



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
Τομέας Τεχνολογίας των Κατεργασιών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΤΙΛΒΩΣΗΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΛΟΥΠΙΩΝ ΣΕ ΚΕΝΤΡΑ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ CNC ΤΡΙΩΝ ΑΞΟΝΩΝ

Όνοματεπώνυμο: Αβράμπος Παναγιώτης

Επιβλέπων καθηγητής: Γεώργιος -Χριστόφορος Βοσνιάκος

Αθήνα, Ιούλιος 2015

Περιεχόμενα

- Εισαγωγικά
- Γεωμετρικά στοιχεία
- Κατασκευή βάσεων
- Πειράματα
- Συμπεράσματα

Εισαγωγικά-σκοπός εργασίας

- Χειροκίνητη στίλβωση-χρονοβόρα και επίπονη
- Αύξηση ταχύτητας μέσω αυτοματοποίησης
- Αποφυγή λαθών και επακόλουθης καταστροφής τεμαχίων
- Οφέλη σχετικά με την υγεία (αποφυγή εισπνοής σκόνης χάλυβα-πλαστικού, αποφυγή επαφής διαμανταλοιφών με τα χέρια)
- Επίτευξη μέγιστης διαστασιακής ακρίβειας (εκμετάλλευση ακρίβειας κίνησης κέντρου CNC)

Εισαγωγικά-Ορισμός στίλβωσης

- Επιφανειακή συμπύκνωση μορίων στην κατεργαζόμενη επιφάνεια
- Καλύτερη σε βαμμένα μέταλλα (λόγω διάταξης μορίων)
- Διακρίνεται σε εξώλκευσης (300-37 μm), παρουσίασης αντικειμένου (32-7 μm) και ακριβείας (7-0,04 μm)
- Γίνεται με εργαλεία όπως δισκάκια, πέτρες και δακτύλιοι, με ή χωρίς χρήση διαμανταλοιφών
- Εμβάθυνση στη χρήση στιλβωτικών δακτυλίων

Περιεχόμενα

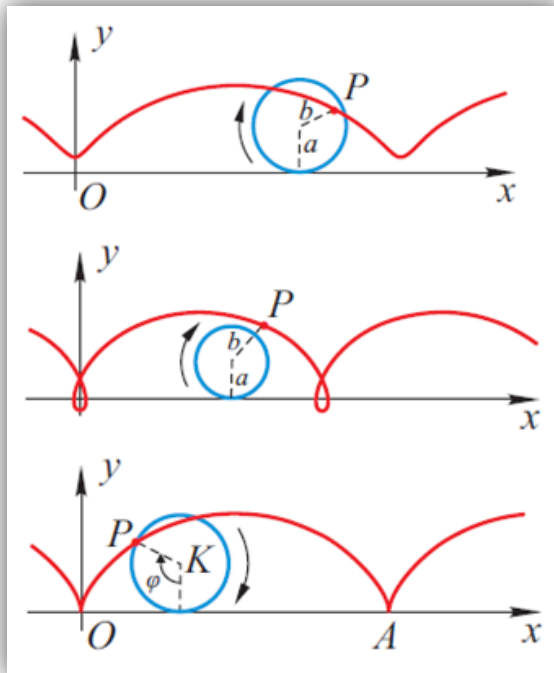
- Εισαγωγικά
- Γεωμετρικά στοιχεία
- Κατασκευή βάσεων
- Πειράματα
- Συμπεράσματα

Γεωμετρικά στοιχεία-Βασική ιδέα

- Κατασκευή καλουπιού (στη φρέζα CNC HAAS) με G-code παραγόμενο μέσω SolidCAM
- Χρήση αυτού του G-code ως εξής:
 - ✓ Προβολή του tool-path στο επίπεδο Oxy
 - ✓ Χρήση του ως guide curve για την εφαρμογή τροχοειδούς pattern κατάλληλων παραμέτρων
 - ✓ Επαναπροβολή του τροχοειδούς pattern στην αρχική επιφάνεια του καλουπιού
 - ✓ Χρήση 2D Model για καθορισμό του νέου G-code

Γεωμετρικά στοιχεία-Ορισμός τροχοειδούς

- Κύκλος ακτίνας a
- Ευθύγραμμο τμήμα μήκους b «δεμένο» πάνω στον κύκλο
- Κύλιση κύκλου επί “guide curve” (Οx άξονας στο σχήμα)
- Η τροχοειδής διαγράφεται από το άκρο του ευθύγραμμου τμήματος



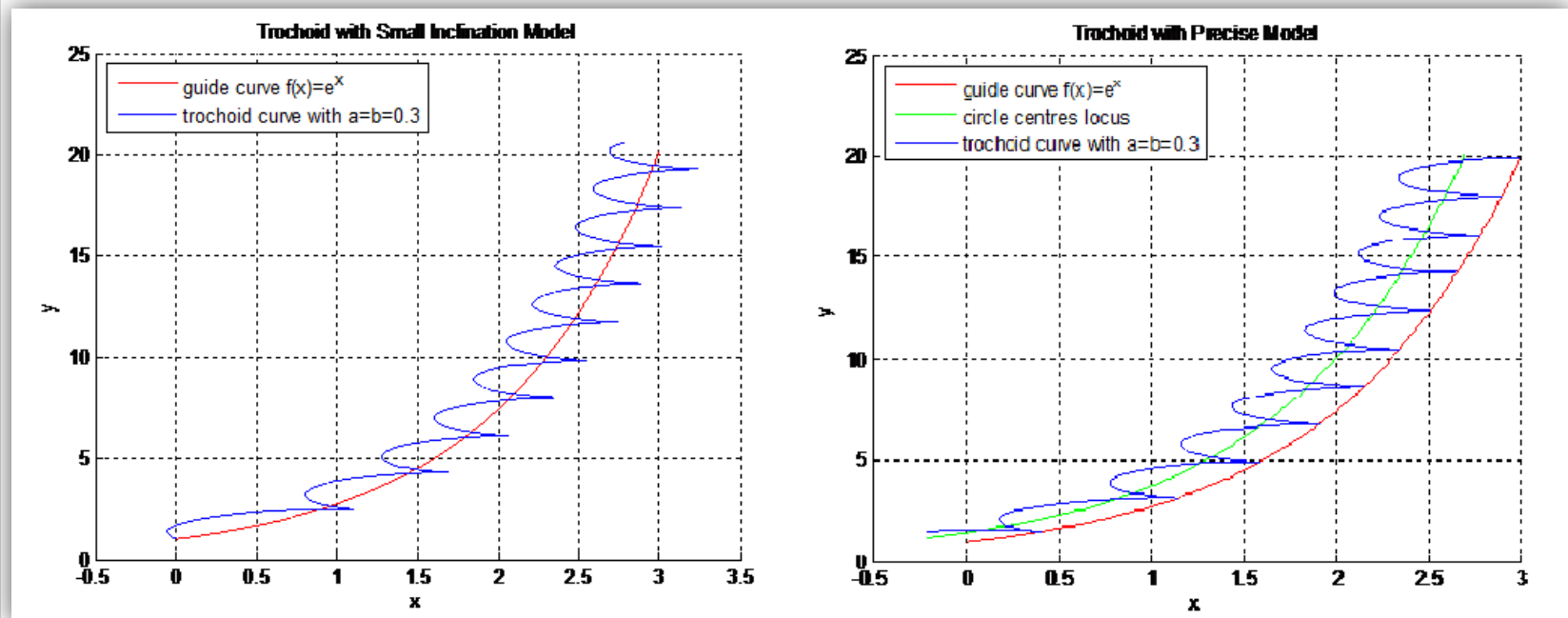
- Τα a και b καλούνται «παράμετροι τροχοειδούς»
- Η guide curve μπορεί να είναι οποιαδήποτε καμπύλη του επιπέδου Οxy
- Αν $a=b$, η τροχοειδής ονομάζεται «κυκλοειδής»
- Σχέσεις:

$$x_{tr} = a\varphi - b\sin\varphi$$

$$y_{tr} = a - b\cos\varphi$$

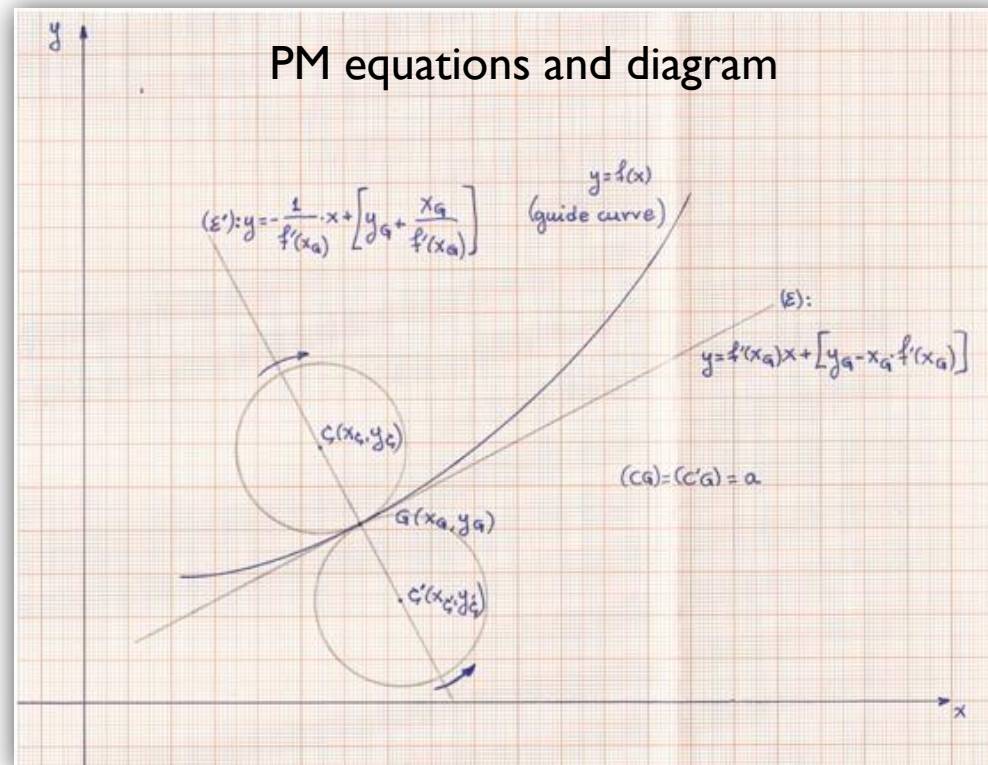
Γεωμετρικά στοιχεία-Μοντέλα χάραξης τροχοειδούς (1/2)

- Small Inclination Model (προσεγγιστικό, για σχετικά μικρές κλίσεις της guide curve)
- Precise Model (ακριβές, για οποιαδήποτε τιμή κλίσης της guide curve)
- Το SIM υστερεί σε ακρίβεια, αλλά υπερτερεί σε ταχύτητα υπολογισμού



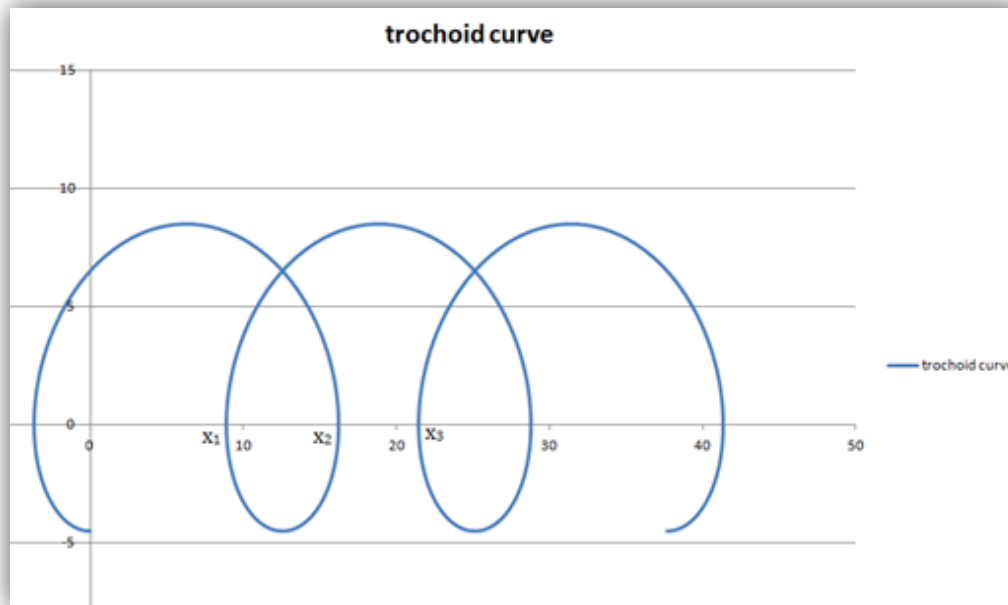
Γεωμετρικά στοιχεία-Μοντέλα χάραξης τροχοειδούς (2/2)

- Παραδοχή SIM \rightarrow Η guide curve εφάπτεται σταθερά στο κάτω σημείο της περιφέρειας του κύκλου
- Μέθοδος PM \rightarrow Υπολογισμός της θέσης του κέντρου του κυλιόμενου κύκλου μέσω της καθέτου στην guide curve στο σημείο επαφής και της ακτίνας a



Γεωμετρικά στοιχεία-Επιλογή παραμέτρων τροχοειδούς (1/4)

- Μελέτη σε τροχοειδή με guide curve τον άξονα Ox
- Χρήση δακτυλίων ως εργαλεία στίλβωσης
- Απαίτηση πληρότητας και ομοιομορφίας κάλυψης γυαλιζόμενης επιφάνειας
- Μαθηματική έκφραση περιορισμών επί του άξονα Ox με βάση τα κρίσιμα σημεία x_1 , x_2 , x_3



- Πληρότητα

$$x_2 - x_1 \leq D_{brass/diamond}$$

$$x_2 - x_1 \leq D_{plastic}$$

$$x_3 - x_2 \leq D_{brass/diamond}$$

$$x_3 - x_2 \leq D_{plastic}$$

- Ομοιομορφία

$$x_3 - x_1 \geq D_{brass/diamond}$$

$$x_3 - x_1 \geq D_{plastic}$$

Γεωμετρικά στοιχεία-Επιλογή παραμέτρων τροχοειδούς (2/4)

- Αναλυτικός προσδιορισμός x_1, x_2, x_3 και των διαφορών τους
- Διαγραμματική συναλήθευση ανισοτικών σχέσεων των περιορισμών για τυχαία επιλογή a
- Επιλογή παραμέτρου b που ικανοποιεί τους περιορισμούς (αν υπάρχει)
- Σχέσεις:

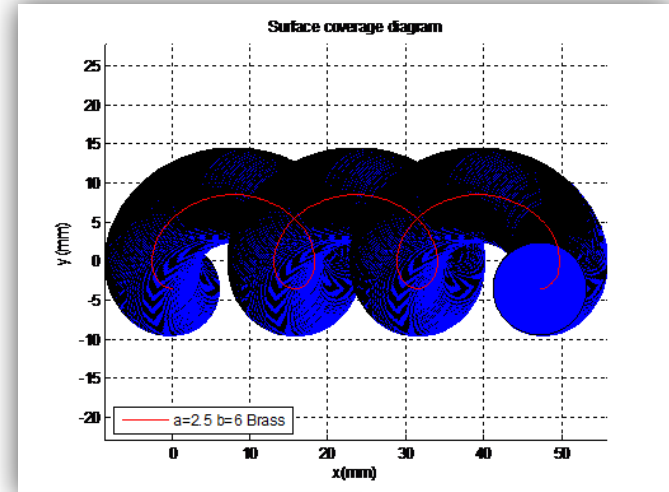
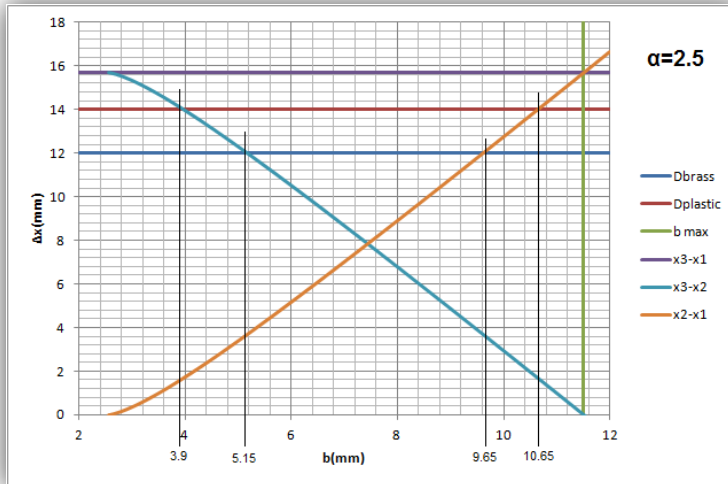
$$(x_2 - x_1) = -2a \cdot \arccos\left(\frac{a}{b}\right) + 2b \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{a}{b}\right)^2}$$

$$(x_3 - x_2) = 2\pi a + 2a \cdot \arccos\left(\frac{a}{b}\right) - 2b \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{a}{b}\right)^2}$$

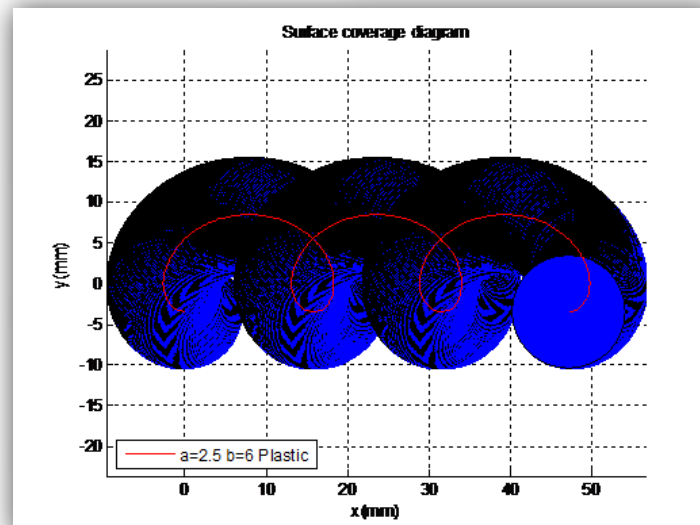
$$(x_3 - x_1) = 2\pi a$$

Γεωμετρικά στοιχεία-Επιλογή παραμέτρων τροχοειδούς (3/4)

- Επιλογή b και διαγραμματική εξακρίβωση ορθότητας επιλογής



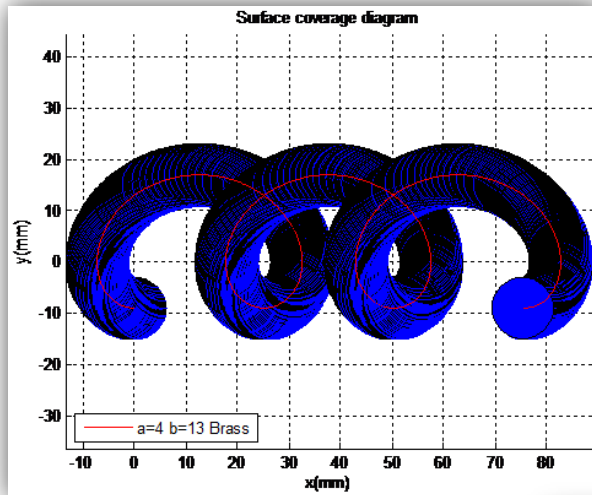
- Διάγραμμα προσδιορισμού αποδεκτής περιοχής b για $\alpha=2.5$



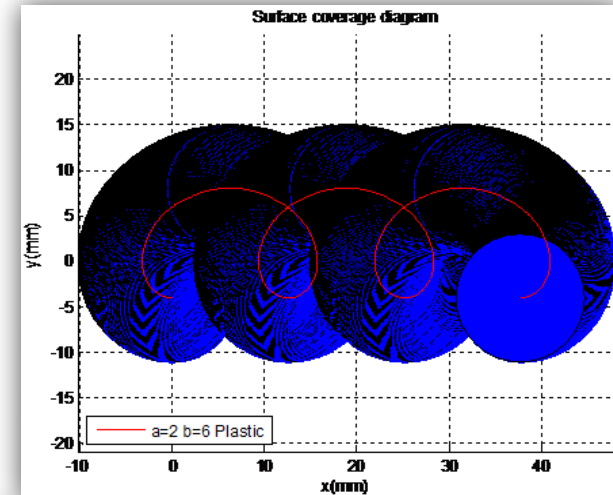
- Διαγραμματική απόδειξη πλήρους και ομοιόμορφης κάλυψης

Γεωμετρικά στοιχεία-Επιλογή παραμέτρων τροχοειδούς (4/4)

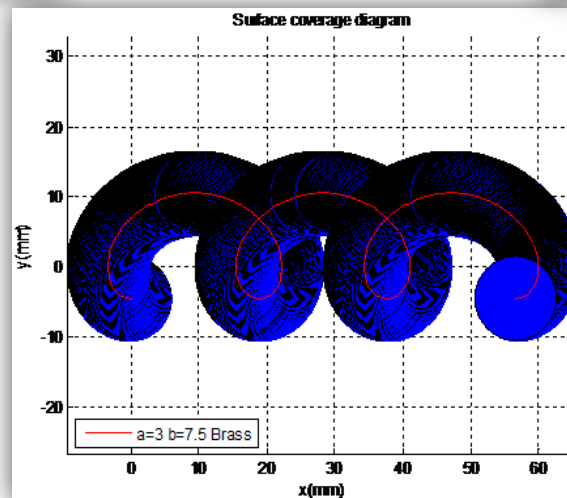
- Διαγραμματική απεικόνιση παραβίασης διαφορετικών περιορισμών



- Μη πλήρης κάλυψη μεταξύ x_2 και x_3



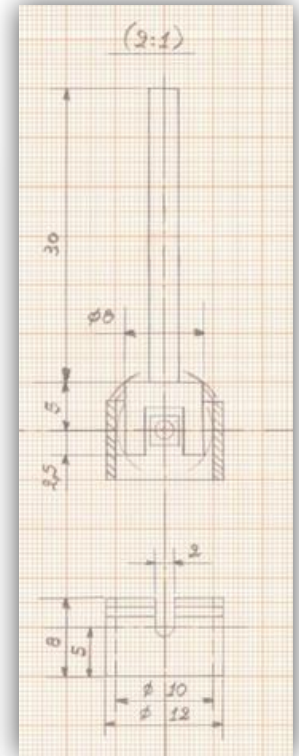
- Μη πλήρης κάλυψη μεταξύ x_1 και x_2



- Μη ομοιόμορφη κάλυψη (υπερκάλυψη) μεταξύ x_1 και x_2

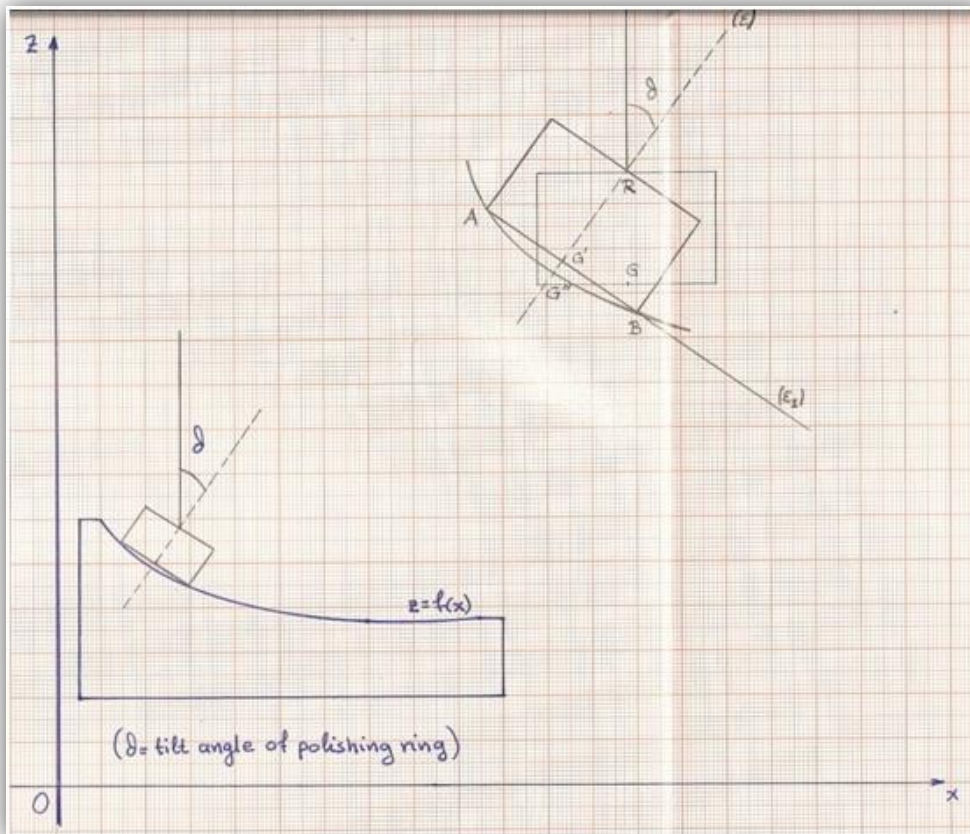
Γεωμετρικά στοιχεία-2D Model (1/4)

- Μεταβλητή γεωμετρία εργαλείου, λόγω στροφής του δακτυλίου ως προς το mandrel κατά x και y
- Μέγιστη γωνία στροφής υπολογίστηκε σε 15,72 μοίρες
- Προσδιορισμός σημείων G-code στίλβωσης μέσω των προφίλ επιφανείας
- Χρήση τομών με επίπεδα $x=c$ ή $y=c$
- (Πάνω) Mandrel
- (Κάτω-από αριστερά) Diamond, Brass και Plastic polishing rings



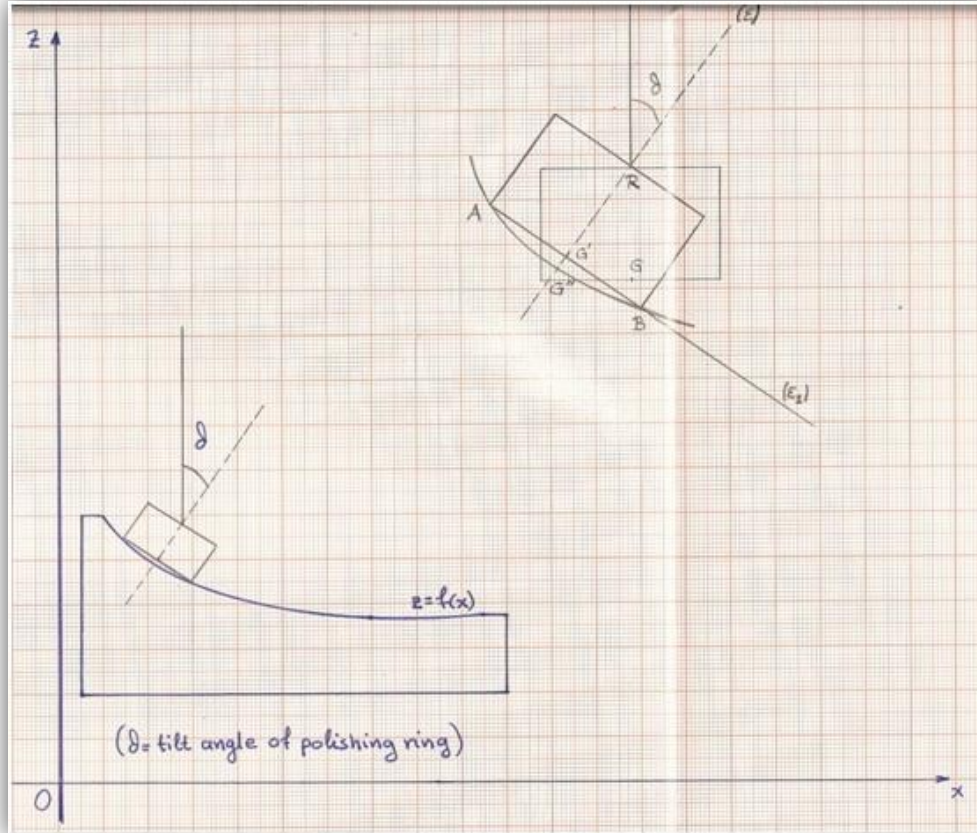
Γεωμετρικά στοιχεία-2D Model (2/4)

- 3 D.O.F. (κινήσεις κατά x, y, z) από το κέντρο κατεργασιών
- 2 D.O.F. από το ζεύγος mandrel-polishing ring (περιστροφές κατά x, y)
- Προγραμματισμός σταθερού ως προς την άτρακτο σημείου του χώρου (G)



- Επιλέγεται ως G το κέντρο του κυκλικού δίσκου που καλύπτει ο δακτύλιος όταν εφάπτεται σε οριζόντιο επίπεδο
- Δεδομένα το σημείο G'' και η $z = f(x)$
- $G'' = \Sigma.T.$ άξονα δακτυλίου με προφίλ επιφανείας
- Ζητούμενα το G και η γωνία θ

Γεωμετρικά στοιχεία-2D Model (3/4)



- Σχέσεις:

$$(\varepsilon): z = -\frac{1}{\tan\theta} \cdot x + [z_{G''} + \frac{1}{\tan\theta} \cdot x_{G''}] \quad (1)$$

$$x_{G'} = \frac{x_A + x_B}{2} \quad (2)$$

$$z_{G'} = \frac{z_A + z_B}{2} = \frac{f(x_A) + f(x_B)}{2} \quad (3)$$

$$\tan\theta = \frac{f(x_B) - f(x_A)}{x_B - x_A} \quad (4)$$

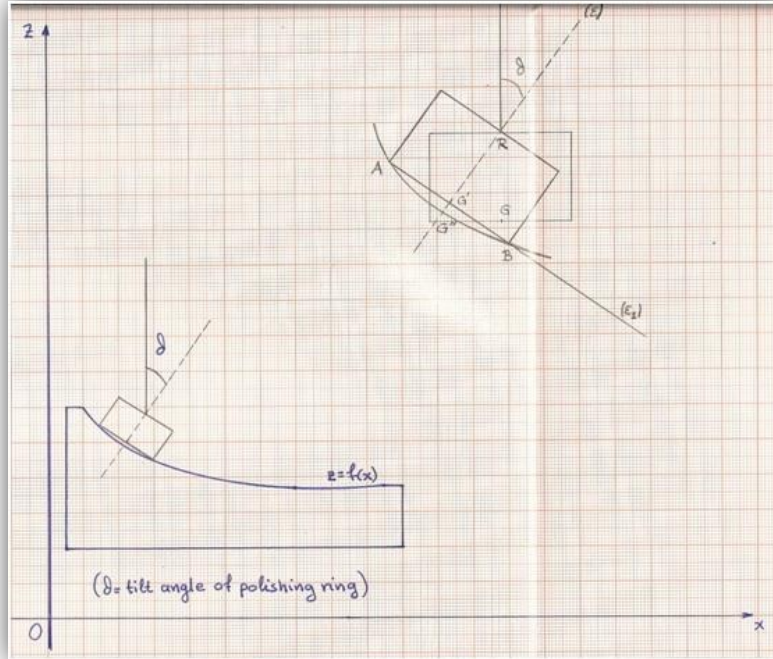
- Αντικατάσταση στην (1) με τις (2), (3) και (4) δίνει την (5):

$$\frac{f(x_A) + f(x_B)}{2} = \frac{x_A - x_B}{f(x_B) - f(x_A)} \cdot \frac{x_A + x_B}{2} + [z_{G''} + \frac{x_B - x_A}{f(x_B) - f(x_A)} \cdot x_{G''}] \quad (5)$$

$$(x_B - x_A)^2 + [f(x_B) - f(x_A)]^2 = D_{ring,o}^2 \quad (6)$$

- Επίλυση συστήματος (5) και (6) με Newton-Raphson \rightarrow υπολογισμός x_A, x_B, θ, G'

Γεωμετρικά στοιχεία-2D Model (4/4)

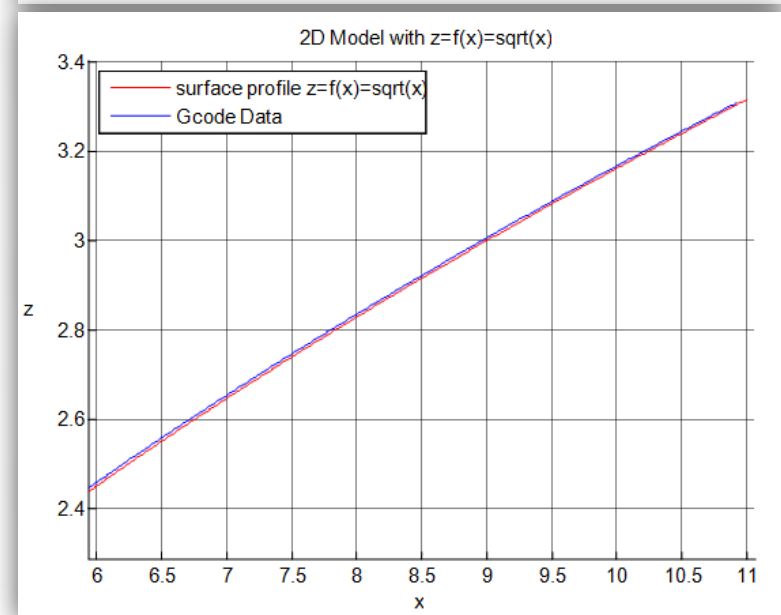
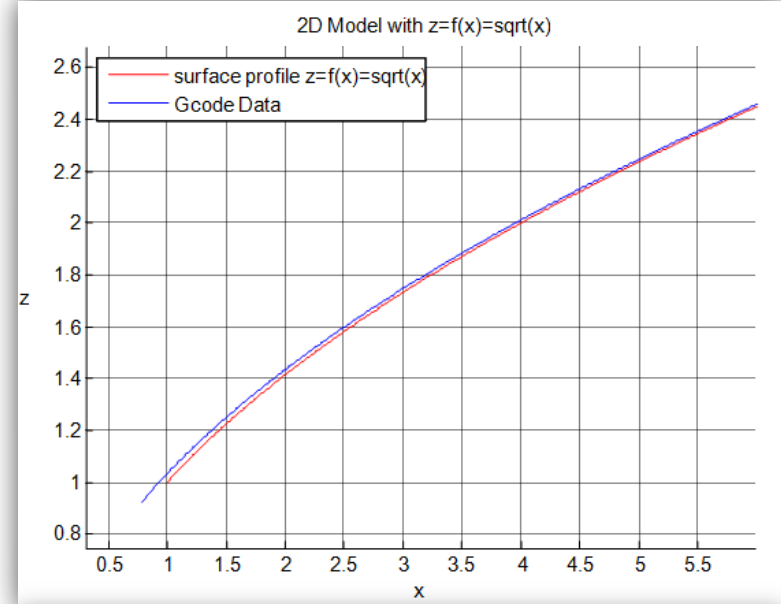


- Σχέσεις:

$$z_R = -\frac{1}{\tan\theta} \cdot x_R + \left[z_{G''} + \frac{1}{\tan\theta} \cdot x_{G''} \right] \quad (7)$$

$$(x_{G'} - x_R)^2 + (z_{G'} - z_R)^2 = (G'R)^2 \quad (8)$$

- (7), (8) $\rightarrow R \rightarrow G$
- Δεξιά διαγραμματική απεικόνιση αποτελεσμάτων κώδικα 2D Model



Περιεχόμενα

- Εισαγωγικά
- Γεωμετρικά στοιχεία
- Κατασκευή βάσεων
- Πειράματα
- Συμπεράσματα

Κατασκευή βάσεων-1^η βάση



Κατασκευή βάσεων-2^η βάση



Κατασκευή βάσεων-Σύγκριση βάσεων

1^η βάση:

- Μη αξονοσυμμετρική-εισαγωγή καμπτικών ροπών στη διάταξη
- Απόλυτα άκαμπτη (με αποστάτες) ή με μικρή ενδοτικότητα (με ελατήρια θλίψης)
- Χρήση της με δισκάκια από σφυριδόπανο ή με πέτρες στίλβωσης (λαστιχόπετρες κλπ)

2^η βάση:

- Αξονοσυμμετρική περί του άξονα του κέντρου κατεργασιών
- Υπερευαίσθητη σε μεταβολές δύναμης (γραμμικά ρουλεμάν-ελαστικοί σύνδεσμοι ή ελατήρια έντασης)
- Χρήση της με δακτυλίους στίλβωσης και διαμανταλοιφές (πολύ μικρές δυνάμεις)

Κοινό: Ταύτιση άξονα περιστροφής grinder με άξονα κέντρου κατεργασιών CNC-δυνατότητα ακολούθησης κάθε tool-path

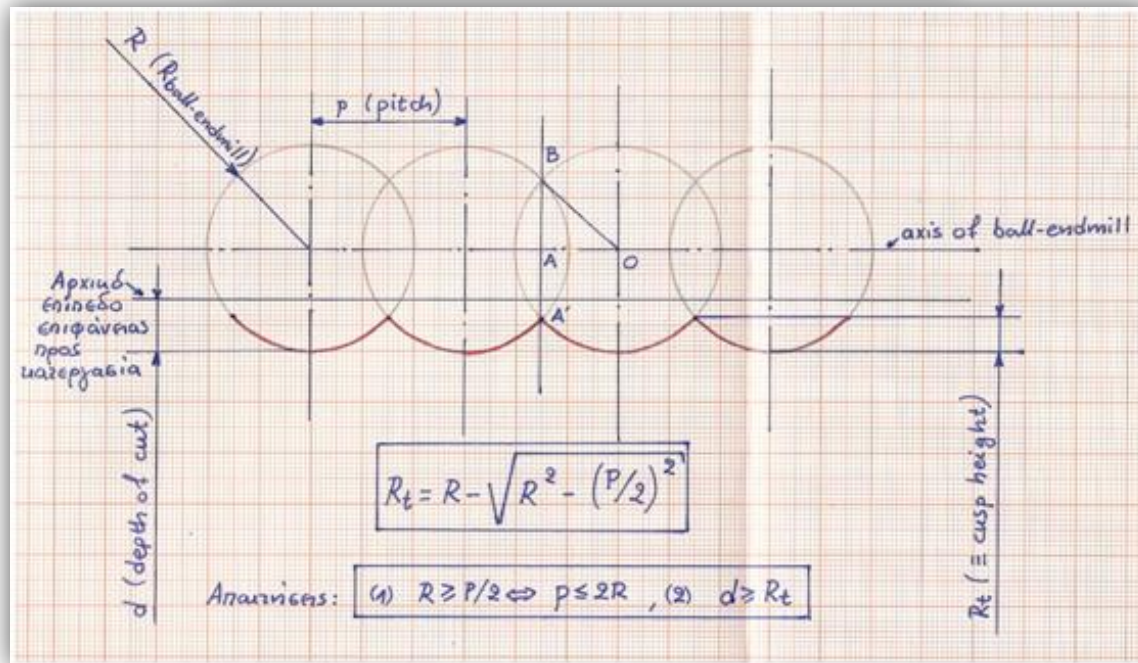
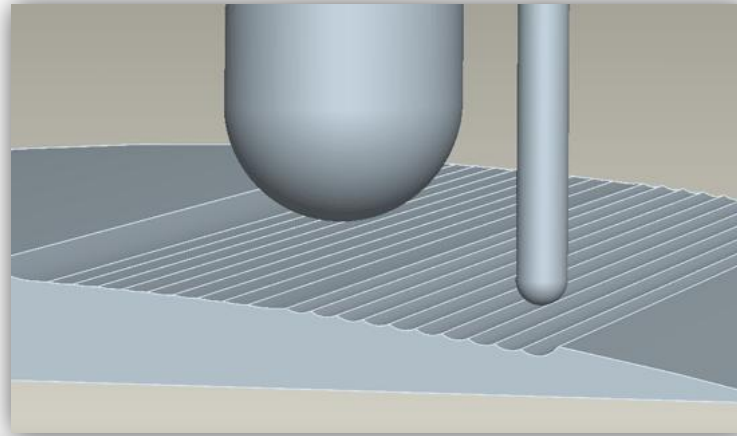
Περιεχόμενα

- Εισαγωγικά
- Γεωμετρικά στοιχεία
- Κατασκευή βάσεων
- Πειράματα
- Συμπεράσματα

Πειράματα-Βασικά στοιχεία

- Χειροκίνητα (σε πομπέ από EDM ή σε επίπεδα δοκίμια με αυλακώσεις) και αυτοματοποιημένα (μόνο σε επίπεδα με αυλακώσεις δοκίμια)
- Αρχική τραχύτητα σε επίπεδο δοκίμιο-αυλακώσεις με P-pattern G-code και σφαιρικό κονδύλι
- Εκτίμηση τραχύτητας αυλακώσεων γεωμετρικά και με τύπο κατασκευαστή κονδυλίου πριν τη μέτρηση
- Εκχόνδριση-διαμαντένιος δακτύλιος-διαστασιακή ακρίβεια
- Διαδοχικά στάδια στίλβωσης με μπρούντζινο ή πλαστικό δακτύλιο και διαμανταλοιφές
- Διαγραμματική απεικόνιση απομείωσης τραχύτητας και βάρους δοκιμίου με το πέρας κάθε φάσης

Πειράματα-Δημιουργία αυλακώσεων

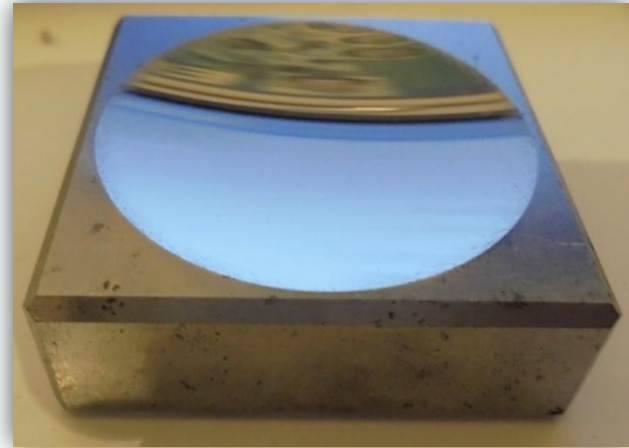
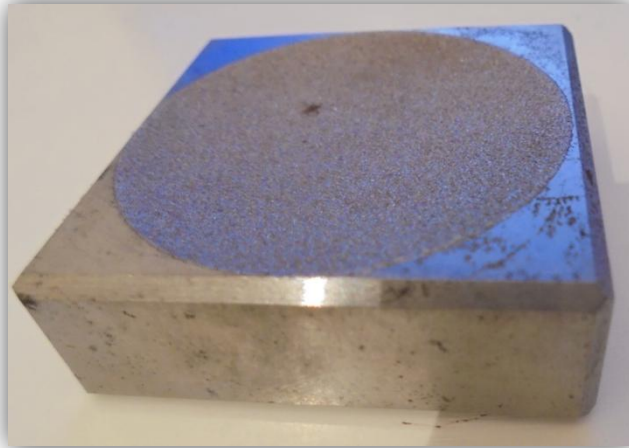


Παρατήρηση: Τραχύτητα χειρότερη της γεωμετρικά υπολογισμένης λόγω ταλαντώσεων κονδυλίου και μηχανής και πλαστικής παραμόρφωσης στην περιοχή της κατεργασίας

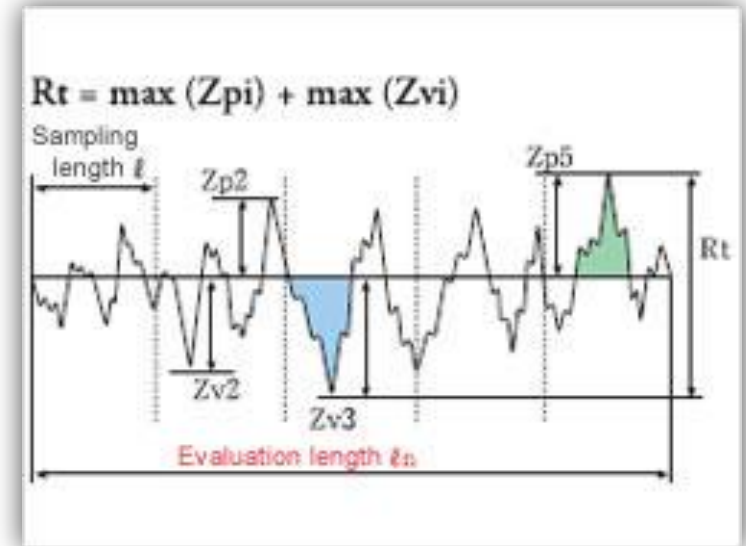
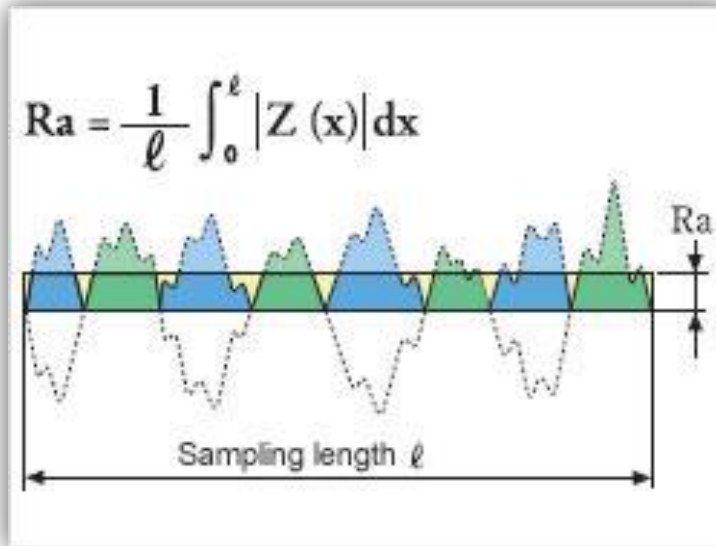
Πειράματα-Διαδοχικά στάδια γυαλίσματος

- Εκχόνδριση- «στεγνή»- χωρίς αλοιφή- Diamond ring- καθορισμός διαστασιακής ακρίβειας
- 15 μm αλοιφή- «υγρή»- Brass ring (έλεγχος ποιότητας με πλαστικό)
- 10 μm αλοιφή- «υγρή»- Brass ring (έλεγχος ποιότητας με πλαστικό)
- 7 μm αλοιφή- «υγρή»- πρώτα Brass και μετά Plastic ring
- 3 μm αλοιφή- «στεγνή»- πρώτα Plastic ring και μετά Plastic ring με κετσέ-πανί-χαρτί κουζίνας
- Diamond και Plastic rings με υψηλές στροφές (~ 15000 RPM) και μεγάλη κάθετη δύναμη ($\sim 5.5-9.0$ N)
- Brass rings με χαμηλές στροφές ($\sim 500-1500$ RPM) και μικρή κάθετη δύναμη ($\sim 0.5-2.0$ N)

Πειράματα-Χειροκίνητα Πειράματα σε πομπέ (κοίλο) δοκίμιο (από EDM)

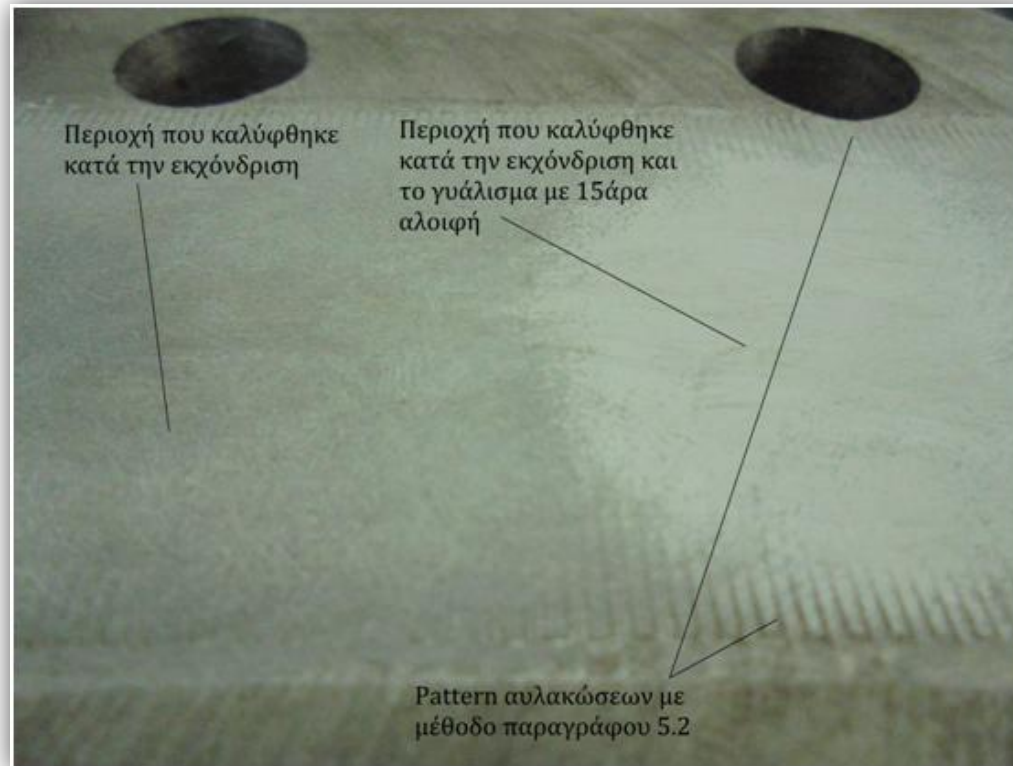


Πειράματα-Χρησιμοποιούμενα είδη τραχυτήτων



- Μέση τραχύτητα (αριστερά) και Peak-to-Valley τραχύτητα (δεξιά)
- Μέτρηση με τραχύμετρο Surtronic 3+ μετά από κάθε στάδιο στίλβωσης

Πειράματα-Χειροκίνητα Πειράματα σε επίπεδο δοκίμιο με αυλακώσεις (1/3)



- Μικροδονήσεις («χοροπηδητό») κατά την εκχόνδριση (μικρογρέζια)
- Ανομοιομορφίες
- Περιοχές με «στίγματα»
- Συμπέρασμα

Πειράματα-Χειροκίνητα Πειράματα σε επίπεδο δοκίμιο με αυλακώσεις (2/3)

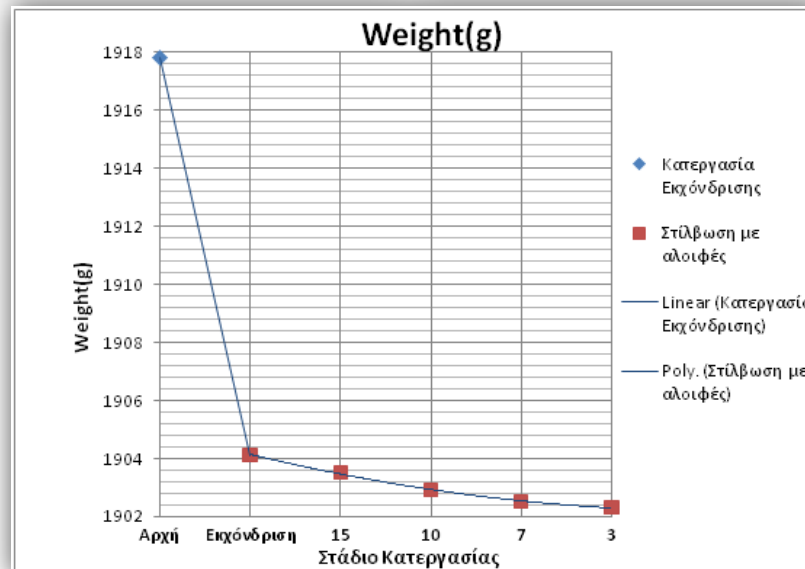
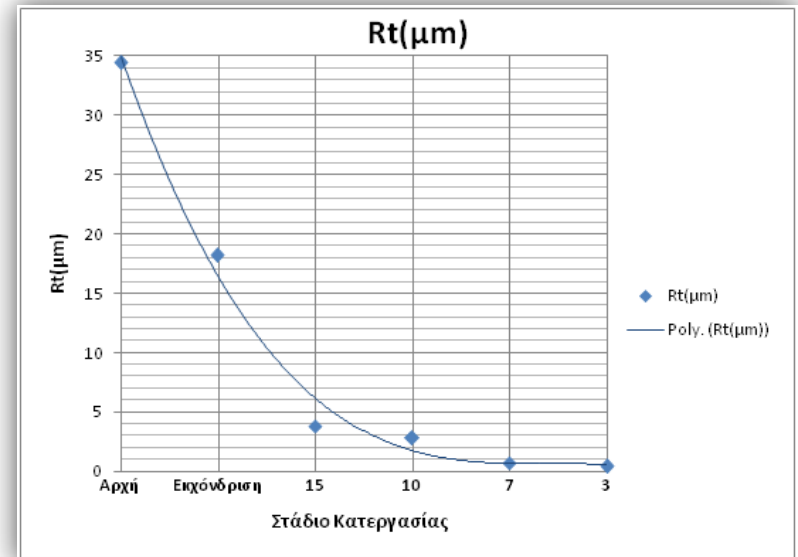
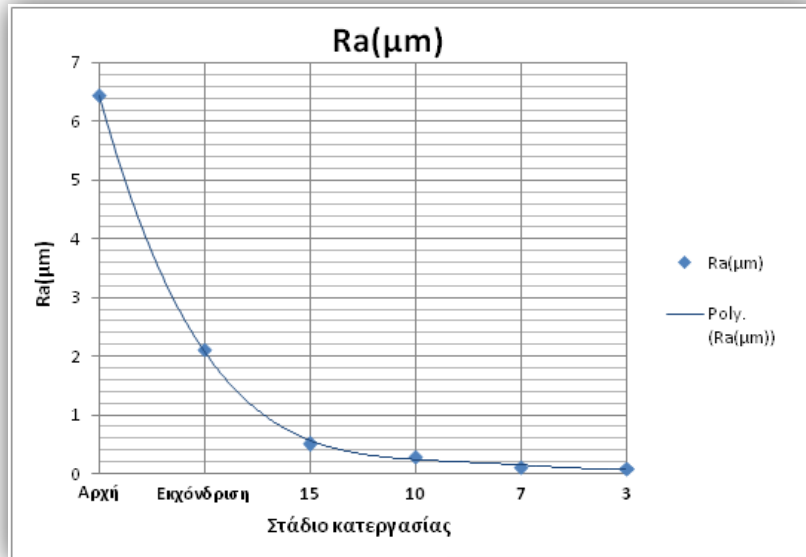


Πειράματα-Χειροκίνητα Πειράματα σε επίπεδο δοκίμιο με αυλακώσεις (3/3)

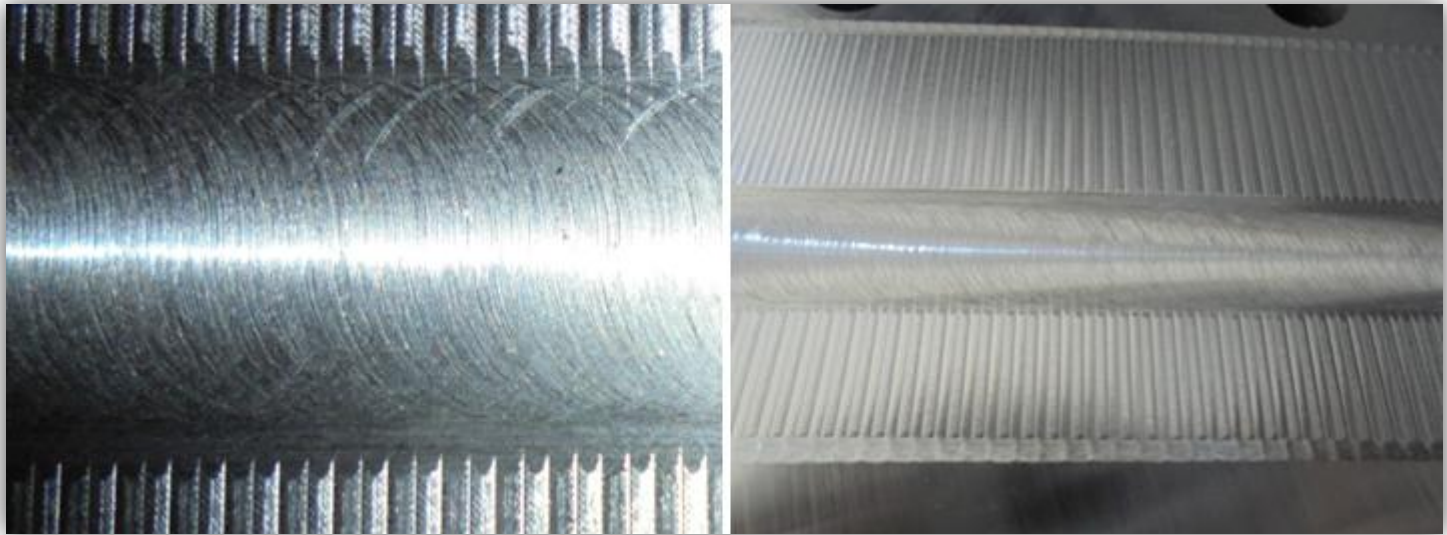


- Οπτική παραμόρφωση-σφάλμα διαστασιακής ακρίβειας
- Αλλοίωση οπτικών ιδιοτήτων
- Σφάλμα εκχόνδρισης
- Αντιμετώπιση με πρόσδοση ομοιομορφίας
- Αυτοματοποιημένη εκχόνδριση με line G-code ή κώδικα trochoid pattern

Πειράματα-Διαγράμματα



Πειράματα-Αυτοματοποιημένα Πειράματα



- Ομοιομορφία εκχόνδρισης (linear G-code)
- Καταπολέμηση «τρέμουλου»-στιβαρότητα συγκράτησης βάσης
- Πλεονέκτημα στίλβωσης κατά τη φορά των αυλακώσεων και όχι κάθετα (όπως στην εικόνα)
- Ιδανική πρόωση περίπου 130 mm/min

Περιεχόμενα

- Εισαγωγικά
- Γεωμετρικά στοιχεία
- Κατασκευή βάσεων
- Πειράματα
- Συμπεράσματα