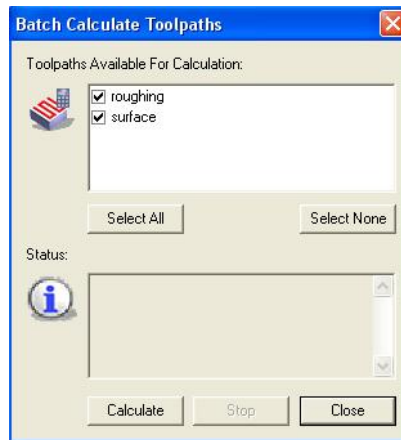
Σχήμα 6.2 : Surface toolpath

6.3 Υπολογισμός των toolpath

αριστερό κλικ στο κουμπί *Batch calculate toolpaths*



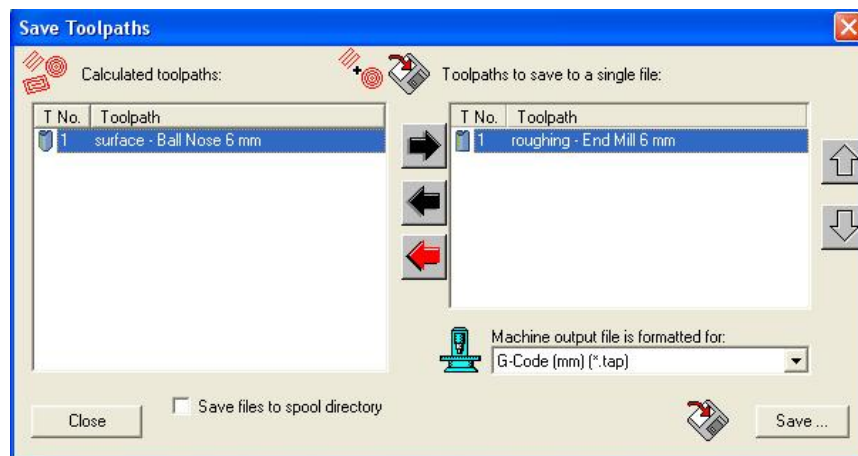
Στο παράθυρο Batch calculate toolpaths → *select all* → *calculate*



6.4 Αποθήκευση toolpath και εξαγωγή των toolpath

Στη γραμμή εργαλείων στο πάνω μέρος του παραθύρου → *Toolpaths* → *save toolpaths*

Στο παράθυρο save toolpaths → επιλογή *roughing* → αποθήκευση με την κατάληξη .tap



Στο παράθυρο *save toolpaths* → επιλογή *surface* → αποθήκευση με την κατάληξη .tap (Στο σημείο αυτό να τονιστεί ότι όταν χρησιμοποιούνται διαφορετικά εργαλεία σε κάθε toolpath, τα τελευταία πρέπει να αποθηκευτούν ως διαφορετικά αρχεία που περιέχουν στον g-κώδικα, διαφορετικά αποθηκεύονται στο ίδιο).

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Dimov S.S, Matthews C.W, Glanfield A, Dorrington P 2006 A roadmapping study in Multi-Material Micro Manufacture, 4M 2006, Grenoble, France
- [2] Huo D.H, Cheng K 2006 A dynamics-driven approach to precision machines design for micro-manufacturing and its implementation perspectives, 4M 2006, Grenoble, France
- [3] Slocum A.H 1992 Precision Machine Design, Englewood Cliffs, Prentice Hall
- [4] Popov K., Dimov S., Pham D.T., Minev R., Rosochowski A., Olejnik L., Richert M. 2006 The effects of material microstructure in micro-milling, 4M 2006, Grenoble, France
- [5] Vogler M.P. 2003 Modelling and analysis of machining performance in micro-end milling, Phd Thesis, University of Illinois
- [6] Lucca D.A, Seo Y.W 1993 Effect of tool edge geometry on energy dissipation in ultra-precision machining, Annals of the CIRP, 42/1:83-86
- [7] Kim C.J 2004 Mechanisms of chip formation and cutting dynamics in the micro-scale milling process, Phd Thesis, University of Michigan
- [8] Jackson M.J, Micro and Nanomanufacturing, Springer
- [9] E. Brinksmeier, R. Gläbe, O. Riemer, S. Twardy, Potentials of precision machining processes for the manufacture of micro forming molds, Microsyst Technol (2008) 14: 1983-1987
- [10] J.S. Wang, Y.D. Gong, G. Abba, K. Chen, J.S. Shi, G.Q. Cai, Surface generation analysis in micro end-milling considering the influences of grain, Microsyst Technol (2008)14:937-942
- [11] E. Demir, Taylor-based model for micro-machining of single crystal fcc materials including frictional effects – Application to micro-milling process, International Journal of Machine Tools & Manufacture 48 (2008) 1592-1598
- [12] G.L. Chern, Y.C. Chang, Using two-dimensional vibration cutting for micro-milling, International Journal of Machine Tools & Manufacture 46 (2006) 659-666
- [13] S. Heo, Y.H. Jeong, B.K. Min, S.J. Lee, Virtual EDM simulator: Three-dimensional geometric simulation of micro-EDM milling processes, International Journal of Machine Tools & Manufacture 49 (2009) 1029-1034
- [14] G. Bissacco, H.N. Hansen, J. Slunsky, Modelling the cutting edge radius size effect for force prediction in micro milling, CIRP Annals – Manufacturing Technology 57 (2008) 113-116
- [15] K. Popov, S. Dimov, A. Ivanov, D.T. Pham, E. Gandarias, New tool-workpiece setting up technology for micro-milling, Int J Adv Manuf Technol
- [16] S.Sreeram, A. Senthil Kumar, M. Rahman, M.T. Zaman, Optimization of cutting parameters in micro end milling operations under dry cutting conditions using genetic algorithms, , Int J Adv Manuf Technol (2006) 30: 1030-1039
- [17] C. Li, X. Lai, H. Li, J. Ni, Modeling of three-dimensional cutting forces in micro-milling, J Micromech Microeng 17 (2007) 671-678
- [18] H. Li, X. Lai, C. Li, J. Feng, J. Ni, Modeling and experimental analysis of the effects of tool wear, minimum chip thickness and micro tool geometry on the surface roughness in micro-end-milling, J Micromech Microeng 18 (2008) 025006 (12pp)
- [19] W.Y. Bao, I.N. Tansel, Modeling micro-end-milling operations. Part III: influence of tool wear, International Journal of Machine Tools & Manufacture 40 (2000) 2193-2211
- [20] M. Malekian, S.S. Park, M.B.G. Jun, Modeling of dynamic micro-milling cutting forces, International Journal of Machine Tools & Manufacture 49 (2009) 586-598

- [21] W.Y. Bao, I.N. Tansel, Modeling micro-end-milling operations. Part II: tool run-out, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 40 (2000) 2175-2192
- [22] W.Y. Bao, I.N. Tansel, Modeling micro-end-milling operations. Part I: analytical cutting force model, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 40 (2000) 2155-2173
- [23] S.S. Park, M. Malekian, Mechanistic modeling and accurate measurement of micro end milling forces, *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 58 (2009) 49-52
- [24] E. Uhlmann, S. Piltz, K. Schauer, Micro milling Of sintered tungsten-copper composite materials, *Journal of Materials Processing Technology* 167 (2005) 402-407
- [25] Rusnaldy. T.J. Ko, H.S. Kim, Micro-end-milling of single-crystal silicon, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 47 (2007) 2111-2119
- [26] D.P. Adams, M.J. Vasile, G. Benavides, A.N. Campbell, Micromilling of metal alloys with focused ion beam-fabricated tools, *Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology* 25 (2001) 107-113
- [27] P.M. Nellen, R. Brönnimann, Milling micro-structures using focused ion beams and its application to photonic components, *Meas Sci Technol* 17 (2006) 943-948
- [28] M.B.G. Jun, K. Bourne, R.E. DeVor, S.G. Kapoor, Estimation of effective error parameters in high-speed micro-endmilling, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 47 (2007) 1449-1454
- [29] I.N. Tansel, W.Y. Bao, N.S. Reen, C.V. Kropas-Hughes, Genetic tool monitor (GTM) for micro-end-milling operations, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 45 (2005) 293-299
- [30] L.M. Kumanchik, T.L. Schmitz, Improved analytical chip thickness model for milling, *Precision Engineering* 31 (2007) 317-324
- [31] K. Weinert, V. Petzoldt, Machining NiTi micro-parts by micro-milling, *Materials Science and Engineering A* 481-482 (2008) 672-675
- [32] A. Baschin, P. Kahnis, D. Biermann, Dynamic analysis of the micromilling process – influence of tool vibrations on the quality of microstructures, *Mat –wiss u Werkstofftech* 2008 39 No 9
- [33] K. Foy, Z. Wei, T. Matsumura, Y. Huang, Effect of tilt angle on cutting regime transition in glass micromilling, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 49 (2009) 315-324
- [34] G. Newby, S. Venkatachalam, S.Y. Liang, Empirical analysis of cutting force constants in micro-end-milling operations, *Journal of Materials Processing Technology* 192-193 (2007) 41-47
- [35] D. Huo, K. Cheng, F. Wardle, Design of a five-axis ultra-precision micro-milling machine – UltraMill. Part 1: holistic design approach, design considerations and specifications, *Int J Adv Manuf Technol*
- [36] D. Huo, K. Cheng, F. Wardle, Design of a five-axis ultra-precision micro-milling machine – UltraMill. Part 2: integrated dynamic modelling, design optimization and analysis, *Int J Adv Manuf Technol*
- [37] Rusnaldy, T.J. Ko, H.S. Kim, An experimental study of silicon using a micromilling machine, *Int J Adv Manuf Technol* (2008) 39: 85-91
- [38] K. Zhu, G.S. Hong, Y.S. Wong, W. Wang, Cutting force denoising in micro-milling tool condition monitoring, *International Journal of Production Research*, Vol 46, No 16, 15 August 2008, 4391-4408

- [39] S. Filiz, O. Burak Ozdoganlar, L.A. Romero, An Analytical Model for Micro-Endmill Dynamics, *Journal of Vibration and Control* 14(8): 1125-1150, 2008
- [40] W. Wang, S.H. Kweon, S.H. Yang, A study on roughness of the micro-end-milled surface produced by a miniature machine tool, *Journal of Materials Processing Technology* 162-163 (2005) 702-708
- [41] M.T. Zaman, A. Senthil Kumar, M. Rahman, S. Sreeram, A three-dimensional analytical cutting force model for micro end milling operation, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 46 (2006) 353-366
- [42] F.Z. Fang, H.Wu, X.D. Liu, Y.C. Liu, S.T. Ng, Tool geometry study in micromachining, *J Micromech Microeng* 13 (2003) 726-731
- [43] A.B.M.A. Asad, T. Masaki, M. Rahman, H.S. Lim, Y.S. Wong, Tool-based micro-milling, *Journal of Materials Processing Technology* 192-193 (2007) 104-211
- [44] K.P. Zhu, G.S. Hong, Y.S. Wong, A comparative study of feature selection for hidden Markov model-based micro-milling tool wear monitoring, *Machining Science and Technology* 12: 348-369
- [45] A. Aramcharoen, P.T. Mativenga, S. Yang, K.E. Cooke, D.G. Teer, Evaluation and selection of hard coatings for micro milling of hardened tool steel, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 48 (2008) 1578-1584
- [46] K. Zhu, Y.S. Wong, G.S. Hong, Multi-category micro-milling tool wear monitoring with continuous hidden Markov models, *Mechanical Systems and Signal Processing* 23 (2009) 547-560
- [47] M. Malekian, S.S. Park, M.B.G. Jun, Tool wear monitoring of micro-milling operations, *Journal of Materials Processing Technology* 209 (2009) 4903-4914
- [48] E.B. Brousseau, S.S. Dimov, D.T. Pham, Some recent advances in multi-material micro- and nano-manufacturing, *Int J Adv Manuf Technol*
- [49] A. Aramcharoen, P.T. Mativenga, Size effect and tool geometry in micromilling of tool steel, *Precision Engineering* 33 (2009) 402-407
- [50] C.D. Torres, P.J. Heaney, A.V. Sumant, M.A. Hamilton, R.W. Carpick, F.E. Pfefferkorn, Analyzing the performance of diamond-coated micro end mills, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 49 (2009) 599-612
- [51] D.T. Pham, S.S. Dimov, S. Bigot, A. Ivanov, K. Popov, Micro-EDM – recent developments and research issues, *Journal of Materials Processing Technology* 149 (2004) 50-57
- [52] J.C. Miao, G.L. Chen, X.M. Lai, H.T. Li, C.F. Li, Review of dynamic issues in micro-end-milling, *Int J Adv Manuf Technol* (2007) 31: 897-904
- [53] J. Chae, S.S. Park, T. Freiheit, Investigation of micro-cutting operations, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 46 (2006) 313-332
- [54] T. Novakov, M.J. Jackson, Chatter problems in micro- and macrocutting operations, existing models, and influential parameters – a review, *Int J Adv Manuf Technol*
- [55] I.N. Tansel, T.T. Arkan, W.Y. Bao, N. Mahendrakar, B. Shisler, D. Smith, M. McCool, Tool wear estimation in micromachining. Part II: neural-network-based periodic inspector for non-metals, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 40 (2000) 609-620
- [56] I.N. Tansel, B. Ozcelik, W.Y. Bao, P. Chen, D. Rincon, S.Y. Yang, A. Yenilmez, Selection of optimal cutting conditions by using GONNS, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 46 (2006) 26-35

- [57] B. Denkena, H.-W. Hoffmeister, M. Reichstein, S. Illenseer, M. Hlavac, Micro-machining processes for microsystem technology, *Microsyst Technol* (2006) 12: 659-664
- [58] <http://www.mikrotools.com/apps/page.php?id=12&frmpage=products>
- [59] <http://www.mikrotools.com/apps/technology.php>
- [60] <http://www.willemin-macodel.com/en/products/milling-turning-from-bar-stock/408mt---fraisage-tournage-en-barres-6-%C3%A0-7-axes>
- [61] <http://www.directindustry.com/prod/willemin-macodel/bar-stock-fed-6-7-axis-swiveling-spindle-cnc-machining-centers-16496-466321.html>
- [62] http://www.interempresas.net/FeriaVirtual/Catalogos_y_documentos/193628/Catalogo_general_productos.pdf
- [63] <http://www.mmsonline.com/articles/getting-to-submicron-accuracy>
- [64] <http://www.kugler-precision.com/index.php?Micro-machining-systems>
- [65] Machines and microcomponents for micromachining , catalogue Kugler
- [66] http://www.kern-microtechnic.com/upload/media/kern_micro_e.pdf
- [67] http://www.moriseiki.com/english/products/mcv/05/ultimill_index.html
- [68] <http://www.m3.tuc.gr/>
- [69] Χρήστος Μουστεράκης, Προσομοίωση μετωπικού φραιζαρίσματος με πεπερασμένα στοιχεία, Μεταπτυχιακή διατριβή, Πολυτεχνείο κρήτης 2012