



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ
Εργαστήριο Κατεργασιών των Υλικών

Διπλωματική Εργασία

**ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΤΙΛΒΩΣΗΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΛΟΥΠΙΩΝ ΣΕ ΚΕΝΤΡΑ
ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ CNC ΤΡΙΩΝ ΑΞΟΝΩΝ**

Αβράμπος Παναγιώτης

Επιβλέπων Καθηγητής: Γ.-Χ. Βοσνιάκος

ΑΘΗΝΑ 2015

Περίληψη

Ένας από τους κλάδους του τομέα των κατεργασιών ακριβείας που εξελίσσεται ταχύτατα τα τελευταία χρόνια είναι η στίλβωση. Ωστόσο, παρά την ευρεία αυτοματοποίηση των κατεργασιών μέσω της ολοένα και αυξανόμενης χρήσης μηχανών CNC, η στίλβωση είναι μία από τις κατεργασίες που, λόγω της πολυπλοκότητάς της και του μεγάλου αριθμού παραμέτρων που την επηρεάζουν, εξακολουθεί να πραγματοποιείται σε μεγάλο βαθμό χειροκίνητα.

Έμπειροι τεχνίτες, μέσω αμέτρητων ωρών ενασχόλησης με πληθώρα στίλβωτικών εργαλείων και πειραματιζόμενοι επί ποικίλων τεχνικών, επιτυγχάνουν επιφάνειες με αξιοσημείωτα επίπεδα διαστασιακής ακρίβειας συνοδευόμενα από εξαιρετικά μικρή τραχύτητα, που προσεγγίζουν την ποιότητα «καθρέφτη». Ωστόσο, η διαδικασία είναι ιδιαίτερα χρονοβόρα και επίπονη, ενώ και το παραμικρό λάθος είναι δυνατό να είναι μη επανορθώσιμο, καταστρέφοντας το τεμάχιο και υποχρεώνοντας τον τεχνίτη να επαναλάβει τη διαδικασία από την αρχή.

Σε αυτή την εργασία η κίνηση του εργαλείου που επιβάλλει με το χέρι του ο τεχνίτης κατά τη διάρκεια της στίλβωσης μοντελοποιείται με τη χρήση της τροχοειδούς καμπύλης. Επιπροσθέτως, διατυπώνεται μία γενική μεθοδολογία επιλογής κατάλληλων παραμέτρων τροχοειδούς για το εκάστοτε χρησιμοποιούμενο εργαλείο. Ως εργαλεία στίλβωσης επιλέγονται στίλβωτικοί δακτύλιοι διαφορετικών υλικών και διαστάσεων, σε συνδυασμό με διαμανταλοιφές διαφόρων μεγεθών κόκκων.

Επιπλέον, αναπτύσσονται μοντέλα χάραξης τροχοειδών καμπυλών με οδηγό τυχαία καμπύλη, ώστε να καταστεί εφικτή η δημιουργία και χρήση οποιουδήποτε tool path, καθώς και βασικές σκέψεις για τη μεταφορά του συγκεκριμένου μοντέλου από τις δύο στις τρεις διαστάσεις. Δημιουργείται μοντέλο ανάλυσης της συμπεριφοράς του περιστρεφόμενου στίλβωτικού δακτυλίου που βασίζεται στην αλληλεπίδραση εργαλείου και επιφάνειας και καθορίζονται οι προϋποθέσεις και οι περιορισμοί που επιβάλλεται να ισχύουν ώστε να επιτυγχάνεται αποτελεσματική αξιοποίηση των στίλβωτικών δακτυλίων ως εργαλεία στίλβωσης.

Τέλος, μετά από κάποιες χειροκίνητες και αυτοματοποιημένες δοκιμές προτείνεται ανάλυση Taguchi για την τυποποίηση των πειραμάτων και την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων. Τα πειράματα γίνονται στο κέντρο κατεργασιών HAAS του κτηρίου κατεργασιών του ΕΜΠ με χρήση ειδικής βάσης πρόσδεσης της άκρης του grinder που συνδέεται στη κεφαλή της φρέζας CNC. Η περιγραφόμενη πειραματική διάταξη μας δίνει τη δυνατότητα μέτρησης και ελέγχου της ασκούμενης δύναμης, ενώ η πορεία που ακολουθεί το εργαλείο ελέγχεται μέσω G-code που καθορίζεται από τα προαναφερθέντα μοντέλα.

Abstract

One of the most rapidly advancing branches of precision machining is polishing. However, despite of the wide automation of machining processes through the increasing usage of CNC machines, polishing is still mainly executed manually due to its complexity and large number of affecting parameters.

Experienced workers, through countless hours of experimenting with many different polishing tools and techniques, manage to achieve surfaces with exquisite levels of dimensional precision accompanied with extremely low levels of roughness, that approach “mirror” quality. However, the process is particularly time-consuming and strenuous. In addition to that, even the most insignificant mistake could be proven to be irreversible, ruining the mould and obliging the worker to repeat the entire process from scratch.

In this work, the tool movement that is manually forced by the worker is modeled through the use of the trochoid curve. Additionally, a general methodology of trochoid parameters selection for each polishing tool is presented. As polishing tools we select polishing rings of different materials and dimensions combined with diamond pastes of various grain sizes.

Furthermore, models that create trochoid curves by the use of random guide curves are developed. This makes possible the creation and use of any tool path on both 2D and 3D planes. Also, a model that analyzes the behavior of the spinning polishing ring is presented. This model is based on the interaction between tool and surface and establishes the necessary restrictions that must be fulfilled in order for the polishing rings to be effective and lead to the desirable results.

Finally, after some first manual and automatized tests, Taguchi analysis is proposed to be used in order to formalize the experiments and reach to safe conclusions. The experiments were run on the HAAS CNC machining centre of the Laboratory of Manufacturing Technology of NTUA. This happens by using a special base we have created to attach the free end of the grinder on the CNC machine. The experimental setup that is described in this work allows us to measure and control the applied force. The tool path is controlled through G-code that is fully defined using the developed models we present.

*Αφιερώνεται στους γονείς μου,
Γιάννη και Παρασκευή, που με στήριξαν
καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.*

Πρόλογος

Η διπλωματική αυτή εργασία επιχειρεί να προσεγγίσει το πολύπλοκο θέμα της στίλβωσης από μία διαφορετική σκοπιά. Εστιάζει στην ρύθμιση όλων των αστάθμητων παραμέτρων που ρυθμίζονταν μέχρι σήμερα αποκλειστικά και μόνο εμπειρικά από εξειδικευμένους τεχνίτες και στην ποσοτικοποίησή τους για τον καθορισμό ενός μοντέλου με το οποίο κάθε είδος τεμαχίου προς στίλβωση θα είναι εφικτό να στιλβωθεί απολύτως αυτόματα σε ένα κέντρο κατεργασιών τριών αξόνων.

Για να επιτευχθούν οι στόχοι της εργασίας, γίνεται μαθηματική και γεωμετρική ανάλυση της τροχοειδούς καμπύλης για να προσομοιωθεί η κίνηση που κάνει κατά τη στίλβωση το χέρι ενός τεχνίτη μέσω κατάλληλα σχεδιασμένου G-code. Με αυτόν τον τρόπο καθίσταται εφικτή η δημιουργία οποιουδήποτε tool path επιθυμούμε ανάλογα με τη γεωμετρία της επιφάνειας και με βάση οποιαδήποτε καμπύλη που χρησιμοποιείται ως «οδηγός» για τη χάραξη τροχοειδούς κατάλληλου συνδυασμού παραμέτρων.

Ο κατάλληλος συνδυασμός παραμέτρων τροχοειδούς επιτυγχάνεται με δεδομένο ότι χρησιμοποιούνται στιλβωτικοί δακτύλιοι ως εργαλείο στίλβωσης. Με βάση τα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά αναπτύσσεται μία μαθηματική-γεωμετρική μέθοδος που εξασφαλίζει την επιλογή κατάλληλης τροχοειδούς καμπύλης για να επιτυγχάνεται επαρκής και ομοιόμορφη κάλυψη της προς στίλβωση επιφάνειας ταυτόχρονα.

Προχωρώντας στο κατασκευαστικό μέρος της εργασίας, κατασκευάστηκαν δύο βάσεις πρόσδεσης της άκρης του grinder στην κεφαλή του κέντρου κατεργασιών HAAS του Εργαστηρίου Κατεργασιών των Υλικών του ΕΜΠ, καθεμία από τις οποίες προσφέρει διαφορετικές δυνατότητες και συνιστάται για χρήση σε διαφορετικές περιπτώσεις στίλβωσης, ανάλογα με το είδος της επιφάνειας και το εργαλείο που χρησιμοποιείται (δακτύλιος, δίσκος ή πέτρα στίλβωσης). Η κατασκευή τους έγινε με στόχο να μπορούμε να επιτύχουμε οποιαδήποτε τιμή RPM κρίνουμε απαραίτητη για το πειραματικό μέρος της εργασίας, με ταυτόχρονη μέτρηση και έλεγχο, δηλαδή πλήρη επίβλεψη της επιβαλλόμενης κατακόρυφης δύναμης κατά τη διάρκεια της στίλβωσης.

Τέλος, στο πειραματικό μέρος, αρχικά έγιναν χειροκίνητα πειράματα για καθορισμό του εύρους των παραγόντων της στίλβωσης. Ακολούθησε απόπειρα μερικής αυτοματοποίησης της μεθόδου, ενώ για τη συνέχεια και επέκταση της μελέτης προτείνεται ανάλυση Taguchi για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων και την επιλογή του βέλτιστου συνδυασμού τιμών των παραγόντων για βελτιστοποίηση του πειραματικού αποτελέσματος της στίλβωσης. Τα ποιοτικά κριτήρια που επιλέχθηκαν είναι η επιτευχθείσα τραχύτητα και η διαστασιακή ακρίβεια που επιτυγχάνεται μετά από κάθε πείραμα.

Στο σημείο αυτό, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα αυτής της διπλωματικής εργασίας Καθηγητή κ. Βοσνιάκο για την στήριξη που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια της δουλειάς μου καθώς και για τις πολύτιμες συμβουλές του, καθώς και τον ιδιοκτήτη της εταιρείας Novarax Greece, κύριο Μανώλη Μαρινάκη για την πολύτιμη συνεισφορά του.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	2
Abstract.....	3
Πρόλογος.....	5
Περιεχόμενα.....	7
Κατάλογος Σχημάτων	10
Κατάλογος Πινάκων.....	13
Κατάλογος Εικόνων	14
1 Εισαγωγή.....	16
1.1 Σκοπός Εργασίας	16
1.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	16
1.2.1 Εισαγωγικά στοιχεία για τη στίλβωση.....	16
1.2.2 Διαμερισμός κατεργασίας στίλβωσης σε προηγούμενες μελέτες	17
1.2.3 Βιβλιογραφική έρευνα και εμβάθυνση	20
1.3 Δομή Εργασίας.....	39
2 Ορισμοί και γενικά στοιχεία	41
2.1 Ορισμός και κατηγοριοποίηση της στίλβωσης	41
2.2 Αντιστοίχιση σταδίων στίλβωσης στα κατάλληλα εργαλεία	42
2.3 Βασικά στοιχεία επιφανειών	48
2.3.1 Προσδιορισμός επιφάνειας στο χώρο	48
2.3.2 Στοιχεία της θεωρίας επιφανειών	50
3 Βελτιστοποίηση του tool path και γεωμετρικά στοιχεία	51
3.1 Μοντελοποίηση μεθόδων χειροκίνητης στίλβωσης	51
3.2 Ορισμός τροχοειδούς καμπύλης	52
3.3 Χάραξη τροχοειδούς με οδηγό τυχαία καμπύλη του επιπέδου	53
3.3.1 Προσεγγιστικό μοντέλο (Small Inclination Model)	53
3.3.2 Ακριβές μοντέλο και γεωμετρική ανάλυση.....	56
3.4 Εποπτεία καλυπτόμενης επιφάνειας και επιλογή τροχοειδούς.....	62

3.5	Αναλυτική εύρεση ριζών τροχοειδούς και μαθηματικός προσδιορισμός μεγεθών	70
3.6	Σχηματική απεικόνιση κάλυψης επιφάνειας	72
4	Κατασκευή βάσης και συγκρότηση πειραματικής διάταξης	76
4.1	Λόγος κατασκευής και στόχος της διάταξης	76
4.2	Εξαρτήματα βάσης και τρόπος κατασκευής τους (σχήματα και φωτογραφίες)	77
4.3	Συναρμολογημένη διάταξη και αξιοποίηση ελατηρίων	87
4.4	Διαπιστωμένα μειονεκτήματα κατασκευασθείσας βάσης	92
4.5	Εξαρτήματα νέας βάσης και τρόπος κατασκευής τους (σχήματα και φωτογραφίες)	93
5	Προκαταρκτικά στοιχεία πειραμάτων και θεωρητικά στοιχεία μοντέλων στίλβωσης	99
5.1	Προσδιορισμός τύπου χάλυβα δοκιμίου πειραμάτων	99
5.2	Μέθοδος δημιουργίας αρχικής τραχύτητας	99
5.3	Υπολογισμός γεωμετρικών περιορισμών δακτυλίου στίλβωσης .	103
5.4	Βασική ιδέα για στίλβωση σε 3 διαστάσεις μέσω CNC.....	108
5.5	2D model για υπολογισμό σημείων G-code	109
5.6	Παρατηρήσεις επί του 2D model	118
6	Πειράματα και έκθεση αποτελεσμάτων	120
6.1	Χειροκίνητα πειράματα και υλικά που χρησιμοποιήθηκαν	120
6.2	Ανάλυση διαδικασίας και παρατηρήσεις.....	121
6.3	Αποτελέσματα και παρατηρήσεις χειροκίνητων πειραμάτων	125
6.4	Αποτελέσματα και παρατηρήσεις αυτοματοποιημένων πειραμάτων	134
7	Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία	141
7.1	Συμπεράσματα	141
7.2	Προτάσεις για μελλοντική εργασία	143
	Βιβλιογραφία	146
	Παράρτημα Α	149
A.1	Κώδικας Precise Model τροχοειδούς.....	149
A.2	Κώδικας 2D Model	152

Παράρτημα Β	157
B.1 Ενδεικτικός G-code δημιουργίας αρχικής τραχύτητας peak-to-valley 21μm (βήμα 0.9mm και ακτίνα Ball-end Mill 10mm)	157
B.2 Ενδεικτικός G-code που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα στίλβωσης επίπεδης επιφάνειας με καμπύλη τροχοειδούς μοτίβου (α=2 και b=6).....	158
Παράρτημα Γ	159
Παράρτημα Δ	160

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2-1	Διάταξη μορίων σε βαμμένο και άβαφο χάλυβα	41
Σχήμα 2-2	Διείσδυση διαμαντόκοκκου σε διαφορετικά είδη εργαλείου για δεδομένη κατεργαζόμενη επιφάνεια	43
Σχήμα 2-3	Αναπαράσταση επιφανείας στο χώρο μέσω Lattice Space Z-map Model	49
Σχήμα 3-1	(Άνω). Τροχοειδής με οδηγό τον άξονα Ox και $a>b$, (Μέση). Τροχοειδής με οδηγό τον άξονα Ox και $a<b$, (Κάτω). Τροχοειδής με οδηγό τον άξονα Ox και $a=b$ (Κυκλοειδής).	52
Σχήμα 3-2	Τροχοειδής καμπύλη με οδηγό-καμπύλη την $f(x) = e^x$ και παραμέτρους τροχοειδούς $a=b=0.3$ (Small Inclination Model)	55
Σχήμα 3-3	Τροχοειδής καμπύλη με οδηγό-καμπύλη την $f(x) = \sin x$ και	56
Σχήμα 3-4	Σχηματική απεικόνιση μεγεθών Precise model	57
Σχήμα 3-5	Επιλογή προσήμων σχέσεων (3-14) και (3-15)	59
Σχήμα 3-6	Τροχοειδής καμπύλη με οδηγό-καμπύλη την $f(x) = e^x$ και παραμέτρους τροχοειδούς $a=b=0.3$ (Precise Model)	60
Σχήμα 3-7	Τροχοειδής καμπύλη με οδηγό-καμπύλη την $f(x) = \sin x$ και παραμέτρους τροχοειδούς $a=b=0.3$ (Precise Model)	61
Σχήμα 3-8	Σύγκριση τροχοειδούς με Small Inclination Model και με Precise Model	62
Σχήμα 3-9	(Άνω). Οικογένεια τροχοειδών με $a=2$, (Μέση). Οικογένεια τροχοειδών με $a=2.5$, (Κάτω). Οικογένεια τροχοειδών με $a=3$	63-64
Σχήμα 3-10	Κλασική μορφή τροχοειδούς χωρίς intersection μεταξύ $(i-1)$ -οστού και $(i+1)$ -οστού loop	65
Σχήμα 3-11	(Άνω). Έλεγχος συνθηκών σε οικογένεια τροχοειδών με $a=2$, (Κάτω). Έλεγχος συνθηκών σε οικογένεια τροχοειδών με $a=2.5$..	68
Σχήμα 3-12	(Άνω). Έλεγχος συνθηκών σε οικογένεια τροχοειδών με $a=3$, (Κάτω). Έλεγχος συνθηκών σε οικογένεια τροχοειδών με $a=4$	69
Σχήμα 3-13	Λεπτομέρεια του σχήματος 3-10 (Κάτω). Αποδεικνύεται ότι δεν υπάρχει αποδεκτό b για χρήση μεταλλικού δακτυλίου στην οικογένεια τροχοειδών με $a=4$	70
Σχήμα 3-14	$a=2$ $b=6$ Διάγραμμα κάλυψης επιφάνειας με Brass/Diamond polishing ring. Ο συνδυασμός παραμέτρων είναι αποδεκτός	72

Σχήμα 3-15	$\alpha=2$ $b=6$ Διάγραμμα κάλυψης επιφάνειας με Plastic polishing ring. Ο συνδυασμός παραμέτρων είναι μη αποδεκτός λόγω παραβίασης της συνθήκης της σχέσης (3-20β) 73
Σχήμα 3-16	$\alpha=2.5$ $b=6$ Διάγραμμα κάλυψης επιφάνειας με Brass/Diamond polishing ring. Ο συνδυασμός παραμέτρων είναι αποδεκτός 73
Σχήμα 3-17	$\alpha=2.5$ $b=6$ Διάγραμμα κάλυψης επιφάνειας με Plastic polishing ring. Ο συνδυασμός παραμέτρων είναι αποδεκτός 74
Σχήμα 3-18	$\alpha=3$ $b=7.5$ Διάγραμμα κάλυψης επιφάνειας με Brass/Diamond polishing ring. Ο συνδυασμός παραμέτρων είναι μη αποδεκτός λόγω παραβίασης της συνθήκης της σχέσης (3-19α) 74
Σχήμα 3-19	$\alpha=4$ $b=13$ Διάγραμμα κάλυψης επιφάνειας με Brass/Diamond polishing ring. Ο συνδυασμός παραμέτρων είναι μη αποδεκτός λόγω παραβίασης της συνθήκης της σχέσης (3-18α) 75
Σχήμα 4-1	Διάγραμμα φορτίου-μεταβολής μήκους του ελατηρίου 1 90
Σχήμα 4-2	Διάγραμμα φορτίου-μεταβολής μήκους του ελατηρίου 2 90
Σχήμα 4-3	Διάγραμμα φορτίου-μεταβολής μήκους του ελατηρίου 3 91
Σχήμα 4-4	Διάγραμμα φορτίου-μεταβολής μήκους του ελατηρίου 4 91
Σχήμα 5-1	Σχηματική απεικόνιση δημιουργίας αρχικής τραχύτητας με διαδοχικά πάσα κοπτικού σφαιρικής γεωμετρίας 100
Σχήμα 5-2	Άτρακτος πρόσδεσης δακτυλίου στίλβωσης (mandrel for ring-finish system)μορίων σε βαμμένο και άβαφο χάλυβα 103
Σχήμα 5-3	(Αριστερά). Εικόνα και σχέδιο Diamond polishing ring, (Δεξιά). Εικόνα και σχέδιο Brass polishing ring 104
Σχήμα 5-4	(Αριστερά). Εικόνα και σχέδιο Plastic polishing ring, (Δεξιά). Εικόνα και σχέδιο Cloth disk ring μορίων σε βαμμένο και άβαφο χάλυβα 104
Σχήμα 5-5α	Συναρμογή mandrel με Brass polishing ring και ορισμός αξόνων 106
Σχήμα 5-5β	Σχηματική απεικόνιση συναρμογής mandrel με Brass polishing ring και ορισμός αξόνων 107
Σχήμα 5-6	2D model υπολογισμού σημείων G-code 111
Σχήμα 5-7	Εφαρμογή 2D model επί σημείου καμπής και τρόπος επαφής δακτυλίου 115
Σχήμα 5-8	Γεωμετρικός τύπος G-data για δύο διαφορετικά είδη προφίλ επιφανείας. Ο υπολογισμός έγινε με τη χρήση του κώδικα του 2D-Model 116-117

Σχήμα 5-9	Εισχώρηση κόκκων διαμανταλοιφής στις εσοχές μεταξύ των δύο επιφανειών σε κυρτή (αριστερά) και κοίλη (δεξιά) επιφάνεια προς στίλβωση.....	119
Σχήμα 6-1	Τρόπος λειτουργίας τραχύμετρου για μέτρηση τραχύτητας επίπεδων επιφανειών.....	126
Σχήμα 6-2	Ορισμός βασικών ειδών τραχύτητας με βάση τη μέση γραμμή (mean line)	129
Σχήμα 6-3	Μέση τραχύτητα μετά τα διάφορα στάδια της στίλβωσης.....	132
Σχήμα 6-4	Peak-to-Valley τραχύτητα μετά τα διάφορα στάδια της στίλβωσης ..	133
Σχήμα 6-5	Βάρος στίλβωθέντος δοκιμίου μετά τα διάφορα στάδια της στίλβωσης.....	133
Σχήμα 6-6	Προσδιορισμός περιοχής αποδεκτών b για τροχοειδή καμπύλη παραμέτρου $a=2.5$	138
Σχήμα 6-7	Υπέρθωση εκχόνδρισης (μπλε) και στίλβωσης με πλαστικό δακτύλιο (πράσινο)	139

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2-1	Επίπεδο δημιουργούμενης τραχύτητας για διάφορα είδη κατεργασιών σε εργαλειομηχανές	44
Πίνακας 2-2	Διεθνή συστήματα μέτρησης μεγέθους κόκκων (grain size ή grit size)	45
Πίνακας 2-3	Επίπεδα τραχύτητας δυνατό να αποκτηθούν μέσω του συστήματος στίλβωσης της εταιρείας NOVAPAX.....	47
Πίνακας 4-1	Στοιχεία αριθμημένων ελατηρίων εικόνας 4-20	91
Πίνακας 5-1	Πρώσεις και ταχύτητες περιστροφής για κατεργασία με ball-endmill ανάλογα με το κατεργαζόμενο υλικό	101
Πίνακας 5-2	Γεωμετρικά μεγέθη στιλβωτικών δακτυλίων σχημάτων 5-2 έως 5-4	105
Πίνακας 6-1	Στοιχεία επίπεδης στιλβωθείσας επιφάνειας (με αυλακώσεις) - μετρήσεις.....	129

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 4-1	Πείρος σύνδεσης, κατασκευάστηκε στον τόρνο του εργαστηρίου του κτηρίου κατεργασιών του ΕΜΠ	78
Εικόνα 4-2	Πείρος σύνδεσης, σχεδιασμένος στο περιβάλλον του SolidWorks	78
Εικόνα 4-3	Τάκος σύνδεσης.....	79
Εικόνα 4-4	Τάκος σύνδεσης, σχεδιασμένος στο περιβάλλον του SolidWorks.	79
Εικόνα 4-5	Πείρος σύνδεσης (αριστερά) και κοχλίας Allen M10x1.5 L=10 χωρίς κεφαλή (δεξιά)	80
Εικόνα 4-6	Κοχλίας Allen M10x1.5 L=10 χωρίς κεφαλή	81
Εικόνα 4-7	Βάση στήριξης του grinder	81
Εικόνα 4-8	Βάση στήριξης του grinder (αντίθετη λήψη)	82
Εικόνα 4-9	Βάση στήριξης του grinder, σχεδιασμένη στο περιβάλλον του SolidWorks	82
Εικόνα 4-10	Βάση στήριξης του grinder, σχεδιασμένη στο περιβάλλον του SolidWorks (άνωψη). Λεπτομέρεια που απεικονίζει την κωνικότητα στο σημείο πρόσδεσης του grinder επί της βάσης	83
Εικόνα 4-11	Αποστάτες διάταξης	84
Εικόνα 4-12	Κοχλίας Allen M10x1.5 L=80 με κεφαλή	84
Εικόνα 4-13	Κοχλίας Allen M10x1.5 L=16 χωρίς κεφαλή	85
Εικόνα 4-14	Κοχλίας M6x1 L=30 εξαγωνικής κεφαλής και Ροδέλες και περικόχλια M6x1	85
Εικόνα 4-15	Ελατήρια διαφορετικής σταθεράς K και βάσεις συγκράτησης ελατηρίων.....	86
Εικόνα 4-16	Ελατήριο προσαρμοσμένο στις βάσεις συγκράτησής του	86
Εικόνα 4-17	Συναρμολογημένη διάταξη βάσης	87
Εικόνα 4-18	Συναρμολογημένη διάταξη βάσης (έχει αποσυνδεθεί η άκρη του grinder) σε ελευθερία.....	88
Εικόνα 4-19	Συναρμολογημένη διάταξη βάσης (έχει αποσυνδεθεί η άκρη του grinder) υπό την επιβολή κατακόρυφης δύναμης στον άξονα πρόσδεσης της άκρης του grinder.....	88
Εικόνα 4-20	Ελατήρια διαφορετικής σταθεράς διαθέσιμα προς πρόσδεση στη διάταξη της βάσης.....	89
Εικόνα 4-21	Δεύτερη συναρμολογημένη βάση. Εικονίζεται αποσυναρμολογημένο το κάτω μέρος της βάσης (βάση στήριξης) καθώς και ο κώνος κέντρωσης.....	94

Εικόνα 4-22	Δεύτερη συναρμολογημένη βάση με αριθμημένα τα επιμέρους εξαρτήματα (το grinder δεν είναι συνδεδεμένο).....	95
Εικόνα 4-23	Καλιμπράρισμα δεύτερης βάσης με χρήση πείρου κέντρωσης	97
Εικόνα 4-24	Κοντινή λήψη εισαγωγής πείρου κέντρωσης σε οπή που έγινε από κεντροτρύπανο για καλιμπράρισμα της 2 ^{ης} βάσης.	98
Εικόνα 5-1	Two flute Ball-end mill	101
Εικόνα 6-1	(Αριστερά). Δοκίμιο με κυρτή σφαιρική επιφάνεια μετά από Ηλεκτροδιάβρωση, (Δεξιά). Το ίδιο δοκίμιο μετά από διαδικασία χειροκίνητης στίλβωσης (ποιότητα "καθρέφτη")	124
Εικόνα 6-2	Δοκίμιο επίπεδης επιφάνειας - αντιπαραβολή εκχόνδρισης και γυαλίσματος με 15άρα αλοιφή	128
Εικόνα 6-3	Οπτική παραμόρφωση καθρεπτιζόμενου ειδώλου λόγω ανεπιθύμητης καμπυλότητας.....	130
Εικόνα 6-4	Επιφάνεια επίπεδου δοκιμίου με αυλακώσεις μετά την εκχόνδριση	135
Εικόνα 6-5	Πειραματική διάταξη αυτοματοποιημένης στίλβωσης (2 ^η βάση, εκχόνδριση με διαμαντένιο δακτύλιο)	137

1 Εισαγωγή

1.1 Σκοπός Εργασίας

Σκοπός αυτής της εργασίας είναι να προσεγγίσει μεγάλο μέρος των παραμέτρων που αφορούν τη διαδικασία της στίλβωσης και να διατυπωθούν μέθοδοι βελτιστοποίησής τους.

Με δεδομένο ότι όταν έγινε η ανάληψη της συγκεκριμένης διπλωματικής, δεν υπήρχε κάποια αξιόπιστη μέθοδος, αλλά ούτε και τα απαιτούμενα εργαλεία για την πραγματοποίηση των πειραμάτων, ήταν απαραίτητο να γίνει σε πρώτο στάδιο μία ικανοποιητική θεωρητική μελέτη του αντικειμένου της στίλβωσης. Μελετήθηκαν προηγούμενες απόπειρες αυτοματοποίησης της στίλβωσης και στο κεφάλαιο της βιβλιογραφίας που ακολουθεί επισημαίνονται τα κυριότερα σημεία και παραδοχές αυτών των προσπαθειών. Παράλληλα έγινε θεωρητική μελέτη θεωρίας επιφανειών με σκοπό τη συσχέτισή της και την εφαρμογή της για δημιουργία γεωμετρικών μοντέλων περιγραφής του tool path.

Ουσιαστικός σκοπός ήταν να προσδιοριστούν τα στοιχεία του επιθυμητού tool path, καθώς και να γίνει μία πρώτη προσέγγιση σχετικά με τη μέθοδο στίλβωσης που είναι εφικτό να χρησιμοποιηθεί ανάλογα με τη μορφή της προς στίλβωση επιφάνειας σε κάθε σημείο της. Ιδιαίτερη βάση δίνεται στη χρήση λειαντικών δακτυλίων και στη μελέτη συμβατότητας κάθε είδους αυτών με trochoidal tool path patterns σε επιφάνειες διαφορετικής γεωμετρίας.

Τέλος, σκοπός ήταν να κατασκευαστούν τα απαιτούμενα εξαρτήματα πρόσδεσης-σύνδεσης ενός hand-grinder με κέντρο κατεργασιών CNC, ώστε να καταστεί εφικτό να πραγματοποιηθούν πειράματα δομημένα με ανάλυση Taguchi για προσδιορισμό του βέλτιστου συνδυασμού παραμέτρων στίλβωσης σε διαφορετικά επίπεδα αρχικής τραχύτητας και για διάφορα είδη δακτυλίων στίλβωσης.

1.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

1.2.1 Εισαγωγικά στοιχεία για τη στίλβωση

Η στίλβωση καλουπιών είναι μία ιδιαίτερα σύνθετη διαδικασία που αποτελείται από πολλά στάδια και η ακριβής περαίωσή της γίνεται μέχρι σήμερα κατά κύριο λόγο χειροκίνητα (manually) από εξειδικευμένους τεχνίτες με πολλές χιλιάδες ώρες εμπειρίας. Κάθε τεχνίτης διαθέτει την απαιτούμενη εμπειρία ώστε να κρίνει πόσος χρόνος απαιτείται σε κάθε στάδιο της στίλβωσης, καθώς και να επιλέξει την κατάλληλη κρέμα γυαλίσματος, το κατάλληλο εργαλείο στίλβωσης, αλλά και να

εφαρμόσει την απαιτούμενη πίεση ώστε να επιτύχει την επιθυμητή τραχύτητα χωρίς να αφαιρέσει ποσότητα υλικού που πιθανώς να άλλαζε τις ονομαστικές διαστάσεις του καλουπιού και συνεπώς θα το καθιστούσε μη αξιοποιήσιμο.

Η στίλβωση είναι μία κατεργασία αφαίρεσης υλικού, γεγονός που σημαίνει ότι κατά τη διάρκειά της πρέπει να δίδεται ιδιαίτερη προσοχή, γιατί αφαίρεση ποσότητας υλικού πέραν της απαιτούμενης συνιστά ανεπανόρθωτο σφάλμα και καθιστά αναγκαία την επανάληψη της διαδικασίας από την αρχή για την απόκτηση του επιθυμητού τεμαχίου. Ωστόσο η ακρίβεια είναι δύσκολα επιτεύξιμη σε μια διαδικασία όταν αυτή γίνεται εξ' ολοκλήρου χειροκίνητα, γεγονός που καθιστά τη στίλβωση ιδιαίτερα χρονοβόρα και επίπονη. Τα περασμένα χρόνια έχουν γίνει πολλές προσπάθειες αυτοματοποίησης της διαδικασίας της στίλβωσης και έχουν σημειωθεί πολλά βήματα προς το σχεδιασμό μίας γενικής μεθόδου η οποία θα ακολουθείται σε οποιαδήποτε περίπτωση στίλβωσης με παραλλαγές ανάλογα με τα δεδομένα και τα ζητούμενα (στόχους) της εκάστοτε περίπτωσης.

Στις επόμενες σελίδες θα γίνει μία σύντομη κατηγοριοποίηση των επιμέρους σταδίων που είναι απαραίτητο να καθοριστούν με κάθε λεπτομέρεια για την επίτευξη μίας αυτόματης μεθόδου στίλβωσης και θα δοθούν βασικές πληροφορίες για καθένα εξ αυτών, ενώ θα γίνει και σύντομη αναφορά σε βιβλιογραφικές πηγές (δημοσιευμένα papers με παράλληλη αναφορά των παραδοχών-καινοτομιών που ακολούθησε ο εκάστοτε ερευνητής).

1.2.2 Διαμερισμός κατεργασίας στίλβωσης σε προηγούμενες μελέτες

Για να δημιουργηθεί ένα αυτόματο σύστημα στίλβωσης υπάρχουν κάποιες βασικές απαιτήσεις-προαπαιτούμενα που πρέπει να καθοριστούν με κάθε λεπτομέρεια. Γενικά είναι δυνατό να εντοπίσουμε 5 μέρη που πρέπει να συνεργάζονται μεταξύ τους, ως προς τον τρόπο με τον οποίο διαμερίζεται η κατεργασία. Αυτά είναι:

1. Το τεμάχιο.
2. Το κοπτικό εργαλείο (στιλβωτικό εργαλείο).
3. Η επιφάνεια επαφής τεμαχίου-κοπτικού εργαλείου.
4. Η εργαλειομηχανή.
5. Το σύστημα ελέγχου.

1)Τεμάχιο: Σε πρώτο στάδιο είναι απαραίτητο να είναι γνωστό το υλικό το οποίο θα υποστεί την κατεργασία και να έχουν καθοριστεί όλες οι μηχανικές του ιδιότητες (μέτρο ελαστικότητας E, μέτρο διάτμησης G, σκληρότητα κατά Brinell/Vickers) που πιθανότατα θα χρειαστούν για τον έλεγχο της κατεργασίας (αλληλεπίδραση με (5)-σύστημα ελέγχου). Επίσης πρέπει να είναι γνωστή η γεωμετρία του Stock (αρχικό

τεμάχιο προς κατεργασία) καθώς και η ακριβής γεωμετρία του Target (στόχος προς επίτευξη-επιθυμητές τελικές διαστάσεις). Οι όροι Stock και Target χρησιμοποιούνται στο περιβάλλον προσομοίωσης της κατεργασίας που θα χρησιμοποιηθεί (SolidCAM). Γενικά, σε κάθε paper οι ιδιότητες του υλικού θεωρούνται γνωστές και σταθερές, με δεδομένο ότι υπάρχει πλήρης γνώση του τεμαχίου που κατεργάζεται, συνεπώς δεν θα πραγματοποιηθεί περαιτέρω ανάλυση του (1).

2) Το κοπτικό εργαλείο (στιλβωτικό εργαλείο): Ανάλογα με το κατεργαζόμενο υλικό είναι δυνατό να επιλεγεί το κατάλληλο κοπτικό εργαλείο, τόσο ως προς την γεωμετρία που πρέπει να διαθέτει, η οποία καθορίζεται εύκολα αν ληφθούν υπόψη η αρχική και τελική επιθυμητή γεωμετρία του τεμαχίου, όσο και ως προς το υλικό από το οποίο θα είναι κατασκευασμένο το κοπτικό. Με τον καθορισμό της γεωμετρίας του κοπτικού εξασφαλίζεται η αποφυγή ανεπιθύμητων επαφών μεταξύ τεμαχίου και εργαλείου (για παράδειγμα επαφή του τεμαχίου με τμήμα κοπτικού που δεν αντιστοιχεί στην κοπτική ακμή αυτού κλπ), ενώ με τον καθορισμό του υλικού καθίσταται δυνατό να αποφύγουμε ανεπιθύμητες συνθήκες κατεργασίας που θα οδηγούσαν σε πιθανή θραύση του κοπτικού και σε αύξηση του συνολικού χρόνου της κατεργασίας.

3) Η επιφάνεια επαφής τεμαχίου-κοπτικού εργαλείου: Σε διαδικασίες αφαίρεσης υλικού δεν αφαιρείται όλη η ποσότητα σε ένα μόνο "πέρασμα" της επιφάνειας από το εργαλείο, αλλά αντίθετα απαιτούνται πολλαπλά περάσματα ("πάσα") για την επίτευξη του στόχου. Σε κάθε πέρασμα πρέπει να καλύπτεται εξ ολοκλήρου η επιφάνεια, χωρίς ωστόσο να σημειώνονται πολλαπλά περάσματα από το ίδιο σημείο αυτής σε ένα πάσο, για να εξασφαλίζεται η ομοιομορφία της στίλβωσης και του αποτελέσματος. Αυτό επιτυγχάνεται με τις μεθόδους χάραξης του "tool path" του κοπτικού εργαλείου. Τέτοιου είδους αλγόριθμοι είναι ενσωματωμένοι στο λογισμικό του SolidCAM, ωστόσο πολλοί ερευνητές έχουν χρησιμοποιήσει διαφορετικά μαθηματικά μοντέλα για τη χάραξη του μονοπατιού του κοπτικού εργαλείου, εκθέτωντας παράλληλα και πειραματικά δεδομένα που αποδεικνύουν την αποτελεσματικότητα των συγκεκριμένων μεθόδων.

4) Η εργαλειομηχανή: Η εργαλειομηχανή στην οποία θα γίνει η διαδικασία της στίλβωσης είναι ένας σημαντικός παράγοντας προς εξέταση. Και αυτό διότι, ανάλογα με τον αριθμό των βαθμών ελευθερίας της εργαλειομηχανής, μεταβάλλονται ραγδαία οι δυνατότητές της, και συνεπώς πρέπει να γίνει διαφορετικά η χάραξη του tool path και πιθανώς να απαιτείται ακόμα και χρήση διαφορετικού κοπτικού εργαλείου σε κάποιες περιπτώσεις, ανάλογα με το είδος της κοιλότητας της προς κατεργασία επιφάνειας, και την ακτίνα καμπυλότητάς της. Πιο συγκεκριμένα, το περιβάλλον προσομοίωσης SolidCAM προσφέρει τη δυνατότητα επιλογής εργαλειομηχανής,

οπότε αρκεί να επιλέξουμε μία εκ των **Haas: TL-1** ή **Okuma: MX45VAE** που βρίσκονται στο Εργαστήριο Κατεργασιών των Υλικών του ΕΜΠ για να έχουμε μία ρεαλιστική προσομοίωση της κατεργασίας. Από τα προαναφερθέντα εξάγεται εύκολα το συμπέρασμα ότι η (4)-εργαλειομηχανή επηρεάζει άμεσα τα (2)-(επιλογή κοπτικού εργαλείου) και (3)-(διαφοροποίηση ως προς το tool path).

5) Το σύστημα ελέγχου: Όλα τα προηγούμενα στάδια εξασφαλίζουν ότι υπάρχει το τεμάχιο, έχει οριστεί πλήρως το πρόβλημα ως προς τη γεωμετρία του και η εργαλειομηχανή μπορεί να προσφέρει ό,τι της ζητήσουμε για την περάτωση της κατεργασίας. Ωστόσο δεν έχουν καθοριστεί οι ταχύτητες (πρόωση και ταχύτητα περιστροφής κοπτικού) και οι δυνάμεις (και πιέσεις) που θα εφαρμόζονται στην επιφάνεια μεταξύ κοπτικού εργαλείου και επιφάνειας τεμαχίου. Η ύπαρξη ενός συστήματος ελέγχου είναι απαραίτητη για την επίτευξη της αυτοματοποίησης της στίλβωσης και θα πρέπει να καθορίζει συγκεκριμένες λειτουργίες και να προβαίνει σε επιλογές ανάλογα με τις μετρήσεις πιέσεων και δυνάμεων, καθώς και τραχύτητας και απόκλισης από την επιφάνεια-στόχο που θα λαμβάνει από αισθητήρες και ειδικά μετρητικά όργανα καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας. Το σύστημα ελέγχου είναι πιθανό να ελέγχει παράγοντες απλούς, όπως για παράδειγμα την επιλογή για αύξηση ή μείωση της πίεσης που ασκείται ή της ταχύτητας πρόωσης, αλλά και πιο σύνθετους, όπως για παράδειγμα να καθορίζει τον αριθμό των πάσων που πρέπει να γίνει με σιλβωτικό συγκεκριμένου μεγέθους κόκκων, πριν μεταβεί στη συνέχιση της στίλβωσης με σιλβωτικό μικρότερου μεγέθους κόκκων. Γνώμονας του συστήματος ελέγχου είναι πάντα η βελτιστοποίηση του ποιοτικού αποτελέσματος που επιτυγχάνεται, με παράλληλη προσπάθεια περαίωσης της διαδικασίας στον ελάχιστο δυνατό χρόνο. Ας σημειωθεί ότι σε αυτόν τον τομέα συμπεριλαμβάνονται και οι μετρήσεις παραγόντων και εκτιμήσεις επιρροής παραγόντων στην ποιότητα της στίλβωσης (μέσω ανάλυσης Taguchi κλπ) που δύνανται να χρησιμοποιηθούν στην ανάδραση του βρόχου του συστήματος ελέγχου (τρόπος υπολογισμού).

Στις επόμενες σελίδες θα γίνει μία απόπειρα προσέγγισης ήδη πραγματοποιηθέντων εργασιών εντοπίζοντας τις παραδοχές και τις μεθόδους που ακολουθήθηκαν από τον εκάστοτε ερευνητή σε κάθε έναν από τους 5 παράγοντες που ορίστηκαν παραπάνω. Θα ακολουθήσει σύντομη κριτική για το εάν η μέθοδος είναι πραγματοποιήσιμη, και πιθανή παράθεση ιδεών σχετικά με τη βελτίωσή τους, ή τη σύνδεσή τους για επίτευξη καλύτερων αποτελεσμάτων.

1.2.3 Βιβλιογραφική έρευνα και εμβάθυνση

Σημείωση: Όπου παραλείπονται αναφορές σε κάποιον από τους 5 τομείς που ορίστηκαν παραπάνω σημαίνει ότι δεν γίνεται αναφορά σε αυτούς στην συγκεκριμένη μελέτη. Επίσης, όπου γίνονται επισημάνσεις χωρίς να αντιστοιχίζονται σε κάποιον από τους 5 αυτούς τομείς, σημαίνει ότι το περιεχόμενο των σημειώσεων αυτών δεν ήταν δυνατό να σχετιστεί με κανέναν εξ αυτών.

1)1990-Mizugaki:

2) Το κοπτικό εργαλείο αναφέρεται ως polishing end effector και θεωρείται ως μία γραμμική (linear) συσκευή που διαθέτει ενδοτικότητα (υποχωρητικότητα-compliance).

3) Η επιφάνεια επαφής ορίζεται μέσω του lattice space model explanation, δηλαδή ορίζεται ένα διάνυσμα (array) $Z=Z(x,y)$ το οποίο αναπαριστά τις τιμές στον άξονα z των σημείων (x,y) του επιπέδου. Η κάλυψη όλης της επιφάνειας γίνεται με 3 μοντέλα (scanning line, random small vector mode, hybrid mode).

4) Βιομηχανικό ρομπότ 6 βαθμών ελευθερίας που συνδέεται με το compliant end effector. Το compliant end effector αποτελείται από ένα air grinder, ένα ελατήριο (spring coil) και έναν οδηγό ολίσθησης (sliding guide) οδηγούμενο από βηματικό κινητήρα (stepping motor).

5) Γίνεται παραδοχή ότι η πίεση στο σημείο επαφής είναι ανάλογη του σφάλματος μεταξύ της θέσης του nominal spatial path (επιφάνεια του καλουπιού-προσδιορισμός μέσω lattice space model explanation) και της πραγματικής θέσης του end effector (διαφέρουν λόγω compliance του end effector). Ωστόσο, επειδή γίνεται επίσης παραδοχή ότι η επιφάνεια επαφής είναι σταθερή (στην πραγματικότητα αυξάνεται με αύξηση της πίεσης λόγω compliance), αυτό αποτελεί μία πρώιμη μορφή ελέγχου δύναμης, και όχι πίεσης.

Συμπέρασμα: Δεν λαμβάνεται υπόψη η ελαστική υστέρηση που παρατηρείται λόγω ενδοτικότητας τεμαχίου και στίλβωτικού εργαλείου. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί η φόρμουλα Hertz για εκτίμηση του compliance. Στα θετικά ο απλός τρόπος υπολογισμού της δύναμης μέσω της σταθεράς του ελατηρίου της διάταξης και τους σφάλματος μεταξύ πραγματικής θέσης και $Z(x,y)$ του end effector.

2)1993-Saito:

2) Στόχος της μελέτης να προσδιοριστεί ο κατάλληλος συνδυασμός κοπτικού εργαλείου (whetstone) και λιπαντικών στίλβωσης (polishing lubricants) ώστε να επιτευχθεί χαμηλή μέση τραχύτητα R_a χωρίς ωστόσο να υπερβαίνονται τα όρια ως

προς το H (βάθος αφαίρεσης υλικού-depth of stock removal), με παράλληλη μείωση του H_s (μέγιστο βάθος χαραγής-depth of scratch).

5) Δημιουργείται σύστημα ελέγχου και διάγραμμα μηχανής σε ψευδογλώσσα που μετρά R_a , H_s και H κατά τη διάρκεια της στίλβωσης και επιλέγει από μόνο του τον κατάλληλο συνδυασμό εργαλείων, καθώς και τον αριθμό πάσων που πρέπει να γίνουν στο επόμενο στάδιο της στίλβωσης, με χρήση των τύπων για κρίσιμο βάθος αφαίρεσης υλικού (H_c) και κρίσιμου αριθμού πάσων (N_c).

3)1995-Zhao:

1) Ορίζονται και χρησιμοποιούνται όλες οι μηχανικές ιδιότητες και τα γεωμετρικά στοιχεία του καλουπιού προς στίλβωση (aluminium alloy mould) και του τροχού (στιλβωτικό εργαλείο) (μέτρα ελαστικότητας, λόγοι Poisson, συντελεστής τριβής ολίσθησης μεταξύ τους, ακτίνα τροχού, ακτίνα καμπυλότητας καλουπιού, γωνία κλίσης επιφάνειας καλουπιού, πλάτος τροχού στίλβωσης).

2) Αγνοείται η ενδοτικότητα του εργαλείου στίλβωσης, αλλά και της επιφάνειας προς στίλβωση.

3) Γίνεται δισδιάστατη ανάλυση-χρήση δισδιάστατου μοντέλου επιφάνειας καλουπιού, σε άξονες x,z (προφίλ καμπύλης επιφάνειας), εφαρμόζεται περιφερειακή στίλβωση.

4) Εφαρμόζεται από την εργαλειομηχανή δύναμη αντίστοιχη με τη δύναμη που ασκούν ειδικευμένοι τεχνίτες, απόπειρα "μίμησης" χειροκίνητης στίλβωσης.

5) Έλεγχος κατεργασίας με σταθερή πίεση στο σημείο επαφής. Δίνεται φόρμουλα για τον υπολογισμό της και διαγραμματική σύγκριση μεθόδων σταθερής πίεσης και σταθερής δύναμης ως προς τα αποτελέσματα της στίλβωσης, όπου φαίνεται σαφώς το πλεονέκτημα της μεθόδου σταθερής πίεσης. Ορίζεται το σύστημα ελέγχου, καθώς και μία polishing comprehensive parameter, για την σύνδεση των ποικίλων παραγόντων που επηρεάζουν το αποτέλεσμα και τον έλεγχο αυτών συνολικά, και όχι ξεχωριστά.

4)1999-Tam:

1) AISI S136 steel (υλικό τεμαχίων προς στίλβωση-κατάλληλο για καλούπια). Τα τεμάχια προς στίλβωση έχουν κυλινδρικό σχήμα.

2) Χρήση διαφορετικών στιλβωτικών (abrasives) σε κάθε στάδιο της στίλβωσης (διαφορετικό μέγεθος κόκκων από diamond ή mineral oxide).

3) Τρισδιάστατη ανάλυση και παραμετρική έκφραση της επιφάνειας προς στίλβωση $R(u,w)$. Αλγόριθμος δημιουργίας tool path με pitch adaptation με κριτήριο την αποφυγή gouging κατά τη διάρκεια της κατεργασίας. Βασική χρήση αλγορίθμων u -

direction scanning path, αλλά και αναφορά σε Peano και Lissajous paths ως μαθηματικά μοντέλα εξασφάλισης πλήρους και ομαλής κάλυψης επίπεδης επιφάνειας αντίστοιχα. (μετωπική στίλβωση, όπως φαίνεται και στην εικόνα που παρατίθεται στο paper).

4) Χρήση PUMA 562 robot (6 αξόνων-βαθμών ελευθερίας) για την κίνηση του polishing end effector (παρατίθεται σχήμα της διάταξης). Επιτυγχάνεται ταχύτητα στίλβωσης ρυθμιζόμενη μεταξύ 3000 και 30000 RPM.

5)2000-Ravikiran:

1),2) Πείραμα για ποσοτικοποίηση της φθοράς από την τριβή μεταξύ υλικών. Μοντέλο rubber "pin" on paper "disk".

3) Επίπεδη επιφάνεια επαφής, παράλληλος υπολογισμός φθοράς με διαφορετικούς συνδυασμούς υλικών (συνθήκες flat-on-flat και ball-on-flat).

5) Έκθεση αποτελεσμάτων υπό σταθερή πίεση και σταθερή δύναμη, υπολογισμός μέσω τύπων της ποσότητας αφαιρούμενου υλικού μέσω delamination (αποκόλληση), adhesive (προσκόλληση) και tribochemical mechanisms. Καθιέρωση πιο αποτελεσματικού τρόπου αναπαράστασης της έντασης του φαινομένου της φθοράς σε σχέση με τους ήδη υπάρχοντες που παρουσιάζουν συγκεκριμένα μειονεκτήματα ($W_I = W_n LE$).

(Σημείωση: Πιθανότητα δεν θα χρειαστεί στην εργασία μας αξιοποίηση των πληροφοριών που προσφέρονται εδώ, λόγω της ιδιαίτερης εξειδίκευσης σε φαινόμενα φθοράς, ωστόσο ίσως μπορεί να χρησιμοποιηθεί το προτεινόμενο μέγεθος για ποσοτικοποίηση των πειραμάτων).

6)2001-Lee:

4) Polishing robot (2 rotational degrees of freedom) συνδεδεμένο με ένα κέντρο κατεργασιών τριών βαθμών ελευθερίας (3 linear degrees of freedom). Σύνολο 5 B.E. και δυνατότητα να διατηρείται το εργαλείο κάθετο στην επιφάνεια του προς στίλβωση τεμαχίου.

5) Χρησιμοποιείται sliding mode control algorithm και γίνεται σύγκρισή του με τα αποτελέσματα που θα έδινε έλεγχος μέσω ενός PID controller. Επίσης, μέσω αντίστροφης κινηματικής εξάγονται οι τιμές των μεταβλητών των αρθρώσεων της διάταξης από τα CL-Data (Cutter Location Data). Παρουσιάζονται αποτελέσματα πειραμάτων trajectory tracking control (έλεγχος εντοπισμού τροχιάς).

7)2002-Ahn:

1) Υλικό δοκιμίων SKD11.

2) Ποικιλία από abrasives (diamond abrasive pads με διαφορετικά mesh numbers, άρα και διαφορετικό μέγεθος κόκκων).

3) Σαν στοιχεία διεπιφάνειας επαφής ορίζονται το βάθος κοπής $\Delta = \frac{2r_{avg} P}{H_W \rho}$, όπου r_{avg} το μέσο μέγεθος κόκκου του στιλβωτικού, P η πίεση που ασκείται, ρ η πυκνότητα του στιλβωτικού και H_W η σκληρότητα του τεμαχίου. Μέσω αυτού ορίζεται και το Metal Removal Rate (MRR= $k\Delta(\rho s/f)$), με f το feed rate και s το rotational speed του εργαλείου.

4) 5-αξονική μηχανή στίλβωσης με πνευματική στιλβωτική κεφαλή και AE(Acoustic Emission) sensors.

5) AE signal → amplifier → high pass filter → RMS converter → AD board → PC. Αυξανόμενη ακουστική εκπομπή συνεπάγεται μεγαλύτερη τραχύτητα επιφανείας. Όσο πλησιάζει το στάδιο του finishing, τόσο μικρότερο grain size abrasive χρησιμοποιείται.

Παρατηρήσεις:

- Με υψηλή πίεση και χαμηλό f επιτυγχάνεται γρήγορη προσέγγιση της οριακής τραχύτητας (επιθυμητό σε rough polishing).
- Σε finish polishing η υψηλή πίεση φέρει ανεπιθύμητα αποτελέσματα (χαραγές λόγω υπερπίεσης κόκκων στιλβωτικού, αδυναμία επίτευξης ακρίβειας). Επίσης, χαμηλό feed rate οδηγεί μεν σε γρήγορη επίτευξη της οριακής τραχύτητας αλλά οδηγεί σε μη αποδεκτή αύξηση του βάθους κοπής, με αποτέλεσμα να επηρεάζει τις διαστάσεις που θέλουμε να επιτευχθούν.

Το σύστημα ελέγχου μετρά μέσω του AE το MRR, την τραχύτητα και τη φθορά του κοπτικού εργαλείου, ενώ γίνεται παράλληλα επιλογή ανοχών για τον καθορισμό των συνθηκών αντικατάστασης του στιλβωτικού με άλλο με μικρότερο grain size για να ακολουθήσει το επόμενο στάδιο του γυαλίσματος.

8)2002-Huissoon:

1) Καθορισμένο P20 steel alloy.

2) Καθορισμένο 180 grit 3M Rolac Multicut.

3) Καθορισμένη αρχική επιφάνεια πειραμάτων 0.05mm cusp height with 1.66mm spacing (επιφάνεια με "ραβδώσεις", ύψους 0.05mm και απόστασης μεταξύ διαδοχικών ραβδώσεων 1.66mm).

5) Εξέταση 4ων ελεγχόμενων παραμέτρων (γωνία κλίσης, feedrate, εφαρμοζόμενη δύναμη και κατεύθυνση στίλβωσης) ως προς το ποιος επιδρά περισσότερο στα αποτελέσματα της κατεργασίας. Κριτήρια αποτέλεσαν η μέση τραχύτητα και το noise ratio, που ορίστηκαν ως:

$$\mu = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (R_a)_i \text{ και } \eta = 10 \log_{10} \left(\frac{\mu^2}{\sigma^2} \right),$$

όπου σ^2 η διακύμανση του R_a στις m μετρήσεις. Χρησιμοποιείται ανάλυση Taguchi για να εντοπιστεί ποιος παράγοντας ασκεί την μεγαλύτερη επίδραση.

Συμπεράσματα:

- Η γωνία κλίσης μεταξύ του polishing disk και του τεμαχίου παίζει τον πιο καθοριστικό ρόλο στη σταθερότητα της προκύπτουσας τραχύτητας.
- Για να επιτευχθεί η επιθυμητή τραχύτητα απαιτείται ρύθμιση της κάθετης δύναμης που εφαρμόζεται.
- Η κατεύθυνση της λείανσης παίζει το μικρότερο ρόλο (συνεπώς δεν απαιτείται ιδιαίτερος σχεδιασμός tool path).

9)2002-Lin:

1) Rigid disks (για παράδειγμα DVD).

2) Χρησιμοποιείται λειαντική πάστα (slurry) τύπου Fujimi 3471 σε συνεργασία με polishing pad τύπου Politex DG-Hi (provided by Rodel).

4) Micro Line AC 319 double sided polishing machine.

5) Επισημαίνονται 64 θέσεις επί του δίσκου για μέτρηση πάχους στρώματος Ni πριν και μετά τη λείανση (η διαφορά του μέσου πάχους πριν και μετά είναι δείκτης του ρυθμού αφαίρεσης υλικού). Σύγκριση αποτελεσμάτων με αναμενόμενα από φόρμουλα Preston $R = K \cdot P \cdot V$

- R= material removal rate.
- P= applied pressure.
- K= Preston coefficient (surface chemistry + solution chemistry + abrasion).
- V= relative velocity.

Διαγράμματα του αφαιρεθέντος υλικού και της ποσοστιαίας ανομοιομορφίας της στίλβωσης συναρτήσει των: (disk location, rotational speed, flow rate of slurry, nozzle locations, applied pressure).

Συμπεράσματα:

- Περισσότερο αφαιρεθέν υλικό στους inner απ' ότι στους outer disks (in contrast to Preston equation).
- Αύξηση του P συνεπάγεται αύξηση του R (όχι αναλογικά ωστόσο).
- Αύξηση του V συνεπάγεται αύξηση του R (όχι αναλογικά ωστόσο).
- Προτείνεται τροποποίηση της εξίσωσης Preston για αύξηση της ακρίβειας (K μεταβλητό (συνάρτηση), αντί για σταθερό).

10)2005-Liu:

2) Μηχανισμός συγκράτησης κοπτικού με compliance για μείωση διακύμανσης δύναμης. Χρήση brass/plastic polishing rings.

3) Επίπεδη επιφάνεια, μέτρηση R_a πριν και μετά.

4) CNC spindle, προσαρμογή force sensor για μέτρηση δύναμης.

5) Παράμετροι (feed rate, spring constant, rotation speed, abrasive particle diameter, type of polishing ring), μέτρηση τραχύτητας, μέσης τιμής και τυπικής απόκλισης της ασκούμενης δύναμης. Χρησιμοποιείται ανάλυση Taguchi με τα εξής συμπεράσματα:

Η τραχύτητα αλλά και η διακύμανση της ασκούμενης δύναμης μειώνονται με:

- μικρότερο feed rate (που ωστόσο οδηγεί σε αύξηση της αφαιρούμενης ποσότητας υλικού).
- μεγαλύτερη rotational speed του grinder.
- μικρότερο abrasive particle size.
- stiffer spring (μέχρι συγκεκριμένου ορίου → ρύθμιση των επιπέδων compliance για βέλτιστο αποτέλεσμα).
- Ως προς το είδος του δακτυλίου στίλβωσης, με plastic επιτυγχάνεται μικρότερο force variation, ενώ με brass επιτυγχάνεται χαμηλότερη τελική τραχύτητα.

11)2005-Xi:

2) Μέσω του grid number (mesh number) ορίζονται με τύπους το μέσο και μέγιστο μέγεθος κόκκων του polishing stone (gaussian distribution). Μέσω της πυκνότητας και του μεγέθους κόκκου υπολογίζεται το Δ (grain interval). Γίνεται σχεδιασμός του polishing stone topography σε 3D. Παρατηρείται το γεγονός ότι η εισχώρηση ενός κόκκου στο τεμάχιο προς στίλβωση κατά τη διάρκεια της κατεργασίας είναι αντίστοιχος μίας δοκιμής Brinell και δίνονται οι σχετικοί τύποι (σκληρότητα, επιφάνεια από διείσδυση σφαίρας).

5) Αρχική εκτίμηση του micro-depth μέσω χρήσης plasticity theory. Ακολουθεί επαναληπτική μέθοδος (διαδοχικών συγκρίσεων με πλήρη επεξήγηση του αλγορίθμου) για τον υπολογισμό του μέγιστου βάθους εισχώρησης των κόκκων του polishing stone στην επιφάνεια προς στίλβωση. Τέλος, γίνεται εκτίμηση της τραχύτητας της επιφάνειας που θα προκύψει μετά τη στίλβωση και σύγκριση με πειραματικές μετρήσεις.

(Σημείωση: Ικανοποιητικό μοντέλο πρόβλεψης προκύπτουσας τραχύτητας, απαιτείται ουσιαστικά μόνο γνώση των στοιχείων της polishing stone (datasheet) και του

τεμαχίου, πιθανώς να μπορεί να χρησιμοποιηθεί αντιστρόφως για επιλογή του κατάλληλου stone).

12)2006-Marquez:

2) [STAGE LEVEL] Η επιλογή grain size και οι polishing operations που θα ακολουθηθούν καθορίζονται από εξελικτικό μοντέλο τραχύτητας, χρησιμοποιούνται καμπύλες οριακής τραχύτητας-χρόνου στίλβωσης για το εκάστοτε grain size και με γνωστό το αρχικό βαθμό τραχύτητας και τον προς επίτευξη στόχο ελαχιστοποιείται ο χρόνος με τις σωστές επιλογές.

3) [PROCESS LEVEL] Γίνεται tool path definition και σε κάθε θέση ορίζεται το μοναδιαίο κάθετο διάνυσμα επιφανείας. Χρησιμοποιούνται Euler quaternions για την περιγραφή του προσανατολισμού του κοπτικού εργαλείου. Οι παράμετροι Euler προσδιορίζονται από τη συνθήκη διαρκούς καθετότητας του κοπτικού στην προς στίλβωση επιφάνεια.

4) Ρομπότ 6 αξόνων (ASEA ABB IRB-3000) τοποθετημένο μπροστά στον πάγκο εργασίας επί του οποίου τοποθετούνται τα προς στίλβωση καλούπια. Motorized tool storage για πλήρη αυτοματοποίηση της κατεργασίας.

5) Force control μέσω πιεζοηλεκτρικού αισθητήρα 3ών αξόνων Kistler 9257A. [OPERATION CONTROL] 4 εξελικτικά μοντέλα ελέγχου, ανάλογα με το αν και πότε επιτυγχάνεται η επιθυμητή τραχύτητα σε σχέση με την πρόβλεψη του [STAGE LEVEL]. Το συγκεκριμένο στάδιο επιτρέπει το stage evolution σε περίπτωση απρόβλεπτης συμπεριφοράς του μοντέλου, ενώ γίνονται περιοδικές μετρήσεις του τελικού σταδίου (φινίρισμα- είτε μέσω roughness, είτε μέσω brightness της τελικής επιφάνειας).

Το polishing pass control βασίζεται στην σχετική (relative) και όχι στην απόλυτη (absolute) γεωμετρία. Είναι απαραίτητη η ύπαρξη αισθητήρα που καθορίζει πλήρως την απόσταση μεταξύ polishing disk και επιφάνειας. Ο έλεγχος της δύναμης επαφής, τέλος γίνεται μέσω βρόχου που φαίνεται στο διάγραμμα ελέγχου που παρατίθεται στο συγκεκριμένο paper.

13)2006-Rosswell:

3) Εισαγωγή συνθήκης compliance-θεωρία Hertz. Η σταθερή δύναμη επαφής δεν εγγυάται σταθερή πίεση. Γίνεται μοντελοποίηση και ανάλυση του contact stress.

Επαφή "δίσκων" με μέγιστη και ελάχιστη ακτίνα καμπυλότητας όπως φαίνεται στο σχήμα του paper. Ασκώντας σταθερή γνωστή δύναμη επαφής και λόγω ενδοτικότητας το σημείο επαφής μεταβάλλεται σε επιφάνεια επαφής το όριο του οποίου έχει ελλειπτικό σχήμα. Η μέγιστη πίεση επιτυγχάνεται στο κέντρο της

ελλειπτικής αυτής περιοχής στο σημείο επαφής των δύο δίσκων. Ορίζεται με βάση την γεωμετρία η μη γραμμική σχέση δύναμης και τάσης.

Γίνεται προσδιορισμός του λόγω μικρού προς μεγάλο ημιάξονα της έλλειψης. (παρατίθενται στο paper οι σχετικοί τύποι και μεθοδολογίες).

4) Hybrid robot 5 αξόνων (tripod(3) + gantry(2)) που συνεργάζεται με active polishing end effector. Ο polishing end effector προσαρμόζεται στην κινούμενη πλατφόρμα του ρομπότ και μπορεί να δεχθεί ποικίλα κοπτικά εργαλεία μέσω αυξομείωσης του ανοίγματος που διαθέτει. Η κίνηση στους 3 άξονες του τριπόδου γίνεται με χρήση πνευματικών κυλίνδρων ενώ η περιστροφή προσδίδεται μέσω pneumatic polishing spindle.

5) Δημιουργείται distribution map της πίεσης υπό σταθερή δύναμη με βάση την ακτίνα καμπυλότητας, και με βάση αυτό κατασκευάζονται τα distribution maps της ροπής που δημιουργείται λόγω τριβής και της ταχύτητας περιστροφής του εργαλείου. Με αυτούς τους χάρτες καθορίζονται τα σημεία tool force και rotational speed που πρέπει να χρησιμοποιηθούν ώστε να έχουμε συνθήκες σταθερής πίεσης, καθώς και το απαιτούμενο tool path.

14)2006-Ryuh:

1) Το τεμάχιο είναι ένα machined mild steel block (SM45C; Korean Standard KS D3752; or ASTM A684). Το καλούπι 1 είναι μία απλή κυρτή επιφάνεια (100 mm · 100 mm) και το καλούπι 2 είναι μία σύνθετη επιφάνεια (200 mm · 100 mm).

2) Η κατεργασία των 2 καλουπιών γίνεται με ένα ball end mill διαμέτρου 10 mm diameter με 1 mm feed width. Έχει σχεδιαστεί και κατασκευαστεί σύστημα αυτόματης αλλαγής κοπτικού εργαλείου (Automatic Tool Changer (ATC)), του οποίου παρέχονται σχέδια και εξηγείται ο τρόπος λειτουργίας (Automatic Bit Changer (ABC), Bit Rotation Device (BRD), collet chuck nut part).

3) Σαν CAD system χρησιμοποιείται CATIA V4 που δημιουργεί αυτόματα το APT source. Αυτό μετατρέπεται σε Cutter Contact (CC) data στο PC. Για τον καθορισμό του polishing tool path χρησιμοποιούνται Peano και Zigzag patterns. Γίνεται προβολή του δισδιάστατου pattern πάνω στο τρισδιάστατο μέσω του λογισμικού Z-map. Για καλύτερα αποτελέσματα στίλβωσης δίνεται γωνία κλίσης κοπτικού εργαλείου 15°, και παρατίθενται οι απαιτούμενοι μετασχηματισμοί (χρήση πινάκων στροφής για προσδιορισμό του πραγματικού tool orientation vector).

Παρατήρηση: Η μέση του τροχού στίλβωσης αδυνατεί να επιτύχει ποιοτική στίλβωση σε κοίλη επιφάνεια, και τα άκρα του δίσκου στίλβωσης είναι αρκετά εύκαμπτα με συνέπεια η εφαρμοζόμενη τάση στο σημείο επαφής με το τεμάχιο να είναι μικρή (επίσης μη ποιοτική στίλβωση). Για αυτό δίνεται η γωνία κλίσης των 15°.

4) Mold polishing station που αποτελείται από automatic tool changer, articulated industrial robot 6 βαθμών ελευθερίας, ένα robot controller και ένα PC που ελέγχει ολόκληρο το station.

5) Υπάρχει αλγόριθμος ελέγχου του συστήματος αυτόματης αλλαγής εργαλείου (επιλογή νέου εργαλείου-έλεγχος ενεργοποίησης του ABC και περιστροφής του BRD- διακοπή παροχής ροπής λειτουργίας στο εργαλείο κατά τη διάρκεια της αλλαγής) και συνολικό σύστημα ελέγχου του συστήματος. Το συνολικό είναι υλοποιημένο σε περιβάλλον Visual C++ 6.0 και περιλαμβάνει συνάρτηση προσομοίωσης για τον έλεγχο της γωνίας τεμαχίου-εργαλείου, manual control του robot και τις συναρτήσεις ελέγχου του αυτόματου συστήματος αλλαγής εργαλείου. Η δημιουργία δεδομένων ελέγχου του ρομπότ γίνεται με τους μετασχηματισμούς πινάκων στροφής που αναφέρθηκαν στο (3).

15)2007-Nagata:

1) Aluminium mold.

2) Στίλβωση σε 3 στάδια, με abrasives #220, #320 και #400 (ball end abrasive tool). Χρήση oil mist για λιπαντικό (και ψυκτικό μέσο) κατά τη διάρκεια της κατεργασίας.

3) Διανυσματική ανάλυση για προσδιορισμό multi-axis Cutter Location (CL) data, με βάση τα 3-axis CL data. Τα 3-axis είναι διαδοχικά διανύσματα θέσεως CL (P_i) και μετατρέπονται σε multi-axis CL data με προσθήκη του κάθετου μοναδιαίου διανύσματος στην επιφάνεια του τεμαχίου σε κάθε σημείο P_i . Ακολουθεί σχεδιασμός τροχιάς (trajectory) με διακριτοποίηση στο πεδίο του χρόνου, απαραίτητος βήμα για την υλοποίηση ψηφιακού ελέγχου. Υπολογίζονται η θέση (position) και ο προσανατολισμός (contact direction-(angle of inclination + angle of rotation)) του κοπτικού εργαλείου για κάθε χρονικό βήμα της χρονικής διακριτοποίησης που έχει επιλεγεί. Πραγματοποιείται compliant motion του ball end abrasive, δηλαδή τα CL data μετατρέπονται σε actual trajectory data λαμβάνοντας υπόψη και τη γεωμετρία του εργαλείου. Τέλος, χρησιμοποιήθηκαν zigzag path topologies για τη δημιουργία tool path.

Σημαντικό! CL-data→ Actual trajectory→ Desired trajectory (automatic teaching of desired trajectory).

4) Ρομπότ 6 αξόνων με αισθητήρα δύναμης 3ών αξόνων.

5) Εφαρμόζεται impedance model following force control με αξιοποίηση θεωρίας ευστάθειας κατά Lyapunov. Για να αποφευχθεί overpolishing του τεμαχίου διατηρείται σταθερή rotational speed και η στίλβωση γίνεται χρησιμοποιώντας τη δύναμη που μετράται από τον τριαξονικό force sensor και τριβή κατά Coulomb και ιξώδη (viscous) τριβή. Γίνεται λεπτομερής ανάλυση του feedback control της δύναμης αλλά και της

θέσης του κοπτικού εργαλείου, με βάση τις αρχές και παραδοχές που αναφέρθηκαν παραπάνω, ενώ παρατίθεται και διάγραμμα ελέγχου του position/force control.

16)2007-Wu:

2) Ball end mill. Η στίλβωση θα γίνει με elastic ball type wheel που θα αλλάζει μέσω Automatic Tool Changer (ATC), και θα έχει ως στόχο μόνο την αφαίρεση των cusps που δημιουργούνται κατά την αρχική κατεργασία, προ στίλβωσης.

5) Ορίζεται παράμετρος $S_p \left(S_p = \frac{(V+f)P}{f \cdot H_V} \right)$ ανάλογη με την πραγματική αφαιρούμενη ποσότητα υλικού. Χρησιμοποιείται η εξίσωση Preston (η οποία ωστόσο απεδείχθη μη ικανοποιητική ως προς την ακρίβεια σε προηγούμενο paper-(9)2002-Lin) και υπολογίζεται μέσω πειραμάτων η σταθερά Preston K. Γίνεται κατανομή πίεσης στην επιφάνεια επαφής κοπτικού-τεμαχίου, αλλά και πάνω σε κάθε cusp και υπολογίζεται η μέγιστη τιμή της πίεσης, ενώ επίσης υπολογίζεται το contact width (πιθανώς με θεωρία κρούσης του Hertz).

Συμπεράσματα:

- Δίνεται μόνο μία γενική περιγραφή της διαδικασίας χωρίς ανάλυση του πώς υπολογίζονται όλα τα απαραίτητα δεδομένα, απαραίτητη η εφαρμογή μεθοδολογίας ευρισκόμενης σε άλλα paper για την υλοποίηση της μεθόδου.
- Αποδεικνύεται ότι μόνο η αποκοπή των cusps δίνει ιδιαίτερα ικανοποιητική ποιότητα λείανσης χωρίς να επηρεάζει τις διαστάσεις του τεμαχίου, αφού αξιοποιούνται τα ίδια CL data με της κατεργασίας κοπής (πιθανώς να χρειαστεί έλεγχος ποιότητας-μετρήσεις τραχύτητας ώστε να εκτιμηθεί αν τα επίπεδα ακρίβειας είναι ικανοποιητικά για την περίπτωση μας).

17)2007-(a) Nagata:

- Προσαρμογή του (15)2007-Nagata για την χρήση των πορισμάτων και παραδοχών του σε ένα robotic sanding system για λείανση επίπλων με free-formed surfaces.

1) Υλικό είναι το ξύλο (έπιπλα).

2) The robot sander first removed the cusp marks using a rough sanding paper #80, then sanded the surface using a sanding paper with a middle roughness #220 and finally a smooth paper #400.

3) Ίδια στοιχεία ανάλυσης επιφανείας-ορισμού τροχιάς. Διαφορά: [CL-data→ Desired trajectory (ταυτίζονται)].

4) 6 DOF (Degrees Of Freedom) industrial robot (FS20N with a PC-based controller provided by Kawasaki Heavy Industries). Σύνδεση sanding tool μέσω του force sensor στο άκρο του robot (tip of robot arm).

5) Παραπλήσια μέθοδος ελέγχου δύναμης και θέσης με (15)2007-Nagata.

Συμπέρασμα: Δύσκολα αξιοποιήσιμο στην περίπτωση μας, το γυάλισμα ξύλου κυμαίνεται σε αρκετά μικρότερες απαιτήσεις τελικής τραχύτητας σε σχέση με το καλούπι του δικού μας παραδείγματος, ενώ και τα χρησιμοποιούμενα εργαλεία διαφέρουν αισθητά ως προς τις διαστάσεις, άρα και ως προς την επιτευχθείσα ακρίβεια. (Διαφορά τάξης μεγέθους, πιο χρήσιμα τα αποτελέσματα-συμπεράσματα του paper (15)2007-Nagata).

18)2008-Liao:

2) Dual purpose compliant toolhead. Το ρομπότ προσφέρει την κίνηση του κοπτικού ως προς το τεμάχιο, ενώ η κεφαλή προσφέρει την δύναμη επαφής.

3) Διαφοροποίηση micro και macro contacting models.

- Micro: χρήση μεγέθους κόκκων για προσδιορισμό μικρο-βάθους κοπής καθενός → προσδιορισμός τραχύτητας.
- Macro: χρήση Hertzian model κρούσης, όπως αυτό αναπτύχθηκε στο (13)2006-Rosswell).

Εδώ χρησιμοποιήθηκε η macro ανάλυση για τη μοντελοποίηση της δύναμης επαφής, ωστόσο δεν δίνονται σαφή δεδομένα για τον τρόπο χάραξης του tool path (δίνεται μόνο ο G-code).

4) 5-αξονικό ρομπότ (3 axis parallel robot-ParaWrist tripod + 2 axis gantry). Ρύθμιση δύναμης επιτυγχάνεται μέσω 3ων πνευματικών κυλίνδρων, ενώ περιστροφή μέσω pneumatic spindle (όμοια με 13)2006-Rosswell).

5) Χρήση PID ελεγκτή, τόσο για polishing, όσο και για deburring. Γίνεται έλεγχος δύναμης (πίεσης στην ουσία), ενώ δίνονται τα εξής διαγράμματα για καλύτερη κατανόηση του μοντέλου ελέγχου:

- Block diagram illustrating the dynamic interaction.
- Closed loop pressure control block diagram (polishing).
- Closed loop tool length control block diagram (deburring).

19)2008-Shinhaeri:

- Χρήση εξίσωσης Preston εφαρμοσμένης μέσω περιβάλλοντος Matlab σε Magneto-Rheological Finishing (MRF). Γίνεται μοντελοποίηση και μαθηματικός υπολογισμός του material removal rate στα XZ και YZ planes για

convex, concave και flat surfaces, καθώς και εξέταση διαφορετικών influence parameters (wheel speed, magnetic field strength, fluid viscosity, fluid age, fluid type, workpiece material, συνδυασμός τους σε removal adjustment factor (γινόμενο)).

- Αμφίβολη η πιθανή χρησιμότητα του στην δική μας περίπτωση, λόγω τελείως διαφορετικής μεθόδου στίλβωσης.

20)2008-Shiou:

1) Εξηγείται η πλήρης μέθοδος που ακολουθήθηκε μέσω ανάλυσης Taguchi για τον προσδιορισμό της βέλτιστης τιμής διαφόρων παραμέτρων στίλβωσης για το υλικό STAVAX mould stainless steel (equivalent to ANSI 420).

5) Ορίστηκαν τα levels και τα factors για τη μέθοδο Taguchi και έγιναν οι πίνακες με τους δυνατούς συνδυασμούς τους. Στη συνέχεια έγινε Analysis Of Variance (ANOVA), full factorial και confirmation experiments σε κέντρο κατεργασιών και ορίστηκε ο optimal συνδυασμός factor levels.

Συμπέρασμα: Χρήσιμη μεθοδολογία, μπορεί να χρησιμοποιηθεί με δεδομένο το υλικό τεμαχίου για να επιτύχουμε τα βέλτιστα αποτελέσματα και να εξαλείψουμε παράγοντες που θα επηρέαζαν την αξιοπιστία της μεθόδου που θα ακολουθηθεί.

21)2008-(b) Shiou:

Δοκιμή ball polishing του ίδιου τεμαχίου με αυτό του paper 20)2008-Shiou, ωστόσο εισάγεται με ειδική διάταξη κατακόρυφη ταλάντωση της επιφάνειας προς στίλβωση με δεδομένο πλάτος και συχνότητα που ποικίλει (η συχνότητα εισάγεται ως επιπλέον παράγοντας-factor με 3 επίπεδα-levels στην ανάλυση Taguchi).

Παρατήρηση: Αξιοποιούνται τα εξής πλεονεκτήματα της vibrating-assisted στίλβωσης:

- feature resolution and smaller tolerances.
- faster material removal.
- ability to achieve complex 3D geometries in a range of previously intractable materials.

Επαλήθευση όσων αναφέρθηκαν αποτελεί η σύγκριση του επιπέδου φθοράς των polishing balls, όπου φαίνεται σαφώς ότι στην στίλβωση που υποβοηθείται με vibration του τεμαχίου έχουμε μικρότερο επίπεδο φθοράς, άρα και μεγαλύτερη "συνέπεια" στην ποιότητα της κατεργαζόμενης επιφάνειας.

22)2009-Hascoet:

1), 2) Εξετάζεται μόνο η κυκλική κάτοψη του κοπτικού εργαλείου, καθώς και η κάτοψη της επίπεδης επιφάνειας του τεμαχίου προς στίλβωση-δεν ενδιαφέρουν τα υλικά και επιπρόσθετα στοιχεία για το τεμάχιο ή το κοπτικό.

3) Ακολουθούνται τα εξής βήματα:

- Εξετάζονται κυκλική τροχοειδής τροχιά εργαλείου (κύκλοι συνδεδεμένοι με μικρά εφαπτομενικά linear τμήματα) και ομαλή τροχοειδής τροχιά (σταθερή ακτίνα καμπυλότητας σε κάθε σημείο της). Ορίζονται η ακτίνα του τροχοειδούς κύκλου (R_{troch}), η ακτίνα του κοπτικού (R_{tool}) και η απόσταση μεταξύ διαδοχικών κύκλων της τροχοειδούς τροχιάς (S_{tr} -απόσταση από κέντρο σε κέντρο), και εξετάζονται συνδυασμοί αυτών ως προς το ακτινικό βάθος κοπής (R_{dc}) που δίνουν κατά μήκος του ακολουθούμενου μονοπατιού.
- Γίνεται ορισμός 2 usual cases και 3ων limit cases.
- Το ομαλό τροχοειδές μοντέλο ορίζεται διανυσματικά και απαιτείται numerical computation, καθώς η μέθοδος είναι αρκετά πιο περίπλοκη από το κυκλικό τροχοειδές μοντέλο.
- Γίνεται πλήρες tool path calculation για κατεργασία rocketing. Το τροχοειδές προφίλ απαιτείται να ακολουθεί το rocket profile (ορισμός guide line-geometries, όπως αναφέρονται στο SolidCAM), και εν συνεχεία ορισμός ομαλής τροχοειδούς κίνησης κοπτικού μέσω παραμετροποίησης της guide line.
- Υπολογισμός και μέτρηση ασκούμενης δύναμης μέσω του αναπτυχθέντος μοντέλου-επικύρωση ακρίβειας της μεθόδου μοντελοποίησης που ακολουθήθηκε.

23)2009-Klocke:

Γενικά: Εστιάζει στο computer assisted monitoring της διαδικασίας γυαλίσματος με βάση το CMP polishing (Chemical-Mechanical Planarization). Επισημαίνεται ότι, παρότι τα περισσότερα χαρακτηριστικά της CMP δεν μπορούν να αντιστοιχιστούν σε άλλα είδη στίλβωσης, λόγω σημαντικών διαφορών στα nano-scale characteristics των αλληλεπιδράσεων και των μηχανισμών της εκάστοτε κατεργασίας, ωστόσο υπάρχουν κάποια aspects που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να υποστηρίξουν τη μελέτη άλλων κατεργασιών στίλβωσης.

Αντικείμενο-στόχος: Monitoring and online calculation of mechanical, chemical, thermal indicators of the process which allows the examination of the polishing

behavior of various materials. Χρησιμοποιείται το λογισμικό Labview (programming environment).

Ορισμός βασικών παραμέτρων:

- polishing system.
 - ✓ polishing tool.
 - ✓ polishing agent.
 - ✓ polishing slurry.
- machining parameters.
 - ✓ pressure.
 - ✓ relative velocity.

Στα figures που παρατίθενται στο paper δίνονται όλες οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται και ένα overview του συστήματος ελέγχου (monitoring-data acquisition and analysis system) που χρησιμοποιείται. Ακολουθεί monitoring του slurry condition (temperature, pH, electrical conductivity, zeta potential), ενώ στη συνέχεια γίνεται tribological analysis για τον υπολογισμό της απαιτούμενης δύναμης, και εκτελούνται τα απαραίτητα πειράματα με διάφορα υλικά (polishing silicon nitride with ceria).

24)2009-Makhanov:

3) Εισαγωγή περιορισμών:

- Scallop height constraints.
- Local accessibility constraints.

Ορίζονται οι surjective και bijective functions, καθώς και η N-διάστατη Space Filling Curve (SFC). Βήματα adaptable SFC tool path generation method:

- Construction of a basic rectangular grid.
- Generation of the adaptive space-filling tool path on the grid (πύκνωση πλέγματος σε σημεία που αυτό απαιτείται, για παράδειγμα σε σημεία όπου έχουμε απότομη μεταβολή της ακτίνας καμπυλότητας της κατεργαζόμενης επιφάνειας).
- Correction of the tool path.
- Inserting additional points along the path to reduce the kinematics error. The SFC is constructed as a Hamiltonian path on a grid-like graph using a cover and merge algorithm.

Στη συνέχεια περιγράφεται μαθηματικά η μέθοδος grid generation, ορίζεται η συνάρτηση ελέγχου για τη βελτιστοποίηση του tool path, γίνεται inserting additional tracks όπου αυτό χρειάζεται, ώστε να καλύπτεται ο περιορισμός ως προς το scallop

height, ενώ γίνεται machining strip evaluation και έλεγχος ως προς το gouging μέσω των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του κοπτικού. Κατόπιν, δημιουργείται μέθοδος πλήρους κάλυψης επιφανείας που δημιουργείται από Bezier ή NURBS, περιπτώσεις στις οποίες το προηγούμενο μοντέλο δεν επαρκεί (χρήση curvilinear SFC, αντί για rectilinear SFC (Hilbert, Peano, Moore's paths)).

4) 5 axis machining (παρουσιάζονται μέθοδοι optimization του tool path μέσω χρήσης space-filling curves).

25)2009-Pessoles:

1) Two single patch test surfaces, a plane surface and a convex surface. These are machined in 50mm×50mm section blocks made of X38CrMoV5 steel.

2) Τέσσερα διαφορετικά στάδια abrasive για pre-polishing (FEPA 120, 240, 600, 1200). Τα abrasives είναι δίσκου διαμέτρου 18mm κολλημένοι στην εύκαμπτη υποστήριξη. Για επίπεδα στίλβωσης 120, 240 and 600 (FEPA), το abrasive είναι φτιαγμένο από aluminium oxide (Al₂O₃) within a polymeric material και από silicon carbide πάνω σε χαρτί για επίπεδο 1200 (FEPA). Για το φινίρισμα, χρησιμοποιήθηκαν 3 συνθετικές διαμανταλοιφές (diamond pastes) επιπέδου στίλβωσης 9μm, 3μm και 1μm.

3) Γίνεται μαθηματικός ορισμός της τροχοειδούς καμπύλης (κύκλος και ευθύγραμμο τμήμα μήκους D_{tr} με αρχή την αρχή του κύκλου και τυχαίο πέρασ-ο κύκλος περιστρέφεται σαν τροχός επί τυχαίας καμπύλης(περιστρέφοντας μαζί του και το ευθύγραμμο τμήμα), με αποτέλεσμα το πέρασ του ευθύγραμμου τμήματος να δημιουργεί την τροχοειδή καμπύλη). Ακολουθεί σύνδεση των μεγεθών της τροχοειδούς καμπύλης με τις παραμέτρους της στίλβωσης και υπολογισμός της effective tool diameter (D_{eff}) και της D_{tr} .

Ορίζεται επίσης η Space-Filling Curve Hilbert, 1ης και κάθε είδους ανώτερης τάξης.

Υπολογίζεται το tool path. Σαν οδηγός για τη χάραξη της τροχοειδούς πορείας που θα ακολουθήσει το εργαλείο χρησιμοποιείται η SFC Hilbert, πράγμα που εξασφαλίζει ομοιόμορφη κάλυψη της επιφάνειας. Με βάση αυτήν υπολογίζονται τα εφαπτομενικά \vec{f} και κάθετα \vec{n} διανύσματα στη βοηθητική καμπύλη που είναι απαραίτητα για τη χάραξη του tool path.

4) 5 axis milling machining.

5) Χρήση νόμου Preston και εξέταση γωνίας κλίσης κοπτικού (tilt angle) και επίδρασής της στην εφαρμοζόμενη δύναμη στίλβωσης συναρτήσε του displacement. Η τελική έκθεση των αποτελεσμάτων γίνεται με χρήση των παραμέτρων Ssk

(Skewness of topography height distribution) και Sku (Kurtosis of topography height distribution), όπως αυτά ορίζονται στο Appendix του paper.

26)2009-Tsai:

Γενικά: Σχεδιάζεται ένα Uniform Material Removal model (UMR) για ένα Automatic Mold Polishing System (AMPS).

Χωρισμός παραγόντων σε κινηματικούς (ρυθμιζόμενοι από την εργαλειομηχανή) και λοιπούς (αφορούν το είδος του υλικού του τεμαχίου και το σιλικωτικό που χρησιμοποιείται).

1) Two identical molds were used for comparison. Both are convex in nature with the dimensions $120 \times 130 \text{mm}^2$ when projecting to the horizontal plane.

2) Copper polishing ring with NAK80.

3) Δίνεται μαθηματικός παραμετρικός ορισμός επιφάνειας Non-Uniform Relational B-spline Surface (NURBS). Υπολογίζονται τα first και second fundamental matrices και εν συνεχεία η Gaussian curvature (κ_G) και mean curvature (κ_M). Τέλος υπολογίζονται οι 2 principal radii of curvature. Τέλος, ως σημειωθεί ότι μπορεί να γίνει πλήρης classification κάθε σημείου της συγκεκριμένης επιφάνειας βάσει των 2 τιμών κ_G και κ_M σε αυτό, ως εξής:

- $\kappa_G > 0$ και $\kappa_M < 0 \Leftrightarrow$ convex elliptic point.
- $\kappa_G > 0$ και $\kappa_M > 0 \Leftrightarrow$ concave elliptic point.
- $\kappa_G > 0 \Leftrightarrow$ hyperbolic point.

Γίνεται ανάλυση της επαφής του polishing ring σε κάθε είδος επιφάνειας και υπολογίζεται το πλάτος επαφής της προς λείανση επιφάνεια με τους κόκκους της διαμανταλοιφής που χρησιμοποιείται.

Paths: One (Mold 1) was polished by using Peano path with UMR control, the other (Mold 2) was polished by scan-weaving path.

5) Μοντέλο φθοράς κατά Peterson. Επίσης υπολογίζεται το βάρος αφαιρούμενου υλικού ανά μονάδα επιφάνειας επαφής και ο ρυθμός μεταβολής του συγκεκριμένου μεγέθους και υπολογίζεται η δύναμη επαφής σαν γινόμενο της επιφάνειας επαφής και της ασκούμενης πίεσης. Εν συνεχεία ακολουθείται ανάλυση Taguchi για τα material removal experiments και εντοπίζεται το πόσο επηρεάζει κάθε παράγοντας τον λόγο S/N του material removal.

27)2009-Wang:

3) Ανάλυση μοντέλου επιφανείας που εστιάζει στα γεωμετρικά μεγέθη των grains (diameter, number of grains per unit area, grain ratio, χρήση Gaussian distribution για

εκτίμηση height protrusion) και στον υπολογισμό του βαθμού εισχώρησής τους στην προς στίλβωση επιφάνεια για τον υπολογισμό της δύναμης και του material removal rate ως προς το depth indentation των abrasive grains.

5) Ακολουθείται elastic και plastic deformation analysis και υπολογίζεται το depth of indentation, η πίεση που ασκείται, καθώς και τα linear removal intensity (removal depth of per unit contact length) και material removal depth της επιφάνειας κατεργασίας.

Τέλος, εκφράζονται μέσω σχέσεων και διαγραμμάτων τα αποτελέσματα, ενώ παρατίθεται πλήρες διάγραμμα ροής του συγκεκριμένου μοντέλου.

28)2009-Wu:

1) The work material is JIS SKD61 (AISI H13) tool steel of HRC50.

2) The abrasive stone is WA (white Al₂O₃).

5) Σχεδιασμός Neuro-Fuzzy decision-making system.

Παράγοντες που μεταβάλλονται:

- Abrasive stone grain size.
- Polishing pressure.
- Polishing time.
- Workpiece rotational speed.
- Initial mold surface roughness.

(rest factors remain constant).

Ακολούθησε performance test set up, όπου και μετρήθηκε ο χρόνος επίτευξης οριακής τραχύτητας για συγκεκριμένο grain size και rotational speed, μεταβάλλοντας την αρχική τραχύτητα της επιφάνειας. Επίσης χαράχθηκαν οι polishing efficiency curves (ρυθμός μεταβολής της τραχύτητας επιφανείας συναρτήσει της αρχικής τραχύτητας για τα διαφορετικά grain size). Με βάση αυτά περιορίζουμε τους προς εξέταση συνδυασμούς επιπέδων των παραγόντων, αφού είναι προφανές ότι με πολλούς εξ αυτών δεν είναι δυνατό να έχουμε βελτιστοποίηση του αποτελέσματος της κατεργασίας.

Γίνεται definition των membership functions του Neuro-Fuzzy decision-making system με χρήση της κανονικής (Gaussian κατανομής) και με κατάλληλη επιλογή απόκλισης για κάθε περίπτωση, ώστε να επιτυγχάνεται ικανοποιητικό επίπεδο διακριτοποίησης του εκάστοτε μεγέθους.

Truthed data sets χρησιμοποιούνται για το establishment 96 κανόνων του συστήματος, με βάση τους οποίους γίνονται οι επιλογές, ενώ με τα αποτελέσματα

που εξάγονται πραγματοποιείται ένα είδος ανάδρασης και adjustment των membership functions μέσω χρήσης Root Mean Squared Error (RMSE).

Στόχος: Time-minimized optimal set of polishing parameters (πιθανή χρήση αυτής της μεθόδου αντί της ανάλυσης Taguchi, καθώς εξετάζουμε όχι μόνο την ποιότητα των αποτελεσμάτων της στίλβωσης, αλλά και τον χρόνο που απαιτείται για την αποπεράτωση της κατεργασίας).

29)2010-Tam:

2) Χρησιμοποιείται elliptic tool στις προσομοιώσεις που παρουσιάζονται.

3) Αναφέρονται εκ νέου παραδείγματα tool paths:

- scanning path (u-path).
- bi-directional scanning path.
- Hilbert path.
- Peano path.

Το πλάτος της περιοχής στίλβωσης που καλύπτεται μέσω της τροχοειδούς κίνησης του κοπτικού εργαλείου είναι μεγαλύτερο από την απόσταση δύο γειτονικών γραμμών του tool path, συνεπώς, είναι προφανές ότι υπάρχει βαθμός επικάλυψης, διαφορετικός ανάλογα με το κάθε είδος tool path, που επηρεάζει την ποσότητα αφαιρούμενου υλικού. Δίνεται το διάγραμμα του peak-to-valley height (h_{pv}) συναρτήσει του pitch (gap between adjacent path lines). Τέλος κατασκευάζονται οι τρισδιάστατοι χάρτες αφαιρεθέντος υλικού για τα 4 διαφορετικά scanning tools.

Σημείωση! Αξιοσημείωτη ομοιότητα bi-directional και Peano, όπως αναμενόταν από το similarity των δύο μοτίβων ως προς τη μέθοδο με την οποία επιτυγχάνεται το surface-filling.

- Δίνονται διαγράμματα normalized peak height συναρτήσει του path density για κάθε tool path και για διάφορες γεωμετρίες κοπτικών εργαλείων.
- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για επιλογή κατάλληλου εργαλείου συναρτήσει ακολουθούμενου tool path, για βελτιστοποίηση του αποτελέσματος ως προς την ελαχιστοποίηση του βάθους χαραγής και του peak-to-valley height.

30)2013-Sprauel:

1) Workpiece used for the experimental validation: The polished surface is a part of friction

surface of unicompartmental knee prostheses.

2) First, the surface is rough machined with a flat end mill. Next an abrasive ball tool is used to semi-finishing. The finishing is realized with a polishing tool composed of

emery grain (size around 50 μ m) linked by a supple rubber. The geometry of the polishing tool is a cylinder of 32 mm in diameter and height. During the polishing operation, lubricant is employed. The flow used is a grinding lubricant with a low fat content and a pressure of around 5 bars.

3) Μέθοδος χάραξης του tool path:

- Σύνολο σημείων M_i υπολογισμένα από σύστημα CAM. (σημεία επί της καμπύλης Hilbert/Peano ή οποιουδήποτε Space-Filling Curve pattern).
- Χρήση 5-degree polynomial interpolation για δημιουργία smooth curvature.
- Computation του polishing tool path μεταξύ 2 διαδοχικών σημείων M_i και M_{i+1} .
- Παρουσιάζονται οι διαφορετικές μορφολογίες των elementary patterns, ανάλογα με τις τιμές των παραμέτρων R και α που χρησιμοποιούνται στη σχέση ορισμού της καμπύλης του polishing path.
- Computation της κλίσης (inclination) του κοπτικού εργαλείου κατά μήκος του carrier tool path trajectory.

5) Ακολουθεί tool wear optimization με 2 μοντέλα:

- Non uniform tool wear with trochoid patterns.
- Uniform tool wear with Spade patterns.

Καθώς και βελτιστοποίηση του τρόπου κάλυψης (covering) της επιφάνειας.

31)2013-Uddeholm polishing 05:

Δίνονται γενικές πληροφορίες και guidelines ως προς τα εξής:

- Λόγοι για τους οποίους επιδιώκεται καλό φινίρισμα επιφάνειας.
- Ποιοι παράγοντες επηρεάζουν την τελική ποιότητα της επιφάνειας.
- Αναφορά ειδών tool steels που χρησιμοποιούνται και surface preparation χωρισμένης σε 4 είδη-στάδια:
 - ✓ grinding (και grinding hints).
 - ✓ lapping.
 - ✓ polishing (και polishing hints).
 - ✓ buffing.
- Περιγραφή των abrasives και των lubricants και ταίριασμα του καθενός με το αντίστοιχο στάδιο της στίλβωσης για το οποίο ενδείκνυται-προορίζεται.
- Επίλυση προβλημάτων όπως orange peel (όψη φλοιού πορτοκαλιού) και pitting (pin holes occurring on polished surface).
- Αναφορά σε τρόπους μέτρησης τραχύτητας και γενικά σε τρόπους εκτίμησης της ποιότητας της προκύπτουσας επιφάνειας, καθώς και σύντομη αναφορά

και επεξήγηση των εργαλείων και διατάξεων με τα οποία γίνεται η μέτρηση των εκάστοτε μεγεθών.

Συμπέρασμα: Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη λήψη αποφάσεων κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων και σαν ένας χρήσιμος οδηγός-βοήθημα για την μέτρηση των μεγεθών που απαιτούνται για την ποσοτικοποίηση των εξαγόμενων αποτελεσμάτων και την εξαγωγή συμπερασμάτων.

1.3 Δομή Εργασίας

Στην παρούσα διπλωματική παρουσιάζονται αρχικά, στα πλαίσια της βιβλιογραφικής ανασκόπησης, κάποιες μελέτες που έχουν γίνει με στόχο την αυτοματοποίηση της στίλβωσης. Επιπλέον, σημειώνονται τα βασικότερα στοιχεία κάθε μίας από αυτές τις απόπειρες και γίνεται μία ενδεδειγμένη προσπάθεια εντοπισμού πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων με έμφαση σε πιθανές βελτιώσεις.

Στο πρώτο εισαγωγικό κεφάλαιο, παρουσιάζεται ο σκοπός της εργασίας, πραγματοποιείται μία αρκετά εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση και παράθεση βασικών στοιχείων των ήδη πραγματοποιηθέντων ερευνών, και εκτίθεται η δομή της εργασίας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο της εργασίας, που ακολουθεί τη βιβλιογραφική ανασκόπηση, γίνεται μία εισαγωγή στα βασικά στοιχεία της στίλβωσης, με παράθεση ορισμών και διακρίτοποίηση της διαδικασίας με βάση διάφορα κριτήρια. Επιπλέον αντιστοιχίζεται κάθε στάδιο της διαδικασίας στα κατάλληλα εργαλεία και γίνεται μία συνοπτική περιγραφή της χειροκίνητης στίλβωσης, που θα χρησιμοποιηθεί σαν βάση για τη διεξαγωγή των πειραμάτων. Τέλος παρατίθενται κάποια στοιχεία της θεωρίας επιφανειών.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται εισαγωγή της έννοιας της τροχοειδούς καμπύλης και πλήρης παραμετρικός ορισμός της. Ο ορισμός της γίνεται αρχικά με οδηγό καμπύλη τον άξονα Ox . Εν συνεχεία χρησιμοποιούνται δύο μοντέλα, ένα για μικρές κλίσεις οδηγού καμπύλης και ένα ακριβές μοντέλο, για να επεκταθούμε σε χάραξη τροχοειδούς με οποιαδήποτε οδηγό καμπύλη του επιπέδου Oxy . Κατόπιν, με δεδομένη την επιλογή δακτυλίου στίλβωσης ως εργαλείο δημιουργείται μέθοδος επιλογής κατάλληλων τιμών παραμέτρων τροχοειδούς για να επιτυγχάνεται πληρότητα και ομοιομορφία κάλυψης της επίπεδης επιφάνειας.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται καταγραφή των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν και της διαδικασίας με την οποία κατασκευάστηκαν οι δύο βάσεις για την πρόσδεση του grinder στο κέντρο κατεργασιών CNC. Η πρώτη βάση είναι άκαμπτη, ενώ η δεύτερη χρησιμοποιεί γραμμικά ρουλεμάν και ελατήρια ή κατάλληλα λάστιχα για τον

προσδιορισμό της ασκούμενης δύναμης. Δίνονται φωτογραφίες και σχήματα και των δύο κατασκευών και γίνεται ανάλυση και αιτιολόγηση των περιπτώσεων για τις οποίες συνιστάται η χρήση της μίας ή της άλλης ανάλογα με το είδος της προς στίλβωση επιφάνειας και το εργαλείο στίλβωσης που έχει επιλεγεί.

Στο πέμπτο κεφάλαιο δίνονται ορισμένα προκαταρκτικά στοιχεία που προηγήθηκαν της πειραματικής διαδικασίας. Γίνεται υπολογισμός της σκληρότητας του δοκιμίου και εκτίθεται η μέθοδος δημιουργίας αρχικής τραχύτητας υπό τη μορφή αυλακώσεων. Επίσης, υπολογίζονται γεωμετρικά οι περιορισμοί ως προς την περιστροφή του δακτυλίου περί του κέντρου περιστροφής του και δίνεται μία βασική μεθοδολογία για τον υπολογισμό του tool path στις τρεις διαστάσεις. Τέλος, γίνεται συγγραφή και εκτέλεση σε γλώσσα προγραμματισμού C ενός δισδιάστατου μοντέλου υπολογισμού του σημείου που θα δίνεται σε G-code συναρτήσεως των σημείων επαφής του δακτυλίου στην εκάστοτε επιφάνεια, κυρτή ή κοίλη, όταν αυτή δίνεται από συγκεκριμένη εξίσωση.

Στο έκτο κεφάλαιο γίνεται μία περιγραφή των πειραμάτων που έγιναν, είτε χειροκίνητα, είτε αυτοματοποιημένα και καταγράφονται τα εξαγόμενα αποτελέσματα.

Στο έβδομο κεφάλαιο εκτίθεται μία ανασκόπηση των συμπερασμάτων που εξαγονται από την συγκεκριμένη εργασία και παρατίθενται δυνατότητες μελλοντικής μελέτης επί του ίδιου αντικειμένου.

Ακολουθούν τέσσερα παραρτήματα. Στο πρώτο από αυτά παρατίθενται οι κώδικες Precise Model χάραξης τροχοειδούς και 2D Model δημιουργίας G-code data, γραμμένοι σε γλώσσα προγραμματισμού C. Στο δεύτερο παρατίθενται οι G-codes που χρησιμοποιήθηκαν, αφενός για τη δημιουργία αρχικής τραχύτητας μέσω αυλακώσεων στο δοκίμιο και αφετέρου για εφαρμογή τροχοειδούς επίπεδου pattern στις αυτοματοποιημένες δοκιμές. Στο τρίτο παράρτημα παρατίθενται οι σχέσεις της μεθόδου Newton-Raphson για την επίλυση μη γραμμικών συστημάτων (2 σχέσεις-2 άγνωστοι) που χρησιμοποιήθηκε στον κώδικα του 2D Model, ενώ στο τέταρτο παράρτημα παρατίθενται κάποια datasheets με τεχνικά χαρακτηριστικά από εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν στην συγκεκριμένη εργασία.

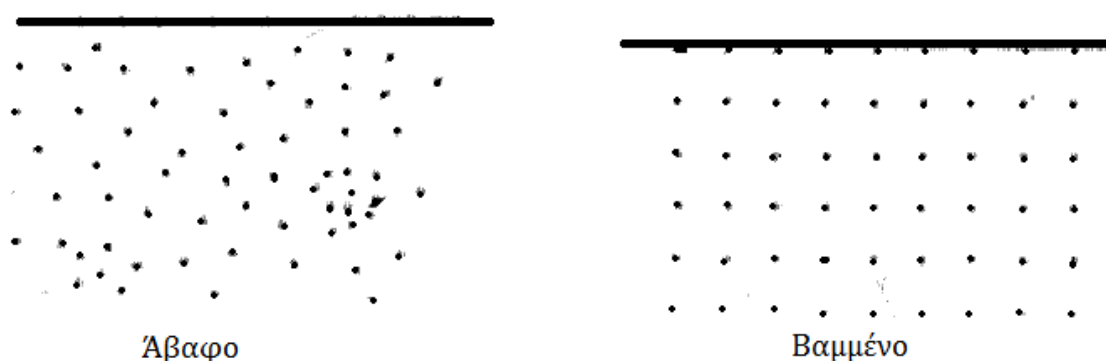
Η διπλωματική εργασία συνοδεύεται και από ένα CD-ROM που περιέχει όλους τους κώδικες που χρησιμοποιήθηκαν, τα αρχεία excel που δημιουργήθηκαν, καθώς και φωτογραφίες και σχέδια εξαρτημάτων των βάσεων που έγιναν μέσω του σχεδιαστικού περιβάλλοντος του SolidWorks.

2 Ορισμοί και γενικά στοιχεία

2.1 Ορισμός και κατηγοριοποίηση της στίλβωσης

Με τον όρο «στίλβωση» ή «γυάλισμα» γίνεται αναφορά στην επιφανειακή συμπίκνωση μορίων στην κατεργαζόμενη επιφάνεια. Κατά τη διάρκεια της στίλβωσης δημιουργείται μία νέα επιφάνεια, ελάχιστα χαμηλότερα της προηγούμενης. Ένα μέρος των μορίων που βρίσκονται άνωθεν αυτής θα παραμείνουν επάνω στο εργαλείο κατεργασίας, ένα μέρος θα διασκορπισθεί στο περιβάλλον, ενώ τα υπόλοιπα θα συγχωνευθούν στην καινούρια επιφάνεια που δημιουργείται. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη συμπίκνωση των μορίων πάνω στην κατεργαζόμενη επιφάνεια, γεγονός που δίνει την ψευδαίσθηση του «γυαλισματος», καθώς η συμπίκνωση των μορίων δεν αφήνει το φως να περάσει μέσα στο μέταλλο σε κανένα ποσοστό του, αναγκάζοντας το να ανακλαστεί ολκίως, δίνοντας την εικόνα επιφάνειας- «καθρέφτη».

Από τα προαναφερθέντα εξάγεται εύκολα το συμπέρασμα ότι η στίλβωση αποτελεί μία μορφή επιφανειακής σκλήρυνσης. Επειδή δε σε άβαφα μέταλλα, όπου συναντάται ακανόνιστη κατανομή μορίων, θα παραμείνουν κάποια κενά μετά τη στίλβωση, συμπεραίνουμε ότι όσο πιο σκληρός ο χάλυβας, τόσο καλύτερη τελική ποιότητα επιφάνειας είναι δυνατό να επιτευχθεί μέσω της στίλβωσης. Ένας γενικός κανόνας είναι ότι, όσο αυξάνεται η σκληρότητα του μετάλλου που επιθυμούμε να γυάλισουμε, τόσο πιο δύσκολη η κατεργασία του, αλλά και τόσο καλύτερο το αποτέλεσμα της στίλβωσης παράλληλα. Στο ακόλουθο σχήμα, φαίνεται η διαφορά στην διάταξη των μορίων μεταξύ ενός βαμμένου και ενός άβαφου χάλυβα.



Σχήμα 2-1. Διάταξη μορίων σε βαμμένο και άβαφο χάλυβα.

Στη συγκεκριμένη εργασία ως μέτρο της ποιότητας της επιφάνειας θα χρησιμοποιείται η peak-to-valley τραχύτητα (R_t), η οποία ορίζεται βάση του μέγιστου

βάθους κοιλάδας R_v (maximum valley depth) και του μέγιστου ύψους κορυφής R_p (maximum peak height), ως εξής:

$$R_t = R_p - R_v = \max_i(y_i) - \min_i(y_i) \quad (2-1)$$

όπου με y_i συμβολίζονται τα ύψη και βάθη από τη μέση γραμμή του προφίλ τραχύτητας της προς εξέταση επιφάνειας. Με βάση την peak-to-valley τραχύτητα καθίσταται δυνατό να προχωρήσουμε σε ένα βασικό διαχωρισμό των επιπέδων στίλβωσης, ως εξής:

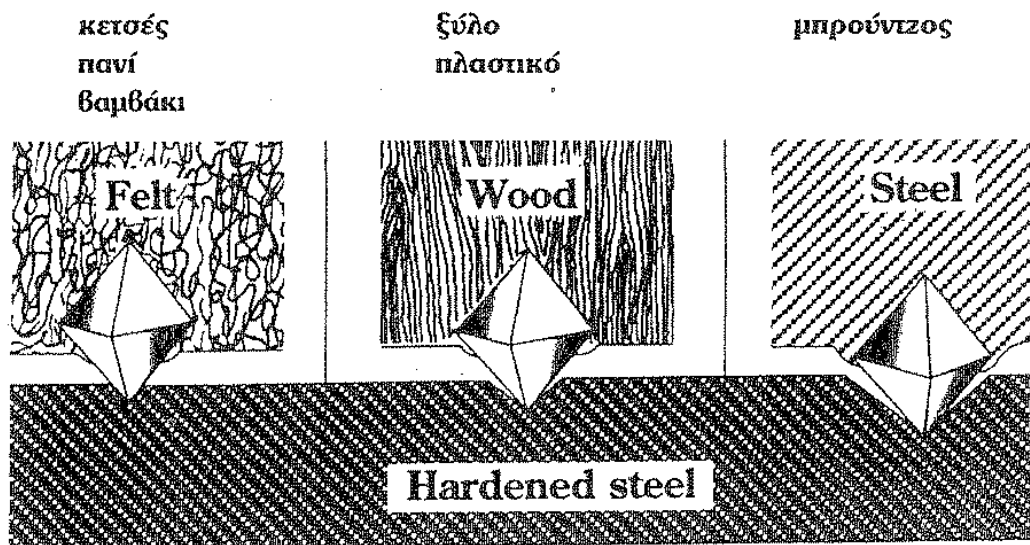
1. *Στίλβωση εξώλκευσης*: Το επίπεδο στίλβωσης δεν είναι ιδιαίτερα υψηλό (300-37 μm), καθότι οι επιφάνειες του καλουπιού απαιτείται να λειανθούν ελάχιστα ώστε να βοηθήσουν στην εξώλκευση του προϊόντος.
2. *Στίλβωση παρουσίασης αντικειμένου*: Το επίπεδο στίλβωσης ποικίλει, ωστόσο είναι σε κάθε περίπτωση καλύτερο συγκριτικά με τη στίλβωση εξώλκευσης (32-7 μm).
3. *Στίλβωση ακριβείας*: Το επίπεδο στίλβωσης είναι ιδιαίτερα υψηλό (7-0,04 μm), διότι πέραν του ότι είναι αναγκαίο το αντικείμενο να παρουσιάζει επιφάνεια «καθρέφτη», απαιτείται επίσης η μικρομετρική ακρίβεια της επιφάνειας. Χαρακτηριστικά παραδείγματα στίλβωσης ακριβείας αποτελούν οι φακοί των γυαλιών οράσεως και η ζελατίνα κράνους μοτοσυκλετών, όπου απαιτείται απόλυτη διαφάνεια, αλλά και μικρομετρική τελειότητα των επιφανειών, προς αποφυγήν αλλοίωσης των οπτικών τους χαρακτηριστικών, που θα οδηγούσε σε οπτικές παραμορφώσεις.

2.2 Αντιστοίχιση σταδίων στίλβωσης στα κατάλληλα εργαλεία

Η αρχική τραχύτητα του μετάλλου σε συνδυασμό με τον τύπο του μετάλλου και την κατάστασή του (βαμμένο ή άβαφο) είναι οι βασικοί παράγοντες που θα καθορίσουν την διαδικασία επιλογής κάθε βήματος στίλβωσης. Συγκεκριμένα, η διαδικασία της τελικής στίλβωσης υποδιαιρείται περαιτέρω στις κατωτέρω φάσεις:

1. Στίλβωση με μπρούντζο (Lapping),
2. Στίλβωση με πλαστικό ή ξύλο (Fine-Lapping),
3. Στίλβωση με κετσέ, πανί ή βαμβάκι (Polishing).

Οι κατεργασίες που μόλις αναφέρθηκαν ξεκινούν περίπου από τα 10 μm και καταλήγουν στα 3 έως 1 μm . Η διαφορά μεταξύ των τριών ειδών στίλβωσης που προαναφέρθηκαν εντοπίζεται στο βαθμό διεύθυνσης των κόκκων της διαμανταλοιφής τόσο στο εργαλείο, όσο και στην προς στίλβωση επιφάνεια και απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 2-2. Διείσδυση διαμαντόκοκκου σε διαφορετικά είδη εργαλείου για δεδομένη κατεργαζόμενη επιφάνεια.

Ωστόσο, οι επιφάνειες που προέρχονται από κατεργασία σε τόρνο, φρέζα, CNC, ρεκτιφιέ ή ηλεκτροδιάβρωση κατά κανόνα απέχουν αρκετά από το επίπεδο των 10 μm , συνεπώς πριν από τη στίλβωση του τεμαχίου πρέπει να προηγηθεί άλλου είδους κατεργασία, ως προετοιμασία για το τελικό στάδιο προς απόκτηση της επιφάνειας-«καθρέφτη» που επιθυμούμε. Στον πίνακα 2-1 φαίνεται το επίπεδο τραχύτητας επιφανείας peak-to-valley που προκύπτει μετά από την εκάστοτε κατεργασία του τεμαχίου σε διάφορες εργαλειομηχανές.

Ο συγκεκριμένος πίνακας μας παρέχει πολύτιμες πληροφορίες, καθώς, μετά τη δημιουργία ενός καλουπιού με τρέξιμο συγκεκριμένου G-code σε κέντρο κατεργασιών CNC με κατάλληλο κονδύλι, ή με οποιαδήποτε άλλη μέθοδο, πρέπει να γνωρίζουμε προσεγγιστικά το επίπεδο τραχύτητας της επιφάνειας που δημιουργείται ώστε να προσαρμόσουμε την μεθοδολογία στίλβωσης που θα κριθεί κατάλληλη για την επίτευξη του επιθυμητού αποτελέσματος.

Χαρακτηριστικά, απαιτείται η χρήση ειδικών δίσκων (σφυριδοπάνα-γυαλόχαρτα) ή πετρών για την απομάκρυνση ανεπιθύμητων διαμορφώσεων επί της επιφάνειας που δεν είναι δυνατό να απομακρυνθούν με τη χρήση διαμανταλοιφής και ειδικού δακτυλίου στίλβωσης. Οι πέτρες είναι από τα πλέον βασικά υλικά για το καταρχήν γυάλισμα των καλουπιών και η επιλογή της σωστής πέτρας, τόσο ως προς το υλικό και τις ιδιότητες, όσο και ως προς το σχήμα, έχει μεγάλη σημασία για την επίτευξη μίας καλής επιφάνειας, πάνω στην οποία θα ξεκινήσει η διαδικασία της στίλβωσης.

Πίνακας 2-1: Επίπεδο δημιουργούμενης τραχύτητας για διάφορα είδη κατεργασιών σε εργαλειομηχανές.

Procedure	Peak-to-Valley Range in μm DIN 4766																							
	0,04	0,06	0,1	0,16	0,25	0,4	0,63	1	1,6	2,5	4	6,3	10	16	25	40	63	100	160	250	400	630	1000	
1 longitudinal machining on lathe																								
2 face machine on lathe																								
3 drilling																								
4 boring																								
5 abrasion																								
6 circumferential milling																								
7 face milling																								
8 filing																								
9 circular-long grinding																								
10 circular-level grinding																								
11 surface grinding																								
12 polish grinding																								
13 short stroke honing																								
14 circular lapping																								
15 plain lapping																								
16 fine lapping																								
17 polishing																								
18 buffing																								
19 spark erosion																								

Οι πιο συνηθισμένοι τύποι πέτρας είναι οι εξής:

1. **Πέτρα διάβρωσης:** Αυτή η πέτρα έχει μεγάλη σκληρότητα και φθείρεται πολύ δύσκολα για να αντέξει στους πολύ σκληρούς κόκκους που έχουν δημιουργηθεί από τον σπινθήρα της ηλεκτροδιάβρωσης. Ας σημειωθεί ότι μόλις απομακρυνθεί το κατάλοιπο της ηλεκτροδιάβρωσης πρέπει να σταματήσει το τρίψιμο της επιφάνειας με αυτό το είδος πέτρας προτού δημιουργηθεί γρέζι και αποτρέψει την επιφάνεια από το να βελτιωθεί ως προς την ποιότητά της.
2. **Πέτρα μαλακή:** Αυτή η πέτρα έχει μικρή σκληρότητα και είναι ευάλωτη στη φθορά. Για αυτόν ακριβώς το λόγο δεν θα δημιουργήσει ποτέ γρέζι στην κατεργαζόμενη επιφάνεια και γενικά αφήνει πολύ καλή επιφάνεια, ωστόσο έχει υψηλό κόστος διότι φθείρεται πιο γρήγορα.
3. **Πέτρα ημίσκληρη:** Αυτή η πέτρα χρησιμοποιείται κυρίως σε βαμμένα καλούπια, δεν αφήνει γρέζι και δημιουργεί επιφάνεια καλής ποιότητας.

Μετά την προετοιμασία της επιφάνειας για τη στίλβωση με την κατάλληλη πέτρα, ακολουθεί στίλβωση με τη χρήση διαμανταλοιφών. Οι διαμανταλοιφές διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες, ανάλογα με το είδος του διαμαντιού από το οποίο αποτελούνται οι κόκκοι που βρίσκονται στην αλοιφή. Οι κατηγορίες αυτές είναι οι εξής:

1. Κόκκος από φυσικό διαμάντι,
2. Κόκκος από μονοκρυσταλλικό τεχνητό διαμάντι,
3. Κόκκος από πολυκρυσταλλικό τεχνητό διαμάντι.

Όσον αφορά στην επιλογή διαμανταλοιφής, η στίλβωση με κόκκους μεγέθους από 10 μm και άνω είναι προτιμότερο να γίνεται με πολυκρυσταλλική διαμανταλοιφή, διότι λόγω των πολλών γωνιών των κόκκων έχει καλύτερο ξυστικό αποτέλεσμα. Ωστόσο, η στίλβωση για στάδια από 7 μm έως 1 μm είναι καλύτερο να γίνεται με μονοκρυσταλλική διαμανταλοιφή, λόγω των καλύτερων λειαντικών ιδιοτήτων της συγκεκριμένης κατηγορίας.

Τόσο για τις πέτρες, όσο και για τις διαμανταλοιφές έχουν υιοθετηθεί διεθνώς αποδεκτά πρότυπα μέτρησης του μεγέθους των κόκκων, τα οποία και φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 2-2: Διεθνή συστήματα μέτρησης μεγέθους κόκκων (grain size ή grit size).

Διαφορετικά συστήματα μέτρησης κόκκων

FERA 30GB Κόκκος Σμυρδόπανο	FERA 31GB Κόκκος Ντουκόχαρτο	EUROPE Κόκκος Πέτρας	USA Κόκκος Πέτρας	Κόκκος σε Μικρά μm
		46	60	425-355
50		60	80	300-250
80		90	100	180-150
100		100	120	150-125
120		120	150	125-105
180		180	180	90-75
220	P 240	220	240	63-53
	P 320			48-44
	P 400	400	320	37-33
	P 500	600		32-28
	P 600			27-24
	P 800		400	23-20
	P 1000			19-17
	P 1200	800		16-14
		1000		10
			600	8
			800	7
			900	6

Για την πραγματοποίηση της στίλβωσης με την επιλεχθείσα διαμανταλοιφή, απαιτείται η χρήση ενός διαλύματος (50% v/v νερό, 25% v/v γλυκερίνη, 25% v/v καθαρό οινόπνευμα), που χρησιμεύει στο να επιτευχθεί η ιδανική κατανομή κόκκων πάνω στην επιφάνεια του κατεργαζόμενου χάλυβα. Αυτό γίνεται με ένα λεπτό ομοιόμορφο στρώμα που καταλήγει να έχει ρευστότητα αντίστοιχη με ενός παχύρρευστου λαδιού. Για να δημιουργηθεί αυτή η υφή ακολουθείται η εξής διαδικασία.

Τοποθετούνται με τη δοσομετρική σύριγγα, η οποία βρίσκεται με το άνοιγμα προς τα κάτω, μικρές δόσεις διαμανταλοιφής ανά περίπου 15-20 mm και τοποθετούνται επίσης 2-3 σταγόνες διαλύματος ανά 30-40 cm επί της επιφάνειας του τεμαχίου. Καθώς το εργαλείο (στιλβωτικός δακτύλιος προσαρμοσμένος στην άκρη του grinder) ξεκινά να καλύπτει την κατεργαζόμενη επιφάνεια, το μίγμα αποκτά την κατάλληλη ρευστότητα. Ας σημειωθεί ότι χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή στην ποσότητα του διαλύματος που θα τοποθετηθεί, καθώς υπερβολική ποσότητα έχει την τάση να συσσωρεύεται μαζί με τη διαμανταλοιφή στην άκρη του εργαλείου χωρίς αποτέλεσμα. Αντίθετα, λιγότερη της ενδεδειγμένης ποσότητα μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία πολύ στεγνού στρώματος υγρού. Αυτό είναι πιθανό να έχει ως αποτέλεσμα την εισχώρηση πολλών μονών κόκκων στην μαλακή επιφάνεια του εργαλείου και την παραμονή τους εκεί, με συνέπεια το μέταλλο που αφαιρείται από την επιφάνεια του τεμαχίου κατά τη στίλβωση να παγιδεύεται ανάμεσα στους κόκκους διαμαντιού και να δημιουργεί αφενός ανεπιθύμητες χαραγές στην κατεργαζόμενη επιφάνεια, και αφετέρου μεγάλη φθορά στα εργαλεία στίλβωσης. Αυτό το πρόβλημα είναι ιδιαίτερα συχνό κατά τη διάρκεια του γυαλίσματος με μπρούντζο (brass-lapping) και με πλαστικό (plastic-finelapping) σε πολύ μαλακούς χάλυβες, χάλυβες με μεγάλη περιεκτικότητα σε χρώμιο, καθώς και σε όλους σχεδόν τους μη βαμμένους χάλυβες. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, για να επιτευχθεί καλή ποιότητα στίλβωσης είναι απαραίτητο ο χάλυβας να έχει υποστεί βαφή.

Μετά από κάθε στάδιο της στίλβωσης, ακολουθεί σχολαστικός καθαρισμός των εργαλείων, της κατεργαζόμενης επιφάνειας και των χεριών του εργάτη, καθώς η παραμονή ενός και μόνο μεγαλύτερης διαμέτρου κόκκου στην επιφάνεια κατά τη διάρκεια της στίλβωσης με φιλότερο κόκκο διαμαντιού μπορεί να δημιουργήσει αμυχές και να καταστρέψει την ποιότητα της επιφάνειας.

Τα μεταλλικά εργαλεία έχουν μικρή ελαστικότητα, δεν υποχωρούν και αυτό έχει σαν συνέπεια να μεταφέρουν τον κάθε διαμαντόκοκκο σε μία συγκεκριμένη απόσταση επί της επιφάνειας του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Λειτουργούν, δηλαδή, ως διαμαντόλιμες συγκεκριμένου μεγέθους κόκκου. Όταν για στίλβωση χρησιμοποιούνται μεταλλικά, συνηθέστερα μπρούντζινα, εργαλεία, η κατεργασία ονομάζεται lapping. Ας σημειωθεί ότι το γυάλισμα με μπρούντζινα εργαλεία γίνεται με διαμανταλοιφές από 40 μm έως 3 μm.

Μικρότερης σκληρότητας και μεγαλύτερης υποχωρητικότητας εργαλεία, κατασκευασμένα από πλαστικό ή ξύλο χρησιμοποιούνται όταν απαιτείται πολύ μεγάλη ακρίβεια, η κατεργασία με αυτά ονομάζεται fine-lapping και το εύρος των διαμανταλοιφών οι οποίες δουλεύονται με τα συγκεκριμένα εργαλεία κυμαίνεται από 15 μm έως 3 μm.

Τέλος, το λουστράρισμα (high-polish ή mirror-finish) επιτυγχάνεται με εξαιρετικά μαλακά εργαλεία, όπως το ύφασμα, ο κετσές ή το βαμβάκι και γίνεται με διαμανταλοιφές μεταξύ 7 μm και 1 μm. Ωστόσο, πρέπει να γίνεται με ιδιαίτερη προσοχή, καθώς το υπερβολικό γυάλισμα με μαλακά υλικά είναι δυνατό να χαλάσει την επιφάνεια του κατεργαζόμενου τεμαχίου.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται η προσέγγιση που πρέπει να ακολουθηθεί με βάση την αρχική τραχύτητα της προς στίλβωση επιφάνειας και το είδος της (σφαιρική, επίπεδη κλπ).

Πίνακας 2-3: Επίπεδα τραχύτητας δυνατό να αποκτηθούν μέσω του συστήματος στίλβωσης της εταιρείας NOVAPAX.

		Diagram of the peak-to-valley heights ranges obtainable with the NOVAPAX system.																									
Handle	Finishing method	Range of peak-to-valley heights in μm (Rt)																tool									
		1000	630	400	250	160	100	63	40	25	16	10	6.3	4	2.5	1.6	1		0.63	0.4	0.25	0.16	0.1	0.06	0.04		
	Grinding																										Diamond ring
ring-finish (rotating)	Lapping																										Metal ring
	Fine lapping																										Plastic ring
	Polishing																										Cloth discs
flex-poli (short-stroke)	Filing																										Diamond files
	Stoning																										Abrasive stones
	Lapping																										Lapping rings Lapping elements
	Fine lapping																										Fine lapping rings Fine lapping elements
poli-rotor (rotating)	Grinding																										Mounted point
	Fine lapping																										Radius bonnets
	Polishing																										Felt

Ως επεξήγηση στον πίνακα 2-3, ας σημειωθεί ότι η μέθοδος flex-poli χρησιμοποιεί ειδική παλινδρομική κεφαλή (κεφαλή flex-poli) και χρησιμοποιείται για στίλβωση υψηλής ακρίβειας σε περιοχές κοιλοτήτων, ενώ η μέθοδος poli-rotor χρησιμοποιεί ειδική περιστροφική κεφαλή (κεφαλή poli-rotor) και χρησιμοποιείται για την περιστροφή διαφόρων εργαλείων όπως βίντια, τροχάκια, πλαστικά ραδίων, κετσέδες, λαστιχόπετρες και άλλα.

Στην συγκεκριμένη εργασία θα επιχειρηθεί μία βελτιστοποίηση της μεθόδου ring-polishing. Ας σημειωθεί ότι το διαμαντένιο δαχτυλίδι που αναφέρεται στον πίνακα 2-3 χρησιμοποιείται για εκχόνδριση πριν το στάδιο της στίλβωσης και του φινιρίσματος. Ωστόσο, μπορεί να αντικατασταθεί με τη χρήση στιλβωτικών δίσκων ή πετρών με σχετικά μεγάλο μέγεθος κόκκου. Μία πρακτική μέθοδος για να αξιοποιηθεί μία πέτρα

αποκτώντας τα γεωμετρικά πλεονεκτήματα ενός στιλβωτικού δακτυλίου είναι η ακόλουθη. Χρησιμοποιείται μπρούντζινος δακτύλιος και μορφοποιείται μία πέτρα σε σχήμα κυλινδρικό. Στη συνέχεια, με χρήση κατάλληλης κόλλας (κατά προτίμηση βενζινόκολλας) κολλάμε την κυλινδρική πέτρα επί του μπρούντζινου δακτυλίου. Το στρώμα κόλλας πρέπει να επαλειφθεί επί του δακτυλίου και όχι επί της πέτρας, για να αποφευχθεί απορρόφηση της κόλλας από το πορώδες υλικό της πέτρας, γεγονός που αφενός θα μείωνε την ποιότητα της συγκόλλησης και αφετέρου θα οδηγούσε σε μείωση της αποτελεσματικότητας της πέτρας κατά τη στίλβωση (λόγω αλληλεπίδρασης με την σκληρυμένη κόλλα). Είναι κομβικής σημασίας να χρησιμοποιηθεί ένα κονδύλι σφαιρικής γεωμετρίας για να δημιουργήσει μία πομπέ επιφάνεια επί της πέτρας στην περιοχή που θα εφάπτεται στην προς στίλβωση επιφάνεια, ώστε να υπάρχει clearing space για τα απόβλητα της στίλβωσης, και να αποφευχθούν χαραγές λόγω «συρσίματος» μικρογρεζιών επί της επιφάνειας. Επίσης, οι πέτρες πρέπει να δουλεύονται με κατάλληλο ψυκτικό-λιπαντικό υγρό (πετρέλαιο ή ειδικό υγρό) για διατήρηση της θερμοκρασίας σε επιθυμητά επίπεδα ώστε να μην εισχωρήσουμε σε περιοχές μόνιμης θερμικής παραμόρφωσης.

2.3 Βασικά στοιχεία επιφανειών

Η στίλβωση μίας επιφάνειας ενός καλουπιού είναι μία πολύπλοκη διαδικασία και η πλήρης κατανόηση της γεωμετρίας της είναι απαραίτητη για την απόκτηση του βέλτιστου δυνατού αποτελέσματος. Γενικά, κάθε επιφάνεια στο χώρο δεν διέπεται από ομοιομορφία σε κάθε γειτονιά σημείων της. Υπάρχουν κοίλες και κυρτές περιοχές, περιοχές που μπορούν να προσεγγισθούν ικανοποιητικά από ένα επίπεδο καθώς και σημεία απότομης αλλαγής από κοίλο σε κυρτό (σημεία καμπής).

Μία επιφάνεια μπορεί να εκφραστεί με αρκετούς διαφορετικούς τρόπους. Ανάλογα με το ποιος από αυτούς χρησιμοποιείται ανά περίπτωση, η προσέγγιση που πρέπει να ακολουθηθεί διαφέρει.

2.3.1 Προσδιορισμός επιφάνειας στον χώρο

Ένας πρώτος τρόπος προσδιορισμού μίας επιφάνειας στον χώρο είναι μέσω της χρήσης εξισώσεων. Η βασική εξίσωση μίας επιφάνειας στις 3 διαστάσεις είναι μία σχέση της μορφής

$$z = f(x, y) \quad (2-2)$$

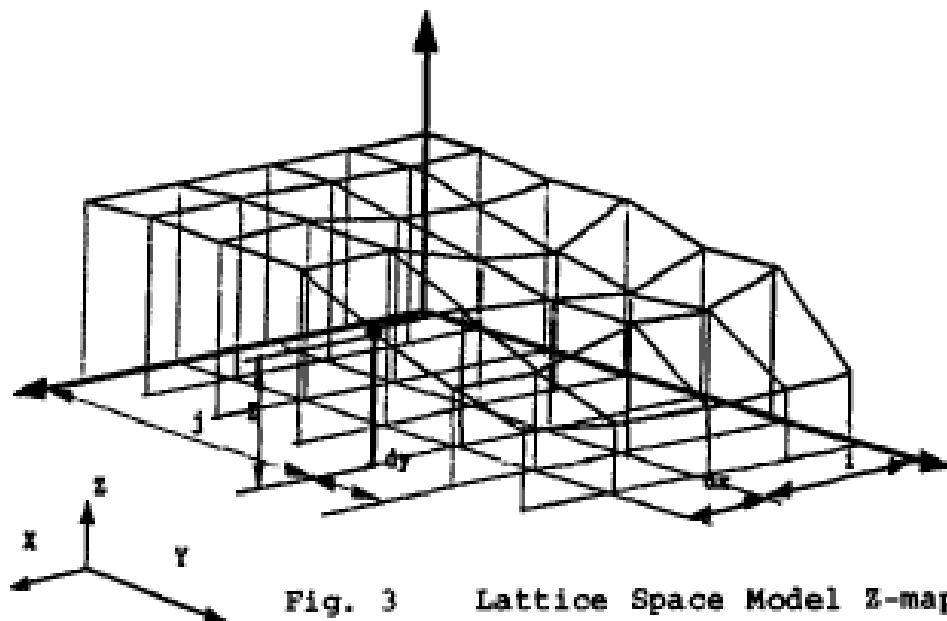
Όπου $f(x, y)$ μία οποιαδήποτε συνάρτηση των μεταβλητών x και y . Είναι προφανές ότι η σχέση (2-2) απεικονίζει μία επιφάνεια, καθώς σε κάθε σημείο (x_o, y_o) του επιπέδου Oxy αντιστοιχίζει μία τιμή $z_o = f(x_o, y_o)$.

Ωστόσο, ορισμένες φορές μία επιφάνεια μπορεί να χαρακτηρίζεται από μία εξίσωση των τριών μεταβλητών x , y και z σε πεπλεγμένη μορφή, δηλαδή με μία εξίσωση της μορφής:

$$F(x, y, z) = 0 \quad (2-3)$$

Αν η αναλυτική επίλυση της σχέσης (2-3) κατά τρόπο τέτοιο ώστε να δώσει σχέση της μορφής της (2-2), ως προς οποιαδήποτε από τις μεταβλητές x , y και z είναι αδύνατη, τότε λέμε ότι η επιφάνεια είναι ορισμένη με εξίσωση πεπλεγμένης μορφής. Ας σημειωθεί ότι, ενώ δεν είναι πάντα εφικτό να προκύψει σχέση της μορφής (2-2) από την (2-3), το αντίθετο είναι εφικτό σε κάθε περίπτωση με μία απλή αλλαγή μέλους.

Ένας τελευταίος τρόπος έκφρασης μίας τρισδιάστατης επιφάνειας, είναι σε κάθε ζεύγος συντεταγμένων του επιπέδου Oxy να αντιστοιχιστεί και ένα ύψος z , δηλαδή να προκύψουν πολλές «στήλες» με συγκεκριμένο ύψος η καθεμία για πολλά σημεία του επιπέδου Oxy . Η μέθοδος αυτή καλείται Lattice Space Z-map Model. Ας σημειωθεί ότι, για να είναι ικανοποιητική η απεικόνιση της επιφάνειας με αυτή τη μέθοδο, πρέπει τόσο το x όσο και το y να αυξάνονται με πολύ μικρό βήμα ώστε να ληφθεί ικανοποιητικός αριθμός τιμών και να μην χαθεί η ακρίβεια στον εντοπισμό σημαντικών λεπτομερειών της επιφάνειας, όπως ακρότατα και σαγματικά σημεία.



Σχήμα 2-3. Αναπαράσταση επιφάνειας στο χώρο μέσω Lattice Space Z-map Model.

2.3.2 Στοιχεία της θεωρίας επιφανειών

Έχοντας ως δεδομένο ότι μελετάμε μία επιφάνεια της μορφής της σχέσης (2-3), καθώς ακόμη και η μορφή (2-2) μπορεί να αναχθεί πολύ εύκολα στην (2-3), μπορούμε να ορίσουμε κάποια βασικά στοιχεία της συγκεκριμένης τρισδιάστατης επιφάνειας. Αρχικά, με χρήση των μερικών παραγώγων της συνάρτησης $F(x, y, z)$ είναι δυνατό να προσδιοριστεί το κάθετο στην επιφάνεια διάνυσμα σε κάθε σημείο αυτής, ως εξής:

Αν $A(x_0, y_0, z_0)$ είναι ένα σημείο που ανήκει στην επιφάνεια, δηλαδή επαληθεύει την εξίσωση (2-3), τότε το διάνυσμα

$$\text{grad}F|_A = (F_x, F_y, F_z)|_A = \left(\frac{\partial F}{\partial x}, \frac{\partial F}{\partial y}, \frac{\partial F}{\partial z} \right)|_A \quad (2-4)$$

είναι κάθετο στο εφαπτόμενο επίπεδο της επιφάνειας στο σημείο A . Με βάση αυτό, είναι δυνατό να προσδιοριστεί το εφαπτόμενο επίπεδο της επιφάνειας στο A , και η κάθετη στην επιφάνεια ευθεία στο σημείο A .

Το εφαπτόμενο επίπεδο, έχει εξίσωση

$$ax + by + cz + d = 0 \quad (2-5)$$

με τα a , b και c να είναι οι 3 συνιστώσες του κάθετου στο σημείο A διανύσματος της επιφάνειας, από τη σχέση (2-4). Το d προκύπτει εύκολα, καθώς το σημείο A επαληθεύει την εξίσωση (2-5).

Η κάθετη στην επιφάνεια ευθεία στο σημείο A έχει εξίσωση

$$\frac{x-x_0}{F_x|_A} = \frac{y-y_0}{F_y|_A} = \frac{z-z_0}{F_z|_A} = \lambda \quad (2-6)$$

Η σχέση (2-6) εξάγεται εύκολα μέσω διανυσματικής ανάλυσης με δεδομένο ότι η συγκεκριμένη ευθεία είναι παράλληλη στο κάθετο στην επιφάνεια διάνυσμα στο σημείο A , ενώ ταυτόχρονα το σημείο A πρέπει να επαληθεύει την εξίσωσή της.

3 Βελτιστοποίηση του tool-path και γεωμετρικά στοιχεία

3.1 Μοντελοποίηση μεθόδων χειροκίνητης στίλβωσης

Η στίλβωση είναι μία διαδικασία που μέχρι πριν από λίγα χρόνια γινόταν κατ'εξοχήν χειροκίνητα από εξειδικευμένους τεχνίτες με χιλιάδες ώρες εμπειρίας. Ο εκάστοτε τεχνίτης γυάλιζε την προς στίλβωση επιφάνεια κινώντας το εργαλείο με τα χέρια του με ταχύτητα και πίεση που όριζε η εμπειρία του, και επιλέγωντας την διαδρομή που έκρινε εκείνος ως βέλτιστη για την επίτευξη του επιθυμητού αποτελέσματος. Τα κριτήρια επιλογής της διαδρομής αυτής ήταν αφενός η επίτευξη πλήρους κάλυψης της προς στίλβωση επιφάνειας, αφετέρου η ομοιομορφία κάλυψης της επιφάνειας, δηλαδή η αποφυγή υπερβολικού αριθμού περασμάτων από ένα σημείο της σε σύγκριση με κάποιο άλλο. Αυτό θα οδηγούσε σε ανομοιομορφία του αποτελέσματος, πιθανή καταστροφή των αποτελεσμάτων ενός προηγούμενου, πιθανότατα χρονοβόρου, σταδίου στίλβωσης ή, στην χειρότερη των περιπτώσεων, αλλαγή της ονομαστικής διάστασης του τεμαχίου στο υπερστιλβωμένο σημείο, με συνέπεια την αχρήστευσή του. Για να αποφύγουμε τέτοια ανεπιθύμητα αποτελέσματα, έγινε προσπάθεια μοντελοποίησης της κίνησης που ακολουθούσε ο κάθε τεχνίτης με το χέρι του, ώστε να μπορεί άνετα να ακολουθηθεί από ένα CNC κέντρο κατεργασιών. Αυτό έγινε με σκοπό να προσδοθεί η απαιτούμενη σταθερότητα ως προς την ταχύτητα και την ασκούμενη δύναμη καθ' όλη τη διάρκεια της κατεργασίας, για την βελτιστοποίηση των αποτελεσμάτων.

Παρατηρώντας τεχνίτες να εργάζονται σε καλούπια, χρησιμοποιώντας στιλβωτικούς δακτυλίους (polishing rings) προσαρμοσμένους σε electric powered ή air grinders διαπιστώθηκε ότι η βασική κίνηση είναι μία κυκλική κίνηση του δακτυλίου σε επαλληλία με μία πρόωση. Αυτές οι δύο κινήσεις σε συνδυασμό με την περιστροφική κίνηση που προσδίδει το grinder στον δακτύλιο οδηγούν στην πλήρη κάλυψη και το γυάλισμα της επιφάνειας. Συνεπώς, έπρεπε να βρεθεί μία αξιόπιστη μαθηματική προσέγγιση που να ικανοποιεί την εμπειρική αυτή κίνηση που πραγματοποιεί ο τεχνίτης με έναν συνεπή τρόπο, ο οποίος θα είναι δυνατό να μεταφραστεί σε κώδικα και να διαβαστεί από το CNC κέντρο κατεργασιών.

3.2 Ορισμός τροχοειδούς καμπύλης

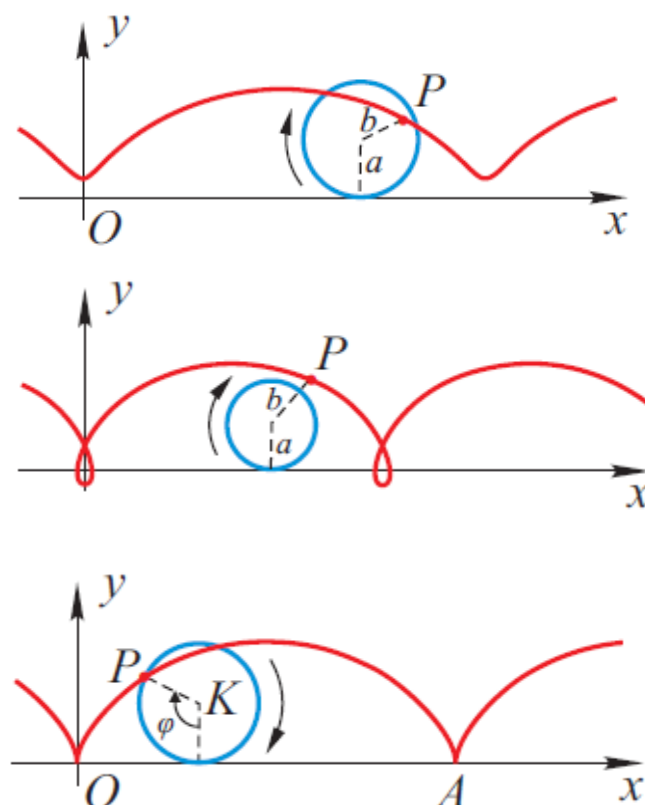
Από μαθηματικής απόψεως, μία πολύ ικανοποιητική μοντελοποίηση της επαλληλίας κυκλικής κίνησης και πρόωσης που πραγματοποιεί το χέρι του τεχνίτη, είναι η τροχοειδής καμπύλη. Ο ορισμός της γίνεται με τον ακόλουθο τρόπο.

Έστω κύκλος ακτίνας a που κυλιέται χωρίς να ολισθαίνει επί του οριζόντιου άξονα Ox . Το σημείο P είναι σταθερό ως προς τον κύκλο, απέχει απόσταση b από το κέντρο του κύκλου και διαγράφει την τροχοειδή καμπύλη καθώς ο κύκλος πραγματοποιεί την κύλιση. Με βάση τον ορισμό της τροχοειδούς, οι σχέσεις που δίνουν τα x και y είναι οι εξής:

$$x_{tr} = a\varphi - b\sin\varphi \quad (3-1)$$

$$y_{tr} = a - b\cos\varphi \quad (3-2)$$

όπου φ είναι η γωνία στροφής του κύκλου ακτίνας a κατά την κύλιση του επί του άξονα Ox . Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται ο τρόπος με τον οποίο σχηματίζεται η τροχοειδής καμπύλη για διαφορετικό συσχετισμό a και b .



Σχήμα 3-1 (Άνω). Τροχοειδής με οδηγό τον άξονα Ox και $a > b$.

(Μέση). Τροχοειδής με οδηγό τον άξονα Ox και $a = b$.

(Κάτω). Τροχοειδής με οδηγό τον άξονα Ox και $a = b$ (Κυκλοειδής).

Για να αποκτήσουμε εποπτεία της καμπύλης που θα χρησιμοποιήσουμε για το κάθε πείραμα, χρησιμοποιήθηκε το Excel, και γράφτηκε πρόγραμμα που υπολογίζει το x και το y της τροχοειδούς καμπύλης για κάθε τιμή δοθείσας γωνίας περιστροφής φ (βήμα που ορίζουμε εμείς) και για δεδομένες τιμές παραμέτρων τροχοειδούς a και b , και εν συνεχεία την πλοτάρει. Το αρχείο έχει όνομα «Trochoid curve» και περιλαμβάνεται στο CD-ROM της εργασίας.

Ας σημειωθεί ότι στην παρούσα μελέτη θα χρησιμοποιηθούν αποκλειστικά τροχοειδείς καμπύλες με $a < b$ (Σχήμα 3-1, Μέση).

3.3 Χάραξη τροχοειδούς με οδηγό τυχαία καμπύλη του επιπέδου

Με βάση τα όσα έχουν ήδη αναφερθεί, είναι εφικτή η χάραξη οποιασδήποτε τροχοειδούς καμπύλης στο επίπεδο, με οδηγό τον άξονα Ox και με οποιονδήποτε συνδυασμό παραμέτρων τροχοειδούς a και b . Ωστόσο, η στίλβωση δεν είναι μία διαδικασία που γίνεται σε ευθεία γραμμή, αλλά ακολουθούνται διαφορετικά μονοπάτια. Συνεπώς, έπρεπε να προσδιορίσουμε την τροχοειδή καμπύλη εφόσον ο κύκλος ακτίνας a κυλιέται πάνω σε μία τυχαία καμπύλη επί του επιπέδου Oxy .

Θεωρούμε δεδομένο ότι η καμπύλη-οδηγός είναι συνεχώς παραγωγίσιμη στο επίπεδο Oxy , δηλαδή πρακτικά ότι δεν έχει ασυνέχειες και «κορυφές», πράγμα που θα καθιστούσε αδύνατη την κύλιση του κύκλου σε όλο το μήκος της. Εξάλλου η στίλβωση προϋποθέτει συνεχή επαφή και ακολουθήση μίας ομαλής πορείας, χωρίς απότομες αλλαγές κατεύθυνσης, άρα χωρίς «κορυφές». Επίσης, πρέπει να ληφθεί υπόψη, ότι ο κύκλος ακτίνας a πρέπει να «χωράει» εντός των κοιλάδων της καμπύλης καθώς κυλιέται επί αυτής, δηλαδή, στις περιοχές όπου η καμπύλη στρέφει τα κοίλα άνω, είναι απαραίτητο η ελάχιστη ακτίνα καμπυλότητάς της να είναι μεγαλύτερη από την ακτίνα του κύκλου a .

3.3.1 Προσεγγιστικό μοντέλο (Small Inclination Model)

Για αυτόν το σκοπό, τον υπολογισμό και την απεικόνιση κάθε τέτοιας τροχοειδούς, επί οποιασδήποτε συμβατής με τους περιορισμούς καμπύλης, γράφτηκε πρόγραμμα στο Excel, που λειτουργεί ως εξής.

Διακριτοποιεί τον άξονα των x με όποιο βήμα θέλουμε και στην περιοχή που εμείς θα ορίσουμε. Για κάθε τιμή του x υπολογίζει την τιμή y της καμπύλης-οδηγού με βάση την συνάρτησή της. Εν συνεχεία υπολογίζει το μήκος της καμπύλης οδηγού από το αρχικό της σημείο μέχρι κάθε επόμενο σημείο της, χρησιμοποιώντας τη

βασική σχέση απόστασης μεταξύ δύο σημείων στο καρτεσιανό επίπεδο, σύμφωνα με την οποία η απόσταση μεταξύ ενός σημείου $A(x_A, y_A)$ και $B(x_B, y_B)$ ισούται με:

$$d = (AB) = \sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2} \quad (3-3)$$

Στη συνέχεια, με βάση την παρατήρηση ότι το μήκος της καμπύλης οδηγού σε κάποιο σημείο ισούται με την απόσταση που έχει διανύσει ο κύκλος καθώς κυλίνεται επί αυτής, παίρνουμε την σχέση

$$\theta(\text{degrees}) = \frac{180 \cdot s}{\pi \cdot a} \quad (3-4)$$

όπου με θ συμβολίζεται η γωνία κατά την οποία έχει περιστραφεί ο κύκλος μέχρι αυτό το σημείο της καμπύλης-οδηγού, με s το μήκος της καμπύλης-οδηγού μέχρι αυτό το σημείο, δηλαδή το μήκος του τόξου που έχει καλύψει μέσω της κύλισής του ο κύκλος και με a η ακτίνα του κύκλου.

Τέλος, για τον προσδιορισμό των συντεταγμένων (x_{troch}, y_{troch}) της τροχοειδούς καμπύλης που αντιστοιχούν σε κάθε σημείο (x_{guide}, y_{guide}) της οδηγού καμπύλης, χρησιμοποιούνται οι σχέσεις:

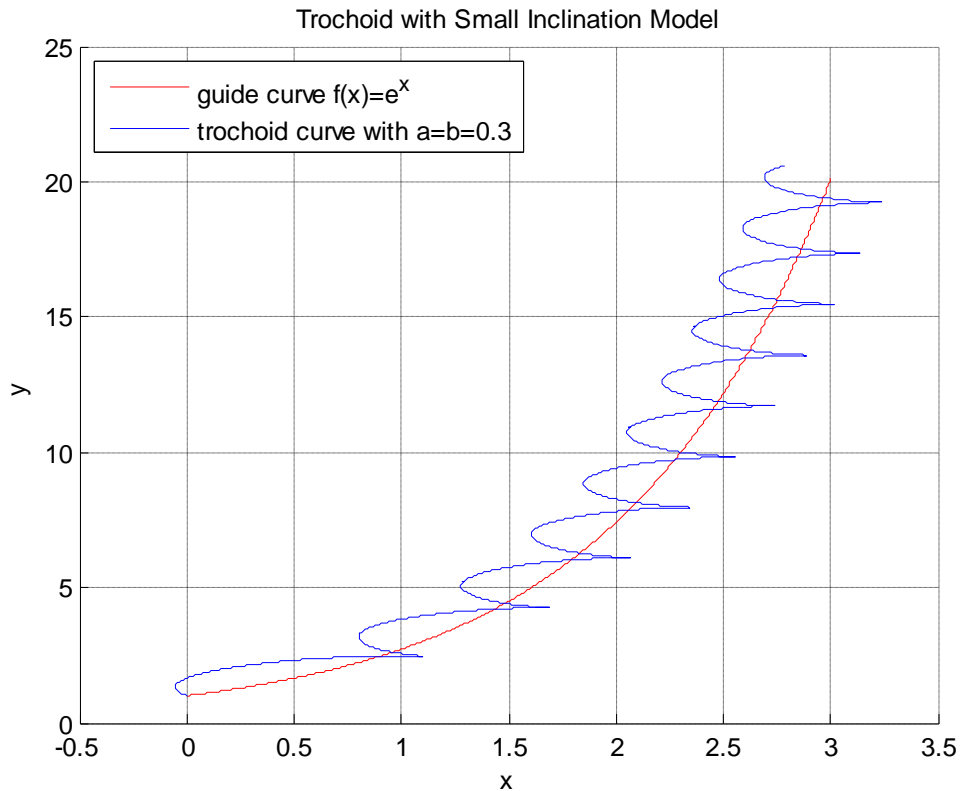
$$x_{troch} = x_{guide} - b \cdot \sin\theta \quad (3-5)$$

$$y_{troch} = y_{guide} + a - b \cdot \cos\theta \quad (3-6)$$

Ας σημειωθεί ότι έγινε παραδοχή ότι το εφαπτόμενο σημείο στην καμπύλη είναι πάντα το κάτω σημείο του κύκλου (βάση του κύκλου), συνεπώς, το μοντέλο αυτό είναι ικανοποιητική προσέγγιση, μόνο σε περίπτωση που η κλίση της καμπύλης-οδηγού είναι μικρή. Όσο πιο κατακόρυφη γίνεται, τόσο μεγαλύτερη η απόκλιση από την πραγματική τροχοειδή καμπύλη.

Τα πρόσημα μπροστά από τον όρο που περιέχει την τριγωνομετρική συνιστώσα στις σχέσεις (3-5) και (3-6) επιλέχθηκαν με τη σύμβαση στο πρώτο σημείο της καμπύλης-οδηγού, το ευθύγραμμο τμήμα μήκους b να έχει αρχή το κέντρο του κύκλου και να είναι παράλληλο προς τον άξονα των y με κατεύθυνση προς τα αρνητικά αυτού.

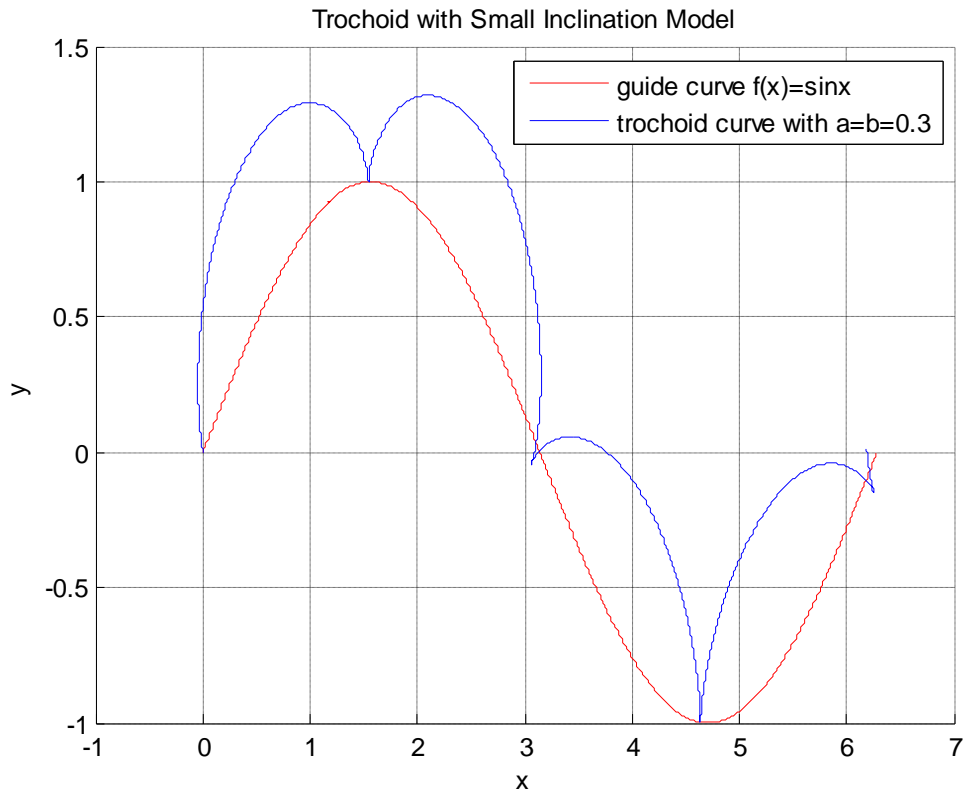
Το αρχείο Excel έχει όνομα “Trochoid with circle rolling on f(x) (small inclination model)” και, παρότι δεν είναι ακριβές, είναι μία καλή και γρήγορη προσέγγιση όταν έχουμε γνωστή καμπύλη-οδηγό με μικρές κλίσεις.



Σχήμα 3-2. Τροχοειδής καμπύλη με οδηγό-καμπύλη την $f(x) = e^x$ και παραμέτρους τροχοειδούς $a=b=0.3$ (Small Inclination Model).

Στο σχήμα 3-2 η τροχοειδής έπρεπε να έχει κυκλοειδή μορφή, δηλαδή οι κορυφές της να βρίσκονται ακριβώς πάνω στην οδηγό-καμπύλη, ωστόσο, αυτό συμβαίνει μόνο προσεγγιστικά στα κοντινά του μηδενός x , όπου η κλίση είναι μικρή, ενώ όσο η κλίση μεγαλώνει, τόσο περισσότερο αποκλίνει το μοντέλο, σε βαθμό που να θεωρείται ανεπαρκές για τη συγκεκριμένη περίπτωση.

Στο σχήμα 3-3 στην κορυφή του «όρους», αλλά και στον πυθμένα της «κοιλιάδας» της καμπύλης-οδηγού η κορυφή της τροχοειδούς βρίσκεται ακριβώς πάνω στην καμπύλη-οδηγό, γεγονός που επιβεβαιώνει την εξαιρετική προσέγγιση του μοντέλου για μικρές κλίσεις. Απόκλιση από το ιδανικό παρατηρείται στο σημείο που σημειώνεται μέγιστη αρνητική και θετική κλίση, όχι ικανή για να καταστήσει το μοντέλο ανεπαρκές για τη συγκεκριμένη περίπτωση ωστόσο.

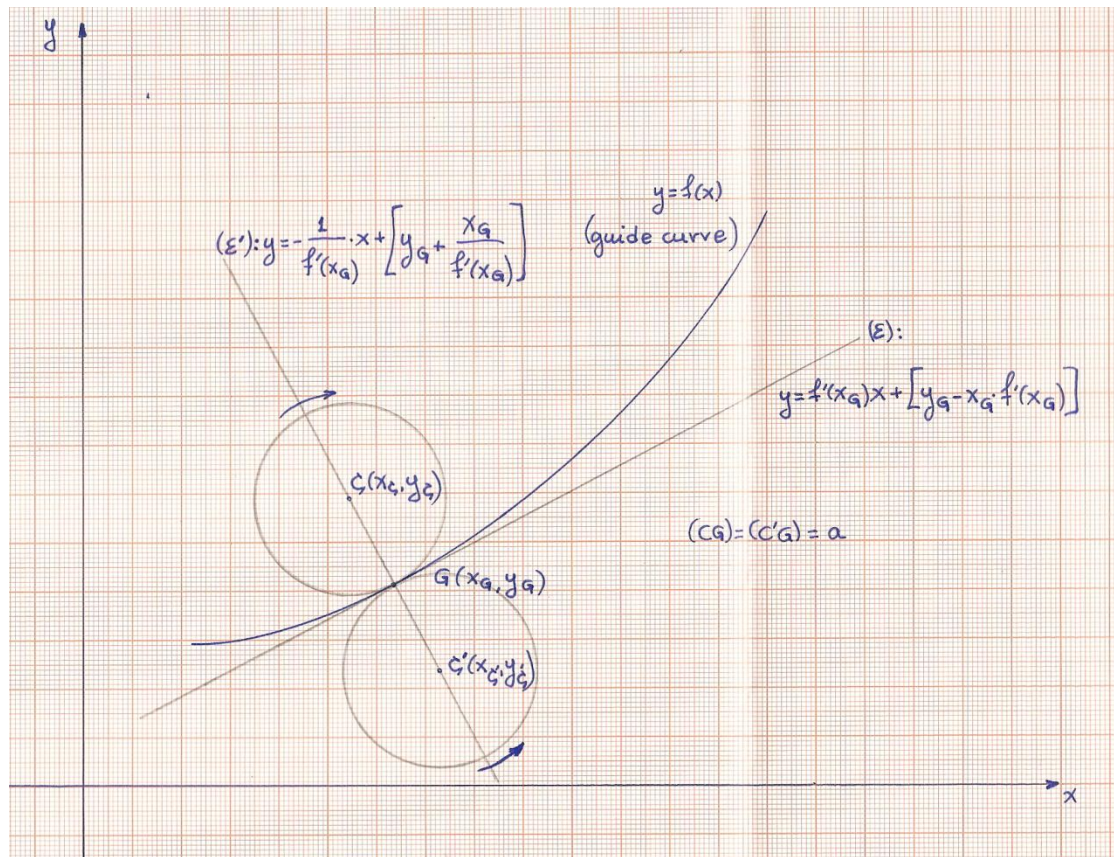


Σχήμα 3-3. Τροχοειδής καμπύλη με οδηγό-καμπύλη την $f(x) = \sin x$ και παραμέτρους τροχοειδούς $a=b=0.3$ (Small Inclination Model).

3.3.2 Ακριβές μοντέλο και γεωμετρική ανάλυση

Η απόκλιση του προηγούμενου μοντέλου εντοπίζεται, όπως αναφέρθηκε, στην παραδοχή ότι το σημείο επαφής του κύκλου είναι πάντα η βάση του. Ωστόσο, αυτό σημαίνει ότι δεν έχει ληφθεί υπόψη η κλίση της καμπύλης-οδηγού, καθώς ανάλογα με την τιμή της, είναι δυνατό το σημείο επαφής του κύκλου με την καμπύλη-οδηγό να βρίσκεται σε οποιαδήποτε θέση της περιφέρειάς του. Η ακόλουθη ανάλυση θα μας διευκολύνει να επιλύσουμε το συγκεκριμένο γεωμετρικό πρόβλημα.

Έστω ότι έχουμε ένα τμήμα της οδηγού-καμπύλης $f(x)$ στο καρτεσιανό επίπεδο, με την κλίση σε αυτό το τμήμα να είναι μη μηδενική. Ο κύκλος ακτίνας a κυλιέται επί της καμπύλης-οδηγού και σε κάποια χρονική στιγμή εφάπτεται επί αυτής στο σημείο $G(x_G, y_G)$. Έστω (ε) η εφαπτόμενη ευθεία στην $f(x)$ στο σημείο G και (ε') ευθεία κάθετη στην (ε) που διέρχεται από το σημείο G . Η ευθεία (ε') προφανώς θα διέρχεται και από το κέντρο του κύκλου, έστω σημείο $C(x_C, y_C)$.



Σχήμα 3-4. Σχηματική απεικόνιση μεγεθών Precise model.

Η εξίσωση της ευθείας (ε) προσδιορίζεται γνωρίζοντας ότι η κλίση της ισούται με $f'(x_G)$, αφού εφάπτεται στην $y = f(x)$ στο σημείο G . Το σημείο G επίσης, επαληθεύει την εξίσωση της (ε), οπότε αυτή προσδιορίζεται πλήρως. Η εξίσωσή της είναι η

$$(ε): y = f'(x_G) \cdot x + [y_G - f'(x_G) \cdot x_G] \quad (3-7)$$

Επίσης, η ευθεία (ε') είναι κάθετη στην (ε), άρα το γινόμενο των κλίσεων των 2 ευθειών ισούται με -1. Συνεπώς, η κλίση της (ε') ισούται με $-1/f'(x_G)$. Επίσης, το σημείο G επαληθεύει την εξίσωση της (ε'), οπότε αυτή προσδιορίζεται πλήρως. Η εξίσωσή της είναι η

$$(ε'): y = -\frac{1}{f'(x_G)} \cdot x + [y_G + \frac{x_G}{f'(x_G)}] \quad (3-8)$$

Όμως το κέντρο του κύκλου $C(x_C, y_C)$ επαληθεύει την εξίσωση της (ε'), συνεπώς προκύπτει η σχέση

$$y_C = -\frac{1}{f'(x_G)} \cdot x_C + [y_G + \frac{x_G}{f'(x_G)}] \quad (3-9)$$

Και επίσης, η απόσταση μεταξύ των σημείων $C(x_C, y_C)$ και $G(x_G, y_G)$ είναι ίση με την ακτίνα a του κύκλου. Χρήση της σχέσης (3-3) δίνει

$$(CG) = a \Leftrightarrow \sqrt{(x_G - x_C)^2 + (y_G - y_C)^2} = a \quad (3-10)$$

Επιλύοντας το σύστημα των σχέσεων (3-9) και (3-10) καταλήγουμε στην επίλυση μίας δευτεροβάθμιας εξίσωσης για τον προσδιορισμό του x_C , πράγμα λογικό, καθώς ο κύκλος μπορεί να κυλιέται άνωθεν ή κάτωθεν της καμπύλης-οδηγού, συνεπώς και οι δύο λύσεις είναι αποδεκτές. Η σχέση που προκύπτει είναι της μορφής

$$A \cdot x_C^2 + B \cdot x_C + \Gamma = 0 \quad (3-11)$$

Όπου:

$$A = 1 \quad (3-11\alpha)$$

$$B = -2 \cdot x_G \quad (3-11\beta)$$

$$\Gamma = x_G^2 - \frac{[a \cdot f'(x_G)]^2}{1 + [f'(x_G)]^2} \quad (3-11\gamma)$$

Η διακρίνουσα προκύπτει ίση με

$$\Delta = B^2 - 4 \cdot A \cdot \Gamma = \frac{[2af'(x_G)]^2}{1 + [f'(x_G)]^2} \geq 0 \text{ (πάντα)} \quad (3-12)$$

Και η τιμή του x_C ίση με

$$x_C = \frac{-B \pm \sqrt{\Delta}}{2 \cdot A} = x_G \pm \frac{af'(x_G)}{\sqrt{1 + [f'(x_G)]^2}} \quad (3-13)$$

Οι δύο τιμές του y_C (μία για κάθε x_C) προκύπτουν με απλή αντικατάσταση στη σχέση (3-9). Με αυτόν τον τρόπο ο κώδικας προσδιορίζει τα δύο “Circle Centres Locus”, δηλαδή τις καμπύλες επί των οποίων βρίσκεται το κέντρο του κύκλου καθώς αυτός κυλιέται άνωθεν ή κάτωθεν της καμπύλης-οδηγού. Οι καμπύλες αυτές συμβολίζονται με πράσινο χρώμα στα 2 ακόλουθα σχήματα (3-4 και 3-5).

Μέχρι στιγμής έχουμε αντιστοιχίσει δύο σημεία $C(x_C, y_C)$ σε κάθε σημείο $G(x_G, y_G)$ της καμπύλης οδηγού. Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (3-3) και (3-4) που διατυπώθηκαν προηγουμένως, μπορούμε να προσδιορίσουμε την γωνία στροφής του κύκλου μέχρις ότου καταλήξει να εφάπτεται στην καμπύλη-οδηγό στο σημείο $G(x_G, y_G)$.

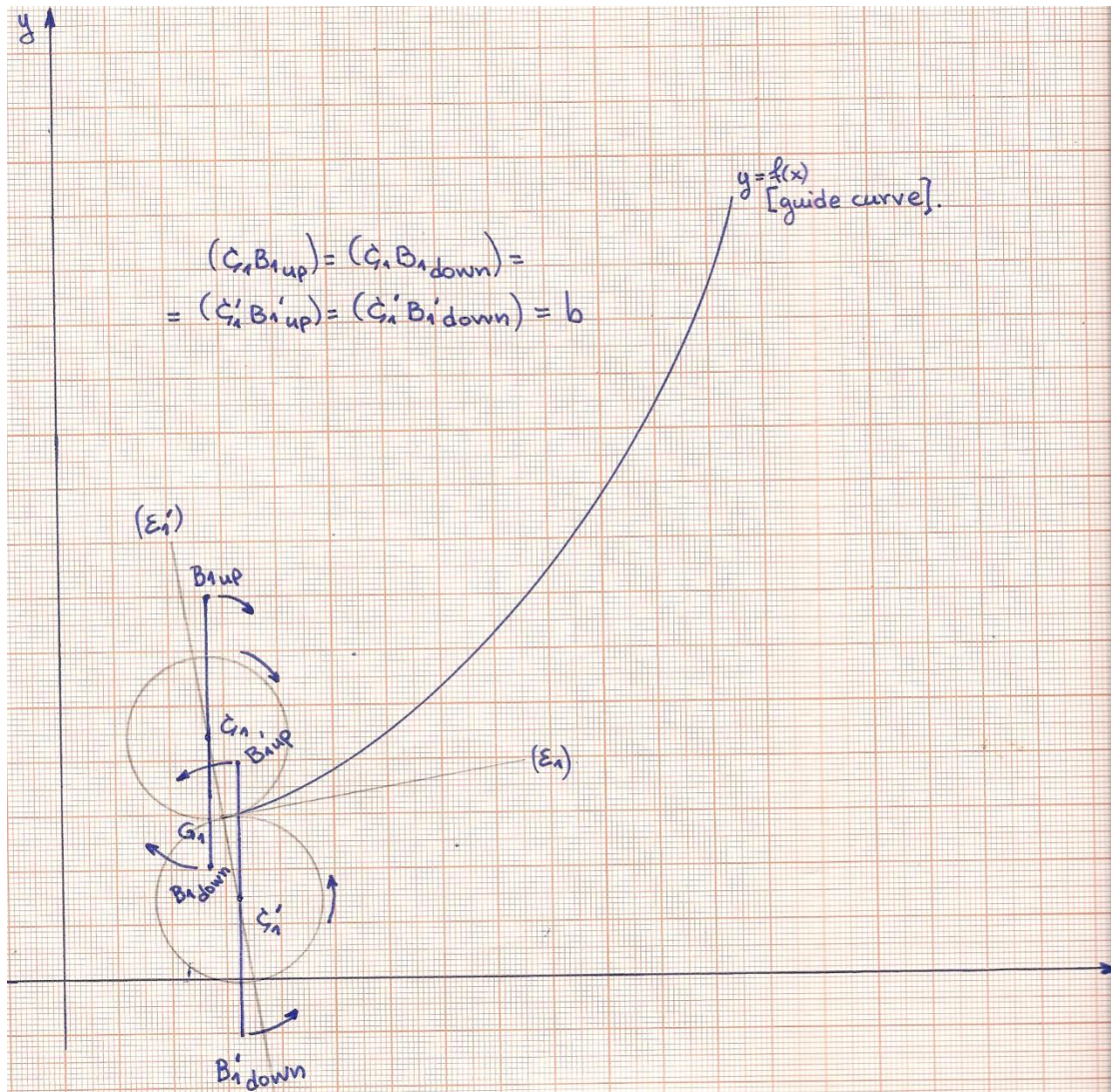
Με δεδομένο το κέντρο του κύκλου για κάθε εφαιπτόμενο σημείο G και την γωνία στροφής θ , αλλά και την παράμετρο b της τροχοειδούς, μπορούμε να υπολογίσουμε τα σημεία της τροχοειδούς καμπύλης από τις εξής σχέσεις:

$$x_{tr_1} = x_{C_1} + b \cdot \sin\theta \quad (3-14\alpha)$$

$$y_{tr_1} = y_{C_1} - b \cdot \cos\theta \quad (3-14\beta)$$

$$x_{tr_2} = x_{C_2} + b \cdot \sin\theta \quad (3-15\alpha)$$

$$y_{tr_2} = y_{C_2} + b \cdot \cos\theta \quad (3-15\beta)$$



Σχήμα 3-5. Επιλογή προσήμων σχέσεων (3-14) και (3-15).

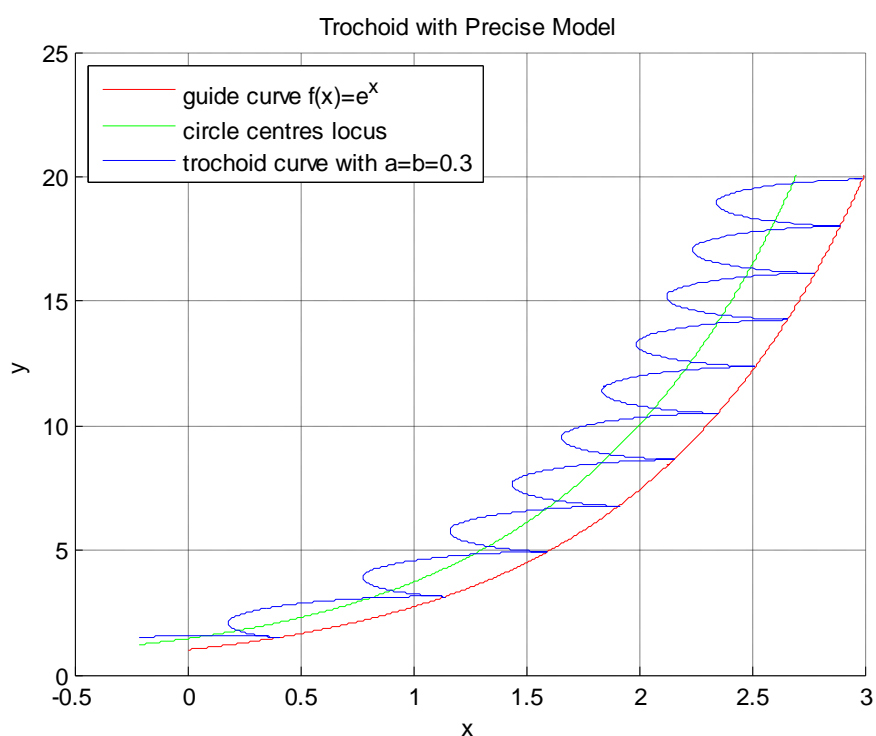
Οι σχέσεις (3-14) αναφέρονται στην τροχοειδή που βασίζεται στο “Circle Centres Locus” που βρίσκεται κάτωθεν της καμπύλης-οδηγού, ενώ οι σχέσεις (3-15) σε αυτήν που βασίζεται στο “Circle Centres Locus” που βρίσκεται άνωθεν της καμπύλης-οδηγού.

Τα πρόσημα μπροστά από τον όρο που περιέχει την τριγωνομετρική συνιστώσα στις σχέσεις (3-14) επιλέχθηκαν με τη σύμβαση στο πρώτο σημείο της καμπύλης-οδηγού, το ευθύγραμμο τμήμα μήκους b να έχει αρχή το κέντρο του

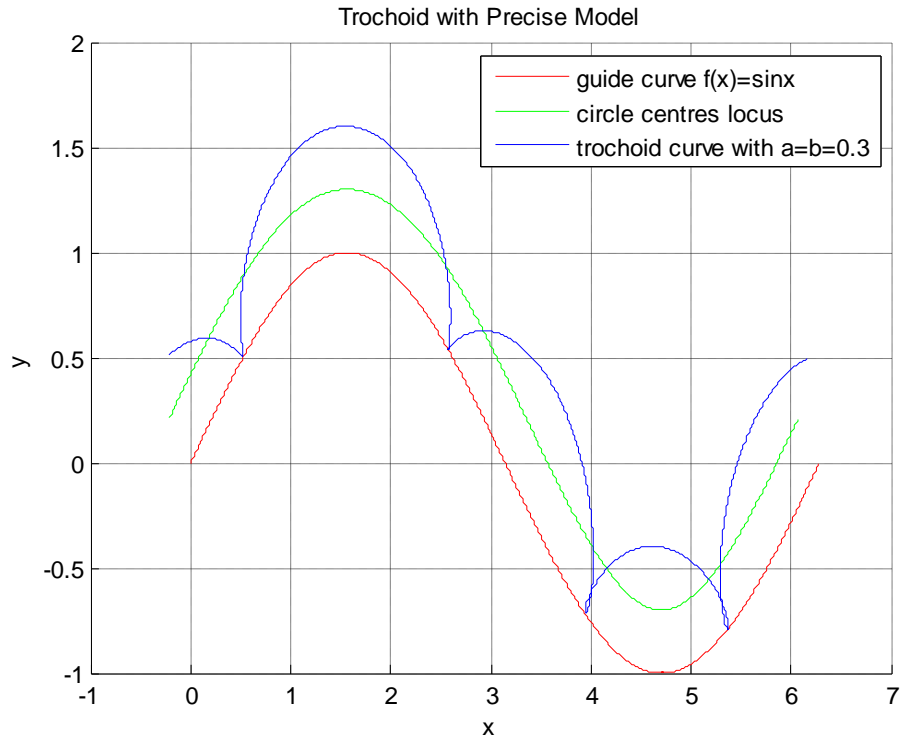
κύκλου και να είναι παράλληλο προς τον άξονα των y με κατεύθυνση προς τα αρνητικά αυτού.

Αντίστοιχα, τα πρόσημα μπροστά από τον όρο που περιέχει την τριγωνομετρική συνιστώσα στις σχέσεις (3-15) επιλέχθηκαν με τη σύμβαση στο πρώτο σημείο της καμπύλης-οδηγού, το ευθύγραμμο τμήμα μήκους b να έχει αρχή το κέντρο του κύκλου και να είναι παράλληλο προς τον άξονα των y με κατεύθυνση προς τα θετικά αυτού.

Δηλαδή, όπως φαίνεται στο σχήμα 3-5, ως initialization του αρχικού σημείου της τροχοειδούς θεωρήθηκε για την άνω καμπύλη (κύκλος κέντρου C_1) το σημείο $B_{1_{up}}$, και αντίστοιχα για την κάτω καμπύλη (κύκλος κέντρου C_1') το σημείο $B_{1_{down}}$. Για να αλλάξουμε το αρχικό σημείο της άνω και κάτω τροχοειδούς με το αντιδιαμετρικό των τρεχόντων σημείων ως προς τον αντίστοιχο κυλιόμενο κύκλο, αρκεί να αλλάξουμε τα πρόσημα που προηγούνται των τριγωνομετρικών όρων στις σχέσεις (3-14) για την κάτω και (3-15) για την άνω καμπύλη.



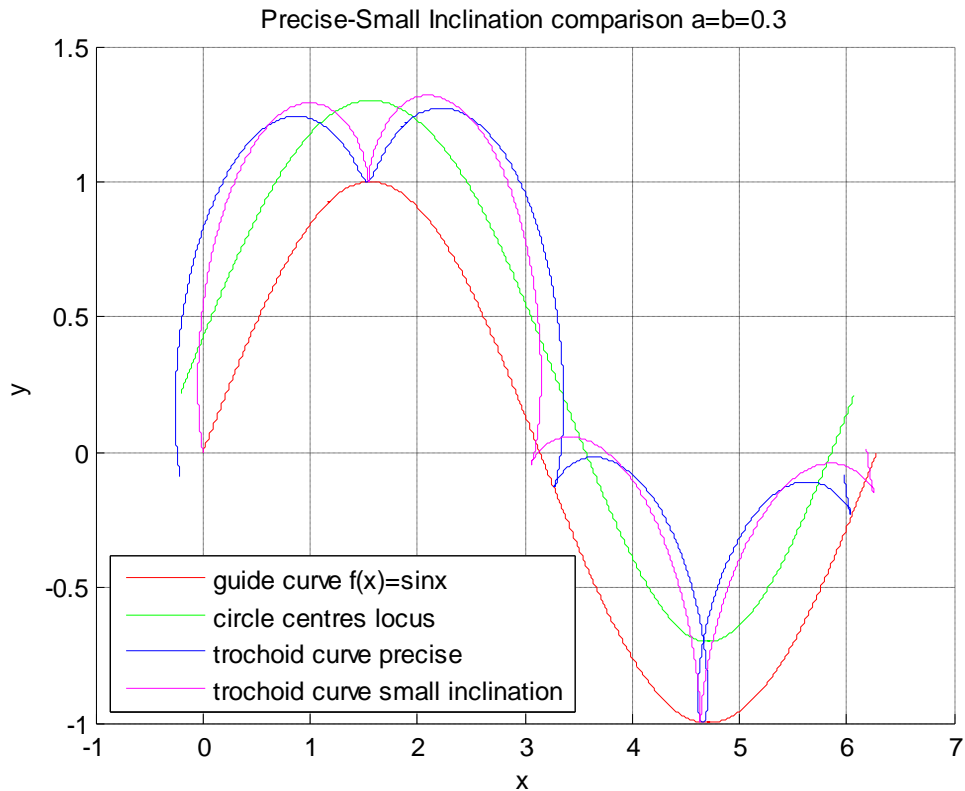
Σχήμα 3-6. Τροχοειδής καμπύλη με οδηγό-καμπύλη την $f(x) = e^x$ και παραμέτρους τροχοειδούς $a=b=0.3$ (Precise Model).



Σχήμα 3-7. Τροχοειδής καμπύλη με οδηγό-καμπύλη την $f(x) = \sin x$ και παραμέτρους τροχοειδούς $a=b=0.3$ (Precise Model).

Και στα 2 σχήματα που επιδεικνύουν τα αποτελέσματα του Precise Model (σχήμα 3-6 και σχήμα 3-7) φαίνεται καθαρά ότι έχουν διορθωθεί τα σφάλματα του Small Inclination Model στις περιοχές μεγάλης κλίσης και η τροχοειδής εφάπτεται της καμπύλης-οδηγού, πράγμα που αναμενόταν εφόσον $a=b$ (κυκλοειδής μορφή). Η σύγκριση των δύο μοντέλων φαίνεται στο σχήμα 3-8.

Επιπλέον, με την ακριβή μέθοδο παρέχεται, μέσω μικροαλλαγών στον κώδικα ή με σχεδιασμό άλλου κώδικα με βάση το κομμάτι που έχει γραφεί, και η δυνατότητα εισαγωγής συνόλου σημείων με πολύ μικρή απόσταση μεταξύ τους από άλλο πρόγραμμα, όπως Matlab ή από αρχείο .txt (Notepad). Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καμπύλη-οδηγός ακόμα και καμπύλη που δεν έχει συγκεκριμένο τύπο, ή καμπύλη που δεν είναι συνάρτηση του x (δηλαδή καμπύλες στις οποίες σε μία τιμή του x αντιστοιχίζονται περισσότερες από μία τιμές του y), όπως οι καμπύλες Hilbert και Peano (με «στρογγυλευμένα» άκρα), που είναι μοτίβα κάλυψης επιφάνειας και χρησιμοποιούνται κατά κόρον στη στίλβωση. Ας σημειωθεί ότι ο κώδικας του ακριβούς μοντέλου που έχει γραφεί λειτουργεί για συναρτήσεις, και όχι για γραμμές που στην ίδια τεμημένη αντιστοιχίζονται περισσότερες από μία τεταγμένες (απαιτείται προσαρμογή του κώδικα σε αυτό το σημείο).



Σχήμα 3-8. Σύγκριση τροχοειδούς με Small Inclination Model και με Precise Model.

Επιπλέον, επειδή στον κώδικα εντοπίζεται η παράγωγος της καμπύλης-οδηγού σε παρονομαστή, θα απαιτούνταν η διακριτοποίηση της περιοχής να είναι τέτοια ώστε να αποφεύγεται το ακριβές σημείο ακροτάτου (ρύθμιση βήματος και σημείου εκκίνησης της διαδικασίας κατά κατάλληλο τρόπο, ώστε να αποφεύγονται οι τετμημένες στις οποίες η καμπύλη-οδηγός παρουσιάζει ακρότατα). Ωστόσο, εισήχθη έλεγχος ώστε να εντοπίζονται αυτά τα σημεία και ο υπολογισμός του y_c να μη γίνεται μέσω του τύπου (3-8), αλλά του (3-10), ώστε να αποφεύγεται η εμφάνιση μηδενικού στον παρονομαστή κλάσματος και η ύπαρξη απροσδιοριστίας-απειρισμού της προκύπτουσας τιμής.

3.4 Εποπτεία καλυπτόμενης επιφάνειας και επιλογή τροχοειδούς

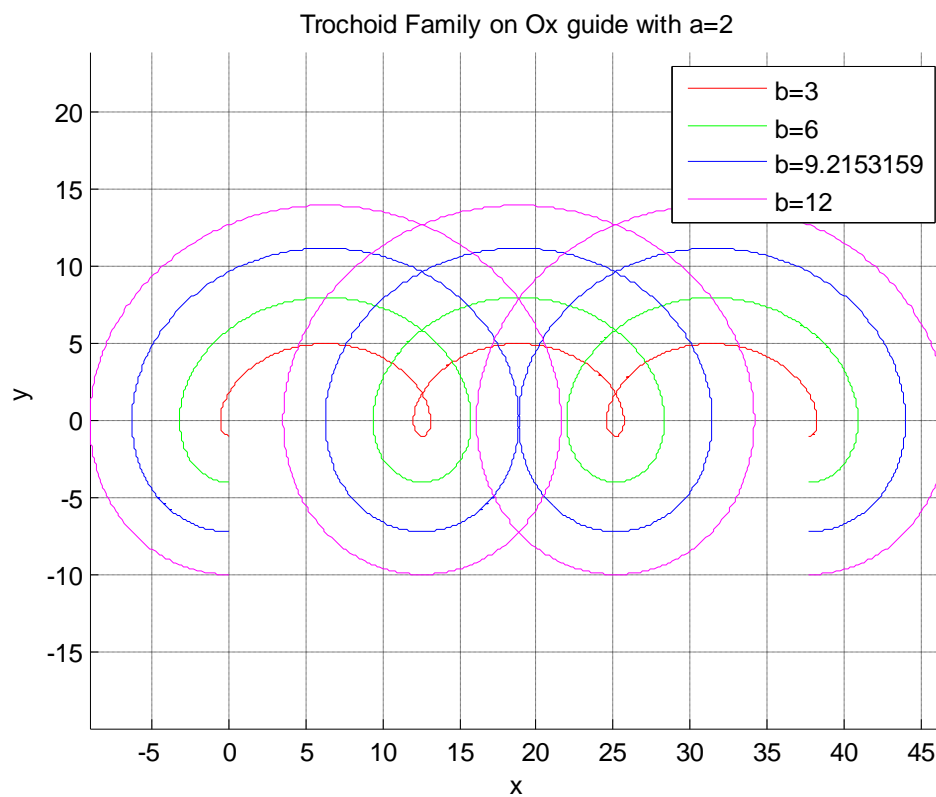
Κατά τη διάρκεια της στίλβωσης επίπεδης επιφάνειας με δακτύλιο στίλβωσης (polishing ring), το κέντρο του δακτυλίου ακολουθεί την εκάστοτε τροχοειδή καμπύλη και, με επαλληλία περιστροφικής κίνησης και πρόωσης, ο δακτύλιος πραγματοποιεί τη στίλβωση της συγκεκριμένης επιφάνειας. Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, κομβικής σημασίας είναι να αναπτυχθεί μία μεθοδολογία επιλογής της κατάλληλης τροχοειδούς καμπύλης ανάλογα με τη διάμετρο του δακτυλίου που χρησιμοποιείται

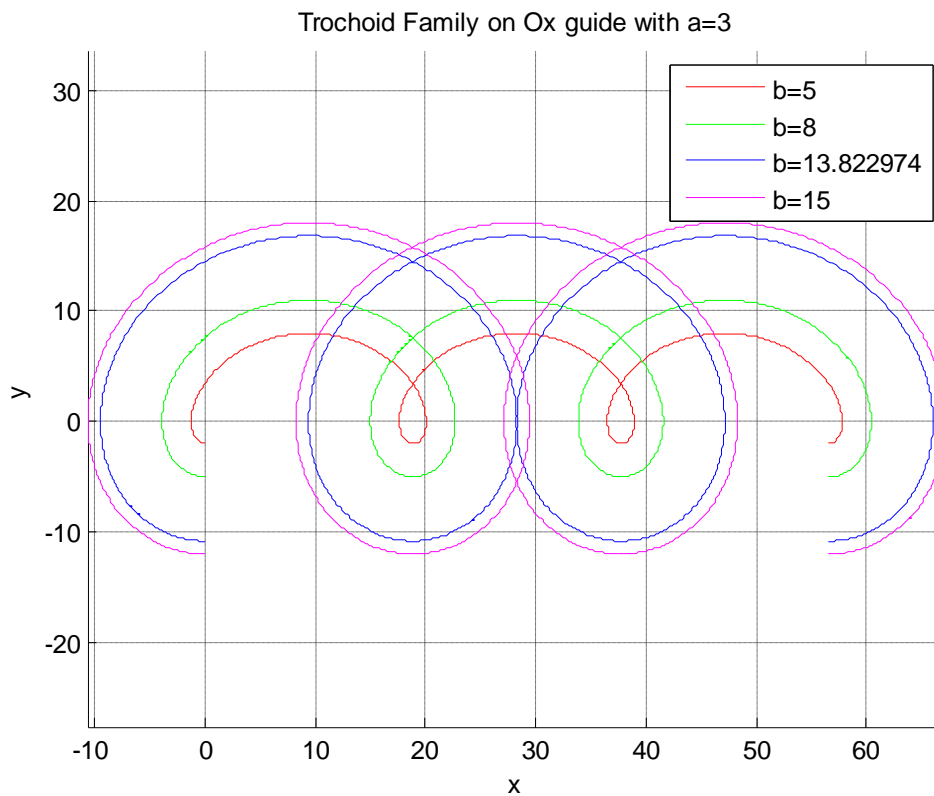
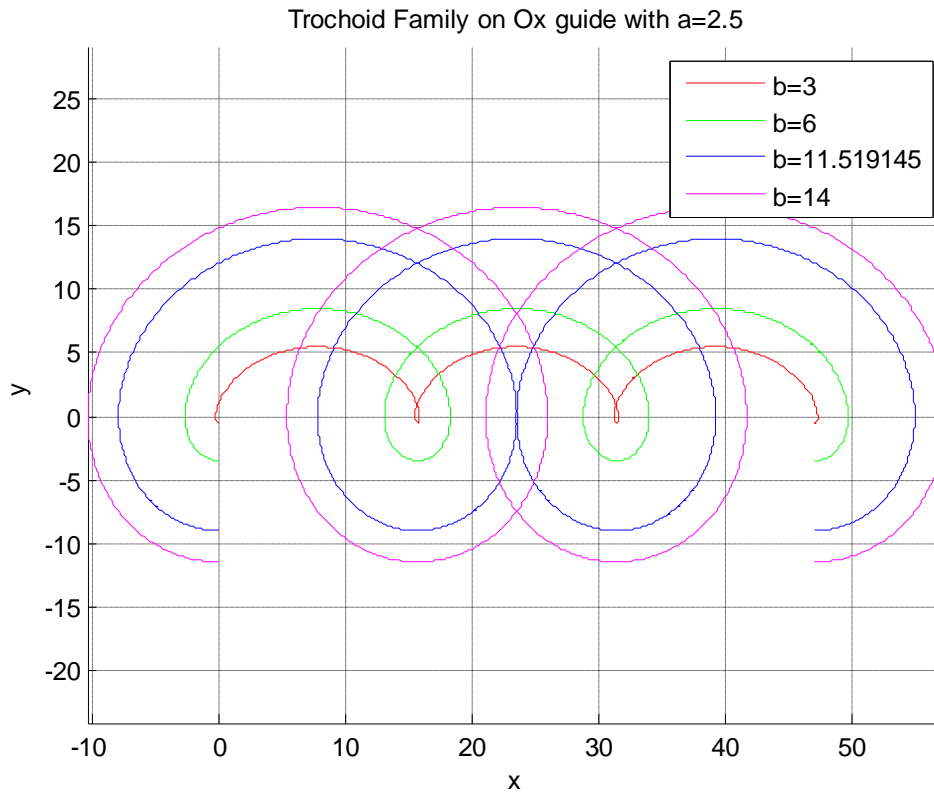
ώστε να επιτυγχάνεται πλήρης και ομοιόμορφη κάλυψη της επιφάνειας, για βελτιστοποίηση του αποτελέσματος.

Διαθέτουμε τριών ειδών δακτυλίους, από διαμάντι (diamond ring) με διάμετρο 12 mm, από μπρούντζο (brass ring) με διάμετρο επίσης 12 mm και από πλαστικό (plastic ring) με διάμετρο 14 mm. Για βέλτιστη κάλυψη της επιφάνειας επιλέγουμε να χρησιμοποιήσουμε τροχοειδείς με $a < b$. Ορίζεται παράμετρος λ , ως εξής:

$$\lambda = \frac{a}{b} \quad (3-16)$$

Ακολουθούν διαγράμματα τροχοειδών με οδηγό τον άξονα Ox και με δεδομένο a , για διαφορετικές τιμές του b , άρα και της παραμέτρου λ .





Σχήμα 3-9 (Άνω). Οικογένεια τροχοειδών με $a=2$.

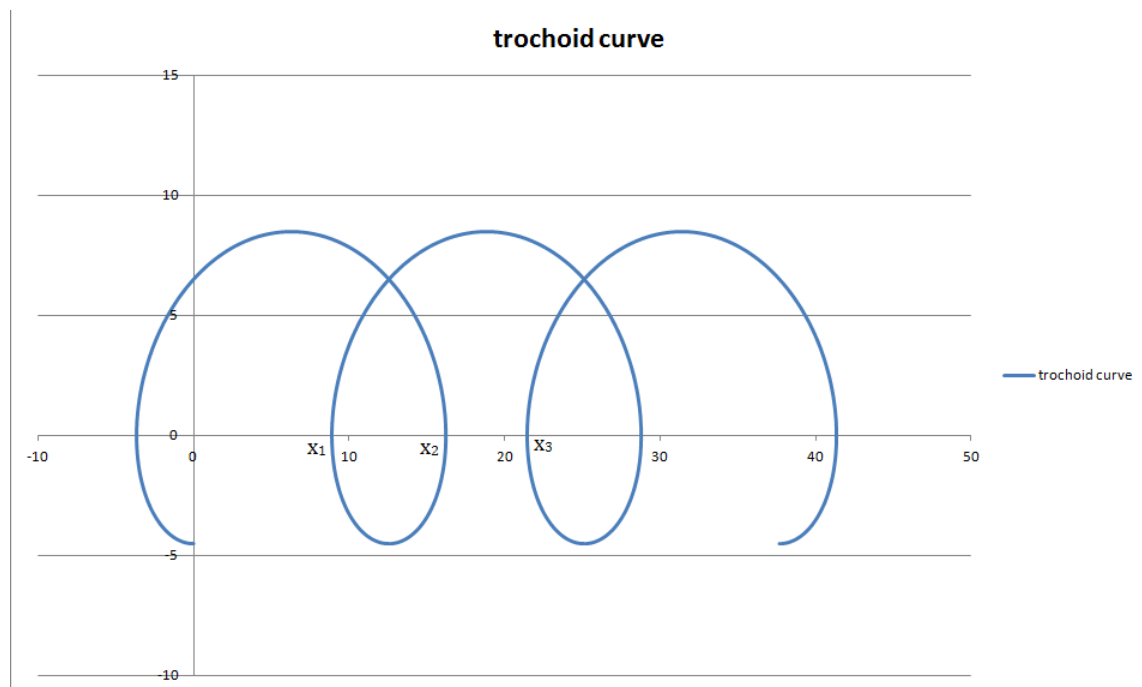
(Μέση). Οικογένεια τροχοειδών με $a=2.5$.

(Κάτω). Οικογένεια τροχοειδών με $a=3$.

Από τα παραπάνω διαγράμματα μπορούμε να κάνουμε μία βασική παρατήρηση. Το υπ' αριθμόν (i-1) loop της τροχοειδούς εφάπτεται με το υπ' αριθμόν (i+1) loop για συγκεκριμένη τιμή του λόγου a/b, δηλαδή της παραμέτρου λ, ίση με 0.21703. Όταν αυτή η τιμή μικρύνει περαιτέρω, τότε τα (i-1)-οστό και (i+1)-οστό loop της τροχοειδούς αποκτούν 2 σημεία τομής. Αυτό το γεγονός είναι προς αποφυγήν στη διαδικασία επιλογής τροχοειδούς, αφενός γιατί επιδιώκουμε ένα συγκεκριμένο μοτίβο για την επαρκέστερη μελέτη της τροχοειδούς και τη διατύπωση των συνθηκών που θα εξασφαλίσουν την πληρότητα και την ομοιομορφία της κάλυψης της προς στίλβωση επιφάνειας και, αφετέρου διότι οδηγεί σε τροχοειδή σχήματα μεγάλου ύψους, πράγμα ανεπιθύμητο όταν επιχειρήσουμε να προσαρμόσουμε το τροχοειδές μοτίβο για την αξιοποίησή του σε 3D επιφάνεια. Αυτή η τιμή του λ θα ονομάζεται στο εξής «κρίσιμη» τιμή του λ και θα συμβολίζεται ως

$$\lambda_{cr} = \frac{a}{b_{max}} \cong 0.21703 \quad (3-17)$$

Η σχέση (3-17) αποτελεί και την πρώτη συνθήκη για την επιλογή τροχοειδούς και αναφέρεται πλήρως στη μορφή της καμπύλης που θα επιλεγεί. Η αποδεκτή μορφή της τροχοειδούς είναι αυτή που εικονίζεται στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 3-10. Κλασική μορφή τροχοειδούς χωρίς intersection μεταξύ (i-1)-οστού και (i+1)-οστού loop.

Στο σχήμα 3-10 ορίζονται τα σημεία με τετμημένες x_1 , x_2 και x_3 . Αυτές οι ποσότητες θα χρησιμεύσουν στην διατύπωση συνθηκών που θα εξασφαλίζουν την πλήρη και ομοιόμορφη κάλυψη της προς στίλβωση επιφάνειας. Από το σχήμα 3-10

γίνεται αντιληπτό ότι το ζήτημα πληρότητας της κάλυψης της προς στίλβωση επιφάνειας εντοπίζεται σε δύο περιοχές, αυτή μεταξύ x_1 και x_2 , και αυτή μεταξύ x_2 και x_3 . Η διάμετρος του στιλβωτικού δακτυλίου πρέπει να είναι επαρκής ώστε να καλύπτονται πλήρως αυτές οι δύο περιοχές. Συνεπώς, διατυπώνονται οι ακόλουθες συνθήκες πλήρους κάλυψης της επιφάνειας.

$$x_2 - x_1 \leq D_{brass / diamond} \quad (3-18\alpha)$$

$$x_2 - x_1 \leq D_{plastic} \quad (3-18\beta)$$

$$x_3 - x_2 \leq D_{brass / diamond} \quad (3-19\alpha)$$

$$x_3 - x_2 \leq D_{plastic} \quad (3-19\beta)$$

Οι σχέσεις (3-18α) και (3-19α) εξασφαλίζουν πλήρη κάλυψη για στίλβωση με διαμαντένιο ή μπρούντζινο δακτύλιο, ενώ οι σχέσεις (3-18β) και (3-19β) για στίλβωση με χρήση πλαστικού δακτυλίου. Ωστόσο, η πλήρης κάλυψη της επιφάνειας δεν εγγυάται από μόνη της την καλή ποιότητα στίλβωσης, καθώς είναι δυνατό κάποια σημεία να έχουν «περαστεί» πάνω από μία φορές, δημιουργώντας ανεπιθύμητη ανομοιομορφία στην κάλυψη. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε υπερβολική στίλβωση τμήματος της επιφάνειας και, πιθανώς σε καταστροφή του αποτελέσματος που με κόπο επετεύχθη κατά τα προηγούμενα στάδια της διαδικασίας του γυαλίσματος. Για την αποφυγή τέτοιων φαινομένων, υιοθετείται η ακόλουθη συνθήκη.

$$x_3 - x_1 \geq D_{brass / diamond} \quad (3-20\alpha)$$

$$x_3 - x_1 \geq D_{plastic} \quad (3-20\beta)$$

Μέσω της συνθήκης που προσδιορίζουν οι σχέσεις (3-20) εξασφαλίζεται ότι δεν υπάρχει σημείο επί της προς στίλβωση επιφάνειας μεταξύ του x_1 και του x_3 που να καλύπτεται πάνω από δύο φορές κατά τη διέλευση του στιλβωτικού δακτυλίου, γεγονός που εξασφαλίζει την ομοιομορφία της κάλυψης της επιφάνειας.

Το αρχείο Excel με τίτλο «Trochoid curve» υπολογίζει τα σημεία τομής της τροχοειδούς καμπύλης με τον άξονα Ox. Αλλάζοντας τις τιμές των παραμέτρων a και b και χρησιμοποιώντας τις υπολογισθείσες τιμές των x_1 , x_2 και x_3 , δημιουργήθηκε ένα νέο αρχείο Excel με τίτλο «Trochoid selection-condition checking». Το αρχείο αυτό υπολογίζει τις προαναφερθείσες διαφορές και εξετάζει την ισχύ των συνθηκών που περιγράφουν οι σχέσεις (3-18), (3-19) και (3-20). Εάν ισχύει η τριάδα σχέσεων (3-18α), (3-19α) και (3-20α), τότε η συγκεκριμένη τιμή του b για τη δεδομένη τιμή του a είναι αποδεκτή για στίλβωση με μπρούντζινο ή διαμαντένιο δακτύλιο. Αντίστοιχα

για πλαστικό δακτύλιο, αν επαληθεύεται η τριάδα σχέσεων (3-18β), (3-19β) και (3-20β).

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε είναι η εξής. Για κάποια τυχαία τιμή του α μεταβάλλουμε στο αρχείο «Trochoid Curve» το b και εντοπίζουμε τις τιμές των x_1 , x_2 και x_3 , τις οποίες και καταχωρούμε στο «Trochoid selection-condition checking». Επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία για πολλές τιμές του b για το ίδιο α . Εν συνεχεία γίνεται υπολογισμός των διαφορών και έλεγχος συνθηκών. Τέλος πλοτάρονται στο ίδιο διάγραμμα οι καμπύλες των τριών διαφορών συναρτήσεως του b και επίσης 2 οριζόντιες και μία κάθετη γραμμές που δείχνουν τα όρια που επιβάλλουν οι περιορισμοί.

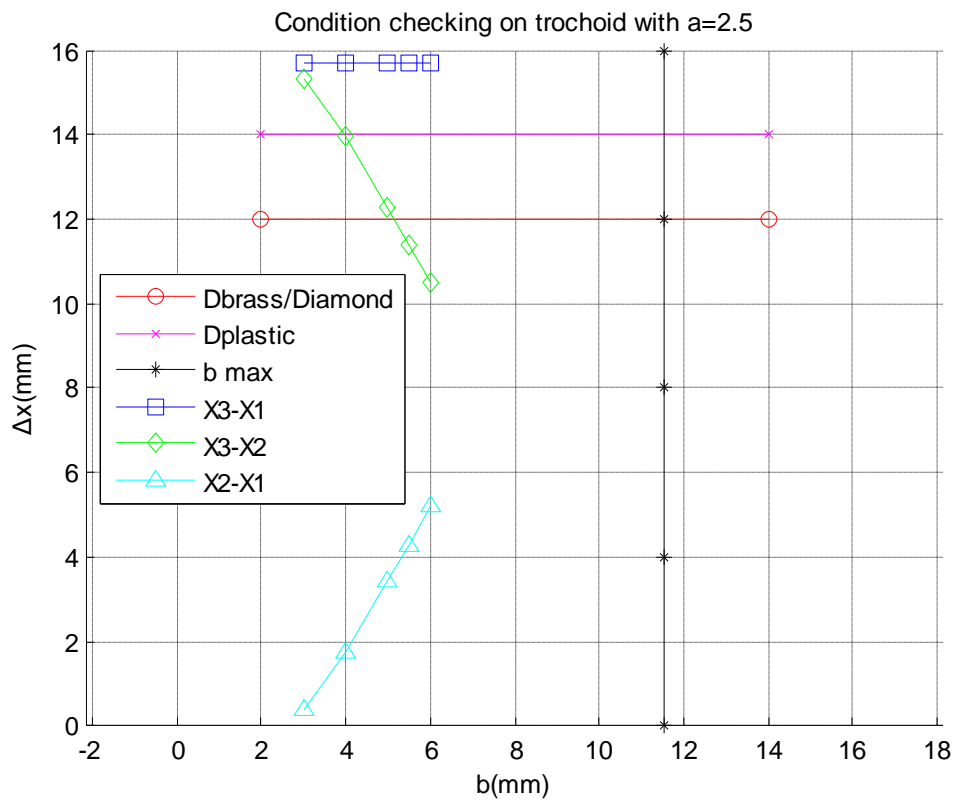
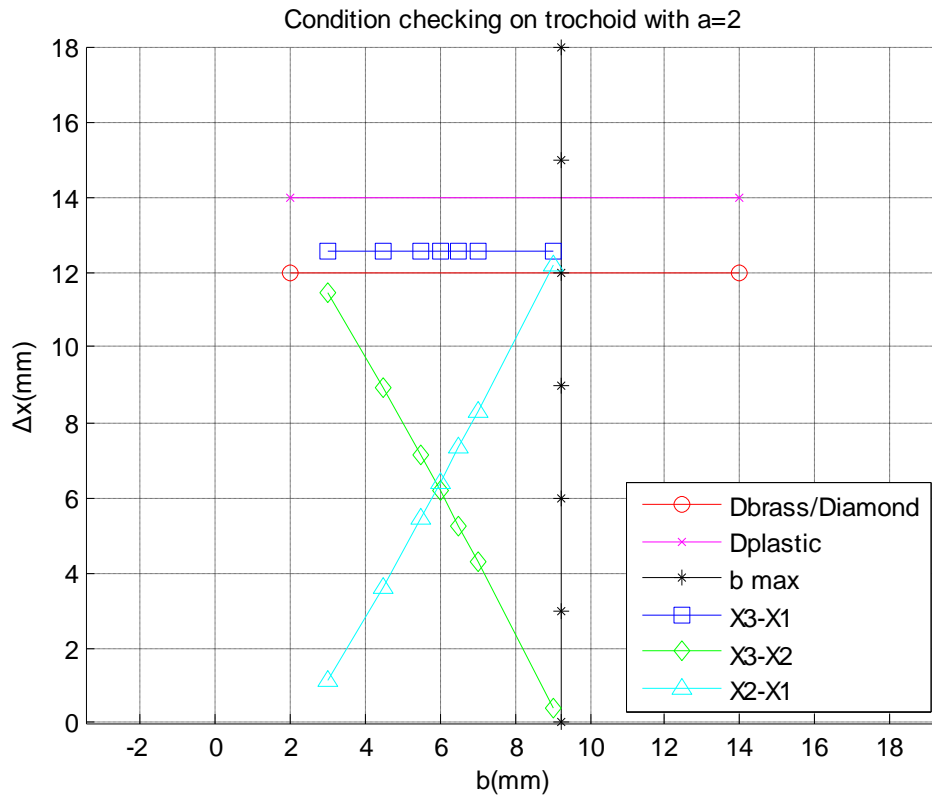
Παρατηρούμε ότι για τις συναρτήσεις των διαφορών $(x_2 - x_1)$, $(x_3 - x_2)$ και $(x_3 - x_1)$ για σταθερό α συναρτήσεως του b ισχύει ότι η $(x_2 - x_1)$ είναι γνησίως αύξουσα, η $(x_3 - x_2)$ γνησίως φθίνουσα και η $(x_3 - x_1)$ σταθερή.

Για να είναι κάποια τιμή του b αποδεκτή για το συγκεκριμένο α πρέπει να ισχύουν:

1. Οι (3-18α), (3-19α) και (3-20α) και επιπρόσθετα $b < b_{max}$ για Brass/Diamond polishing ring.
2. Οι (3-18β), (3-19β) και (3-20β) και επιπρόσθετα $b < b_{max}$ για Plastic polishing ring.

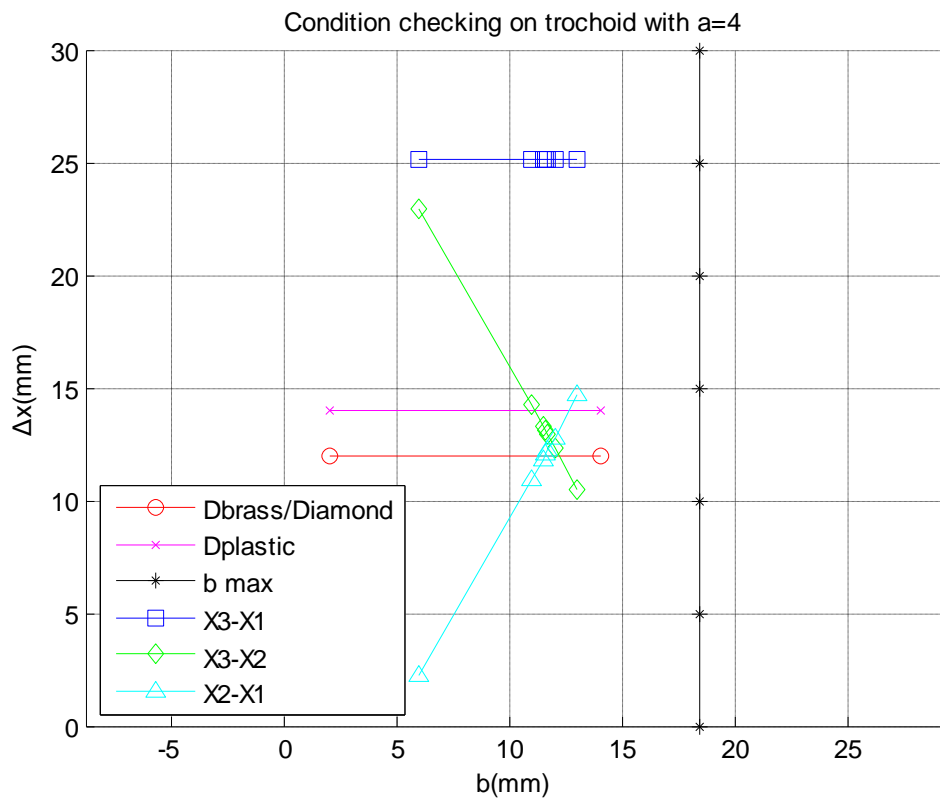
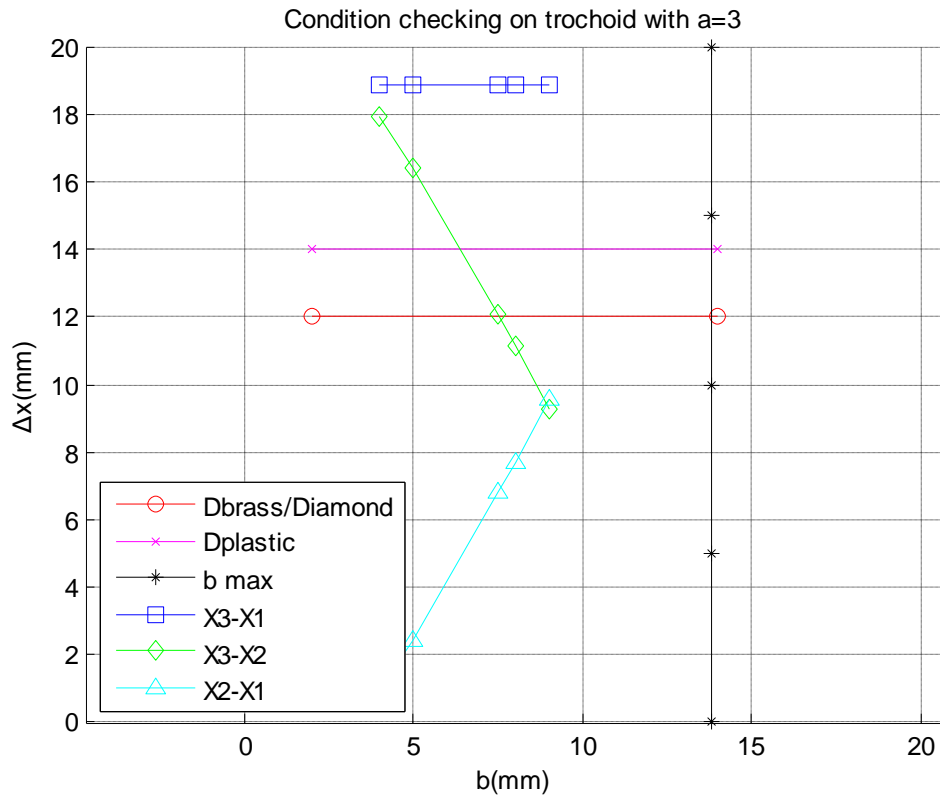
Συνεπώς οι γραμμές $(x_2 - x_1)$ και $(x_3 - x_2)$ πρέπει να βρίσκονται και οι δύο κάτω της οριζόντιας που οριοθετεί τη διάμετρο του μεταλλικού ή του πλαστικού δακτυλίου αντίστοιχα, και η γραμμή $(x_3 - x_1)$ άνω αυτής, ενώ ταυτόχρονα πρέπει να βρισκόμαστε στην περιοχή αριστερά της κάθετης ευθείας $b = b_{max}$. Με αυτά τα δεδομένα, για κάθε τιμή του α οριοθετείται μία περιοχή του b που είναι αποδεκτό για κάθε είδος (άρα και διάμετρο) στιλβωτικού δακτυλίου.

Τα σχήματα που ακολουθούν απεικονίζουν τα διαγράμματα ελέγχου των συνθηκών για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου α (συγκεκριμένα για $\alpha=2, 2.5, 3$ και 4).



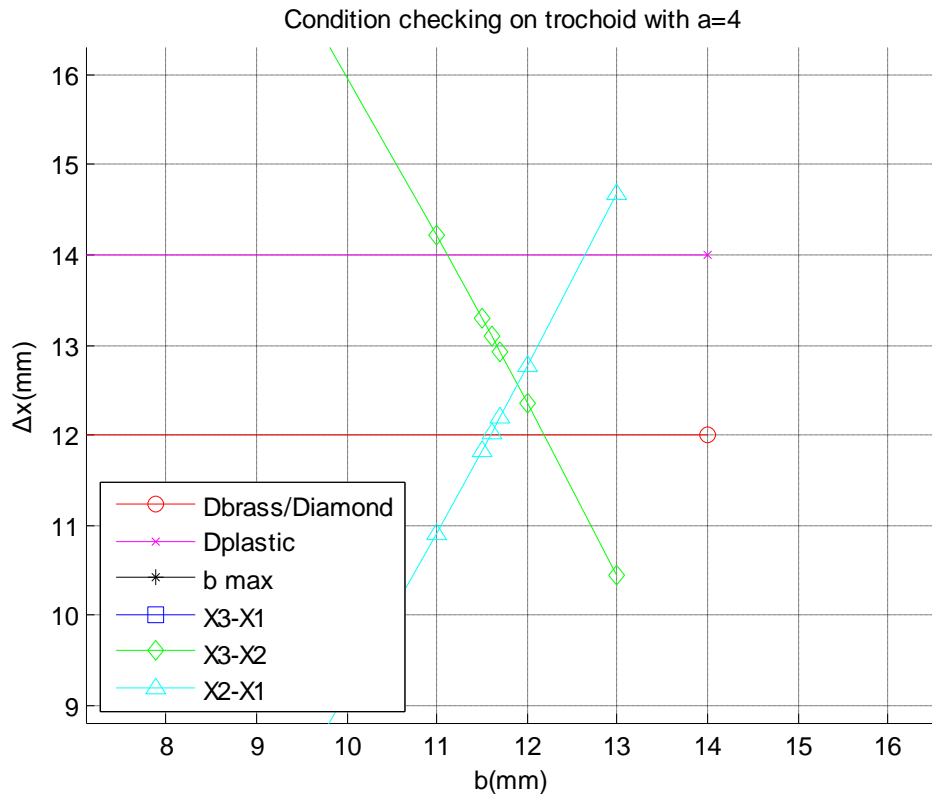
Σχήμα 3-11 (Άνω). Έλεγχος συνθηκών σε οικογένεια τροχοειδών με $a=2$.

(Κάτω). Έλεγχος συνθηκών σε οικογένεια τροχοειδών με $a=2.5$.



Σχήμα 3-12 (Άνω). Έλεγχος συνθηκών σε οικογένεια τροχοειδών με $a=3$.

(Κάτω). Έλεγχος συνθηκών σε οικογένεια τροχοειδών με $a=4$.



Σχήμα 3-13. Λεπτομέρεια του σχήματος 3-10 (Κάτω). Αποδεικνύεται ότι δεν υπάρχει αποδεκτό b για χρήση μεταλλικού δακτυλίου στην οικογένεια τροχοειδών με $a=4$.

3.5 Αναλυτική εύρεση ριζών τροχοειδούς και μαθηματικός προσδιορισμός μεγεθών

Η ισχύς των συνθηκών που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο εξετάζονται επί τροχοειδών καμπυλών με οδηγό-καμπύλη τον άξονα Ox , συνεπώς οι συντεταγμένες τους δίνονται από τις σχέσεις (3-1) και (3-2). Ο προσδιορισμός των x_1 , x_2 και x_3 απαιτεί την επίλυση της εξίσωσης

$$y_{tr} = a - b \cdot \cos\varphi = 0 \quad (3-21)$$

ως προς φ και την αντικατάσταση αυτού στην σχέση (3-1). Επιλύοντας την (3-21) βρίσκουμε ότι

$$\varphi_{I,II} = 2k\pi \pm \arccos\left(\frac{a}{b}\right), k \in \mathbb{Z}^* \quad (3-22)$$

Όπου το I αντιστοιχεί στο $+$ και το II στο $-$. Στη συνέχεια, με αντικατάσταση στην (3-1), και με χρήση των εξισώσεων

$$\sin(-\varphi) = -\sin\varphi \quad (3-23)$$

$$\sin[\arccos(x)] = \sqrt{1-x^2} \quad (3-24)$$

$$\sin(2k\pi \pm \varphi) = \sin\varphi \quad (3-25)$$

Προκύπτει η σχέση

$$x_{tr_{I,II}} = 2k\pi a \pm a \cdot \arccos\left(\frac{a}{b}\right) \mp b \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{a}{b}\right)^2}, \kappa \in \mathbb{Z}^* \quad (3-26)$$

όπου το I αντιστοιχεί στα άνω πρόσημα και το II στα κάτω.

Από την σχέση (3-26) προκύπτουν τα x_1 , x_2 και x_3 ως εξής. Για το x_1 αντικαθιστούμε στον τύπο του x_{tr_I} το $\kappa = 1$. Για το x_2 αντικαθιστούμε στον τύπο του $x_{tr_{II}}$ το $\kappa = 1$. Τέλος, για το x_3 αντικαθιστούμε στον τύπο του x_{tr_I} το $\kappa = 2$. Κατόπιν αυτών, προκύπτουν οι σχέσεις:

$$x_1 = x_{tr_I}(\kappa = 1) = 2\pi a + a \cdot \arccos\left(\frac{a}{b}\right) - b \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{a}{b}\right)^2} \quad (3-27\alpha)$$

$$x_2 = x_{tr_{II}}(\kappa = 1) = 2\pi a - a \cdot \arccos\left(\frac{a}{b}\right) + b \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{a}{b}\right)^2} \quad (3-27\beta)$$

$$x_3 = x_{tr_I}(\kappa = 2) = 4\pi a + a \cdot \arccos\left(\frac{a}{b}\right) - b \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{a}{b}\right)^2} \quad (3-27\gamma)$$

Αξιοποιώντας τις σχέσεις (3-27) μπορούμε να εκφράσουμε τις διαφορές $(x_2 - x_1)$, $(x_3 - x_2)$ και $(x_3 - x_1)$ συναρτήσει των παραμέτρων της τροχοειδούς a και b . Προκύπτουν οι σχέσεις:

$$(x_2 - x_1) = -2a \cdot \arccos\left(\frac{a}{b}\right) + 2b \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{a}{b}\right)^2} \quad (3-28\alpha)$$

$$(x_3 - x_2) = 2\pi a + 2a \cdot \arccos\left(\frac{a}{b}\right) - 2b \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{a}{b}\right)^2} \quad (3-28\beta)$$

$$(x_3 - x_1) = 2\pi a \quad (3-28\gamma)$$

Συνεπώς επαληθεύεται η παρατήρηση που είχε γίνει ότι για δεδομένο a η διαφορά $(x_3 - x_1)$ είναι σταθερή. Η εξέταση των κριτηρίων μπορεί πλέον να γίνει εύκολα με απλή αντικατάσταση στους τύπους, με δεδομένο βέβαια ότι ισχύει $a < b < b_{max}$, αλλιώς οι σχέσεις (3-28) δεν έχουν καμία ισχύ. Επιπλέον, είναι δυνατός ο αριθμητικός προσδιορισμός της τιμής του λ_{cr} , σε αντίθεση με την γεωμετρική εκτίμησή του που έχει προηγηθεί. Από το σχήμα 3-8 παρατηρούμε ότι $\lambda = \lambda_{cr}$ όταν $x_2 = x_3$, δηλαδή όταν μηδενίζεται η διαφορά $(x_3 - x_2)$. Εξισώνουμε λοιπόν την σχέση (3-28β) με μηδέν, αντικαθιστούμε το b με b_{max} και διαιρούμε δεξί και αριστερό μέλος με το b_{max} . Τέλος, αντικαθιστούμε $\lambda_{cr} = \frac{a}{b_{max}}$. Προκύπτει η εξίσωση:

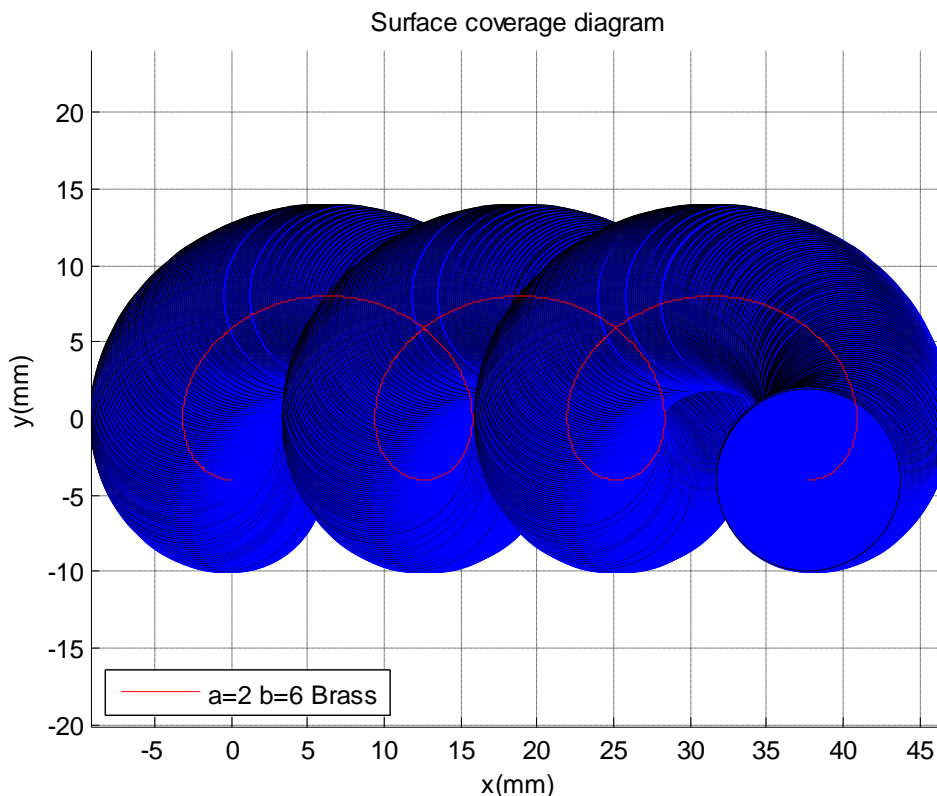
$$\pi \cdot \lambda_{cr} + \lambda_{cr} \cdot \arccos(\lambda_{cr}) - \sqrt{1 - \lambda_{cr}^2} = 0 \quad (3-29)$$

η οποία επιλυόμενη με τη βοήθεια του site www.wolframalpha.com δίνει ρίζα $\lambda_{cr} = 0.21723$, τιμή πολύ κοντινή με την καθαρά γεωμετρική προσέγγιση που είχαμε κάνει σε προηγούμενο κεφάλαιο.

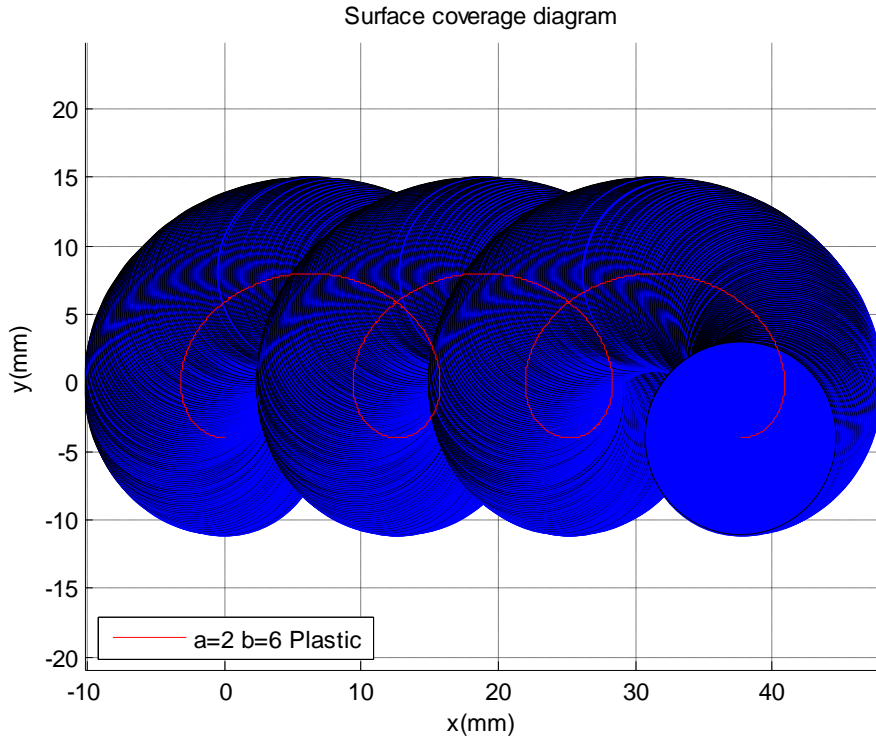
3.6 Σχηματική απεικόνιση κάλυψης επιφανείας

Έχοντας πλέον ολοκληρώσει την γεωμετρική ανάλυση και μετά τη διατύπωση των απαιτούμενων συνθηκών, είναι δυνατό να παραθέσουμε κάποια σχήματα, που επαληθεύουν την αξιοπιστία της μεθόδου που διατυπώθηκε. Για τον σκοπό αυτό γράφηκε πρόγραμμα σε M-file της Matlab με τίτλο «circle» ώστε να αποτυπώσει την επιφάνεια που καλύπτει ο δακτύλιος ακολουθώντας την εκάστοτε τροχοειδή καμπύλη.

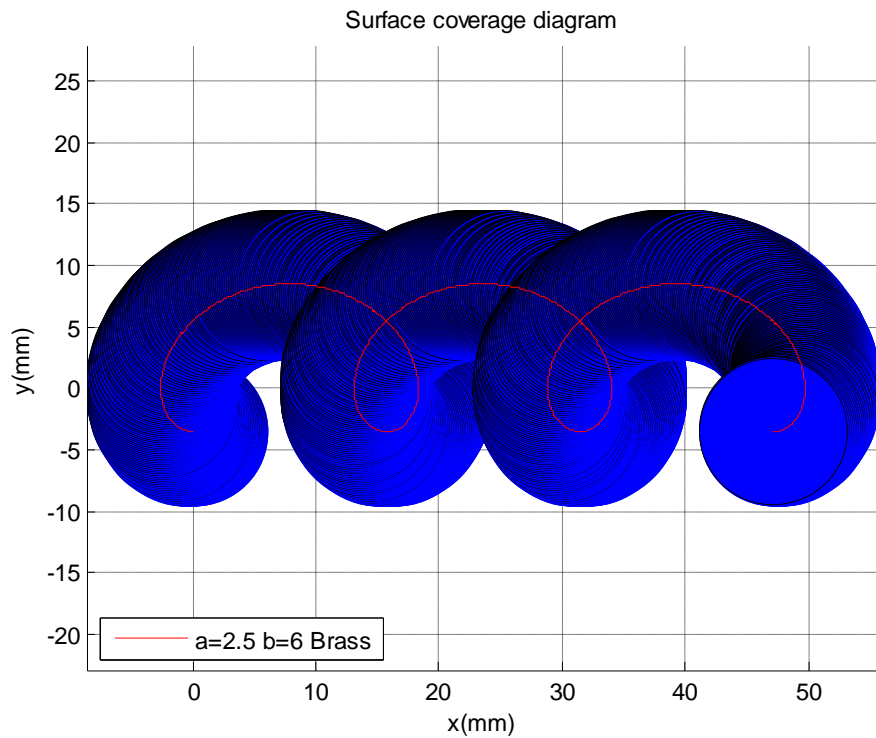
Ας σημειωθεί ότι στα ακόλουθα διαγράμματα εστιάζουμε την προσοχή μας στην μόνιμη κατάσταση και όχι σε τυχόν κενά στις μεταβατικές καταστάσεις προς την αρχή ή το τέλος της στίλβωσης.



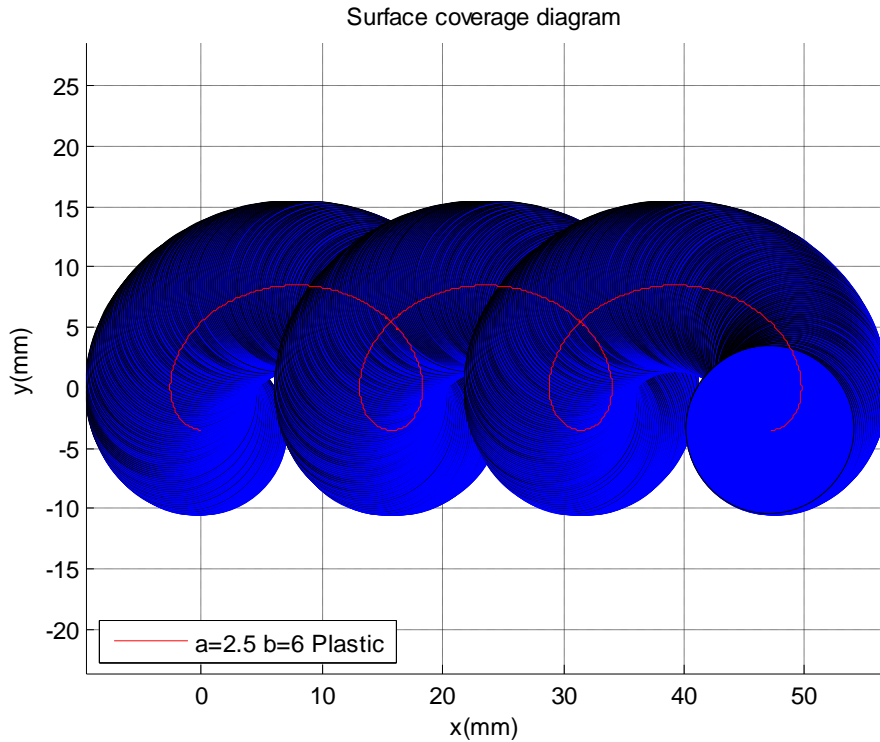
Σχήμα 3-14. $a=2$ $b=6$ Διάγραμμα κάλυψης επιφάνειας με Brass/Diamond polishing ring. Ο συνδυασμός παραμέτρων είναι αποδεκτός.



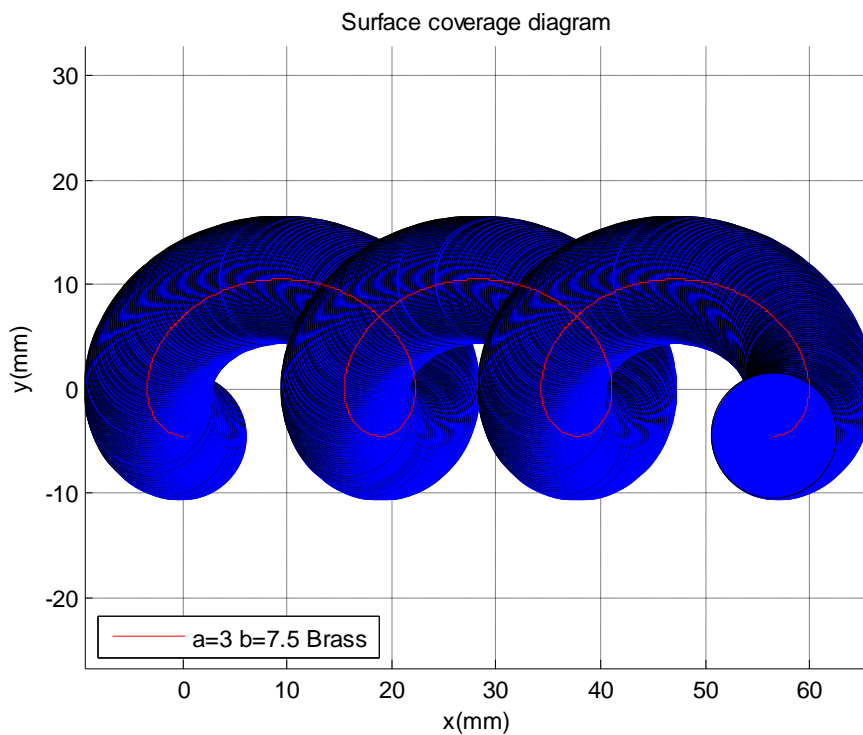
Σχήμα 3-15. $a=2$ $b=6$ Διάγραμμα κάλυψης επιφάνειας με Plastic polishing ring. Ο συνδυασμός παραμέτρων είναι μη αποδεκτός λόγω παραβίασης της συνθήκης της σχέσης (3-20β).



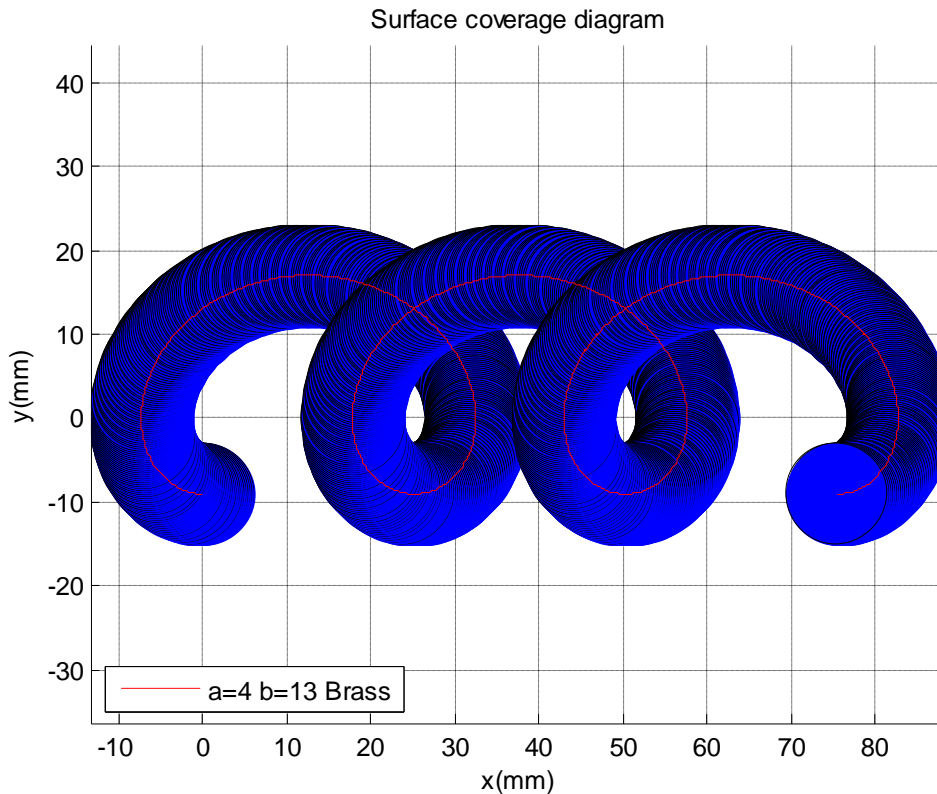
Σχήμα 3-16. $a=2.5$ $b=6$ Διάγραμμα κάλυψης επιφάνειας με Brass/Diamond polishing ring. Ο συνδυασμός παραμέτρων είναι αποδεκτός.



Σχήμα 3-17. $a=2.5$ $b=6$ Διάγραμμα κάλυψης επιφάνειας με Plastic polishing ring. Ο συνδυασμός παραμέτρων είναι αποδεκτός.



Σχήμα 3-18. $a=3$ $b=7.5$ Διάγραμμα κάλυψης επιφάνειας με Brass/Diamond polishing ring. Ο συνδυασμός παραμέτρων είναι μη αποδεκτός λόγω παραβίασης της συνθήκης της σχέσης (3-19α).



Σχήμα 3-19. $a=4$ $b=13$ Διάγραμμα κάλυψης επιφάνειας με Brass/Diamond polishing ring. Ο συνδυασμός παραμέτρων είναι μη αποδεκτός λόγω παραβίασης της συνθήκης της σχέσης (3-18α).

Ας σημειωθεί ότι στο σχήμα 3-19 παρότι η σχέση (3-18α) είναι αυτή που κρίνει ως μη αποδεκτό το συγκεκριμένο συνδυασμό παραμέτρων, στο διάγραμμα εμφανίζεται και άλλη ακάλυπτη περιοχή που δεν εντοπίζεται ωστόσο από κανέναν έλεγχο (ενδιαμέσως των 2 περιοχών που εντοπίζει η σχέση (3-18α)). Για αυτό το λόγο συνίσταται να γίνεται πάντα αυτό το διάγραμμα για τις ελάχιστες περιπτώσεις που θα προκύψει μη ανιχνεύσιμη ακάλυπτη περιοχή πάνω στην προς στίλβωση επιφάνεια, ως τελευταίο μέτρο ασφάλειας και επικύρωσης των τυποποιημένων ελέγχων.

4 Κατασκευή βάσης και συγκρότηση πειραματικής διάταξης

4.1 Λόγος κατασκευής και στόχος της διάταξης

Τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν, σχεδιάστηκαν έτσι ώστε να είναι πλήρως αυτοματοποιημένα και έγιναν με χρήση του κέντρου κατεργασιών HAAS του εργαστηρίου κατεργασιών των υλικών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ.

Μετά από εκτενή μελέτη της βιβλιογραφίας διαπιστώθηκε ότι τα αρχικά στάδια του γυαλίσματος με διαμανταλοιφές μεγέθους κόκκων από 28 έως 7 μm πραγματοποιούνται με μικρές σχετικά ταχύτητες περιστροφής και μικρή σχετικά πίεση στην κατεργαζόμενη επιφάνεια καθώς και με χρήση διαμαντένιου ή μεταλλικού polishing ring (Πίνακας 2-3). Ωστόσο, τα τελικά στάδια της στίλβωσης, τα οποία είναι και απαραίτητα για να προκύψει τελική επιφάνεια ποιότητας “καθρέφτη”, γίνονται με διαμανταλοιφή μεγέθους κόκκων 3 μm και απαιτούν μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής και πίεση, με παράλληλη χρήση πλαστικού polishing ring και ακολουθεί για το φινίρισμα χρήση πανιού (κετσέ) πάνω σε αυτό. Οι ταχύτητες περιστροφής που απαιτούνται αγγίζουν έως και τα 30000 RPM σε κάποιες περιπτώσεις, ταχύτητα που το κέντρο κατεργασιών δεν μπορεί σε καμία περίπτωση να προσφέρει, καθώς καλύπτει περιστροφικές ταχύτητες έως και 1000 RPM περίπου.

Αυτό το πρόβλημα επιλύθηκε με την κατασκευή μίας βάσης πρόσδεσης της άκρης του dremel του εργαστηρίου, με τη χρήση της οποίας εξασφαλίζεται:

- Ελαχιστοποίηση της ταλάντωσης του polishing ring/άκρης του dremel κατά τη διάρκεια της κατεργασίας,
- Επίτευξη έως και 30000 RPM, ίσες με τη μέγιστη ταχύτητα του dremel που χρησιμοποιήθηκε,
- Επίτευξη ομοαξονικότητας μεταξύ του polishing ring και της κεφαλής του κέντρου κατεργασιών, γεγονός κομβικής σημασίας για τον προγραμματισμό της κατεργασίας σε G-code, αφού δεν χρειάστηκε να οριστεί offset για τον ορισμό του tool path.

4.2 Εξαρτήματα βάσης και τρόπος κατασκευής τους (σχήματα και φωτογραφίες)

Η βάση που κατασκευάστηκε αποτελείται από τα εξής επιμέρους τεμάχια:

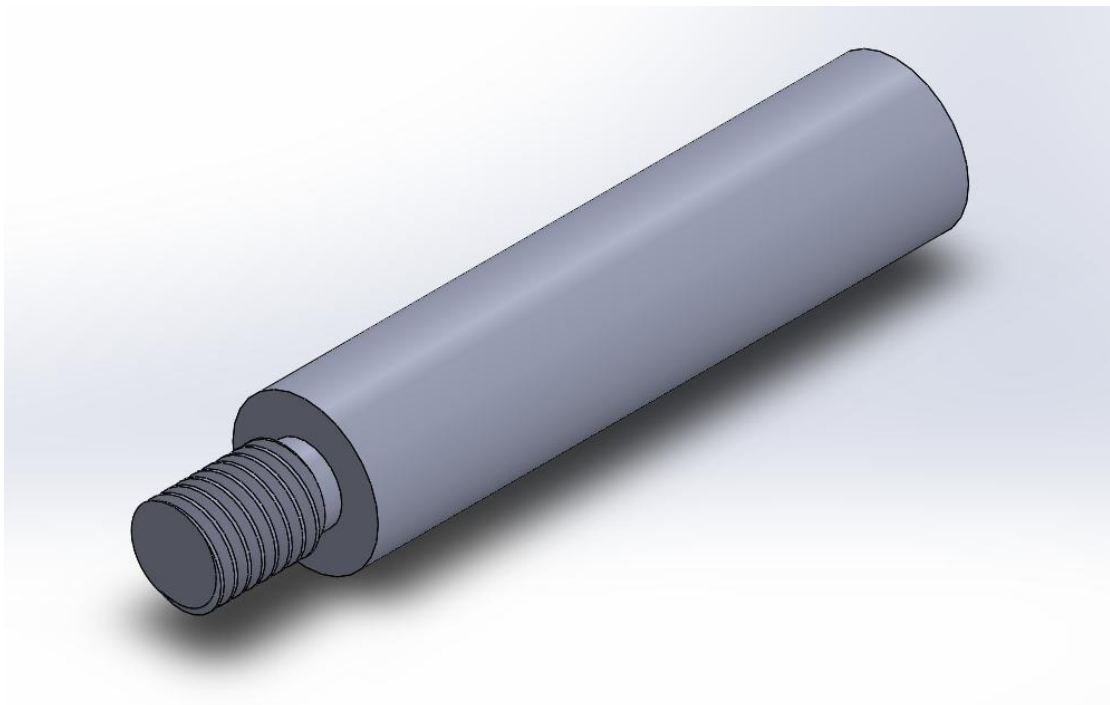
1. Ένας πείρος σύνδεσης της βάσης με την κεφαλή συστελλόμενου σφιγκτήρα του κέντρου κατεργασιών,
2. Ένας τάκος σύνδεσης,
3. Ένας κοχλίας Allen M10x1.5 L=10 χωρίς κεφαλή για την ασφάλιση του πείρου σύνδεσης στον τάκο σύνδεσης,
4. Μία βάση στήριξης του grinder που κατασκευάστηκε με την απαραίτητη κωνικότητα για την ιδανική προσαρμογή και ασφάλιση της άκρης του dremel εντός της κατασκευασθείσας κοιλότητας,
5. Ένας αποστάτης (μεταλλικός κύλινδρος) για την τήρηση ελάχιστης απόστασης μεταξύ του τάκου σύνδεσης και της βάσης στήριξης του grinder,
6. Δύο κοχλίες Allen M10x1.5 L=80 με κεφαλή για την σύνδεση του τάκου σύνδεσης (2) με τη βάση στήριξης (4),
7. Δύο κοχλίες Allen M10x1.5 L=16 χωρίς κεφαλή για την ασφάλιση των κοχλιών Allen (6) στη βάση στήριξης,
8. Δύο κοχλίες M6x1 L=30 εξαγωνικής κεφαλής για την ασφάλιση της άκρης του grinder στην κωνική κοιλότητα της βάσης στήριξης που κατασκευάστηκε,
9. Από 2 ροδέλες και περικόχλια M6x1 για κάθε έναν εκ των ανωτέρω κοχλιών (8),
10. Ελατήρια και βάσεις ελατηρίων διαφορετικής σταθεράς K για εισαγωγή ελέγχου της ασκούμενης δύναμης στην προς στίλβωση επιφάνεια.

Ακολουθούν τα κατασκευαστικά σχέδια και η μέθοδος κατασκευής καθενός εκ των επιμέρους τεμαχίων της βάσης που αναφέρονται παραπάνω.

1) Πείρος σύνδεσης.



Εικόνα 4-1. Πείρος σύνδεσης, κατασκευάστηκε στον τόρνο του εργαστηρίου του κτηρίου κατεργασιών του ΕΜΠ.

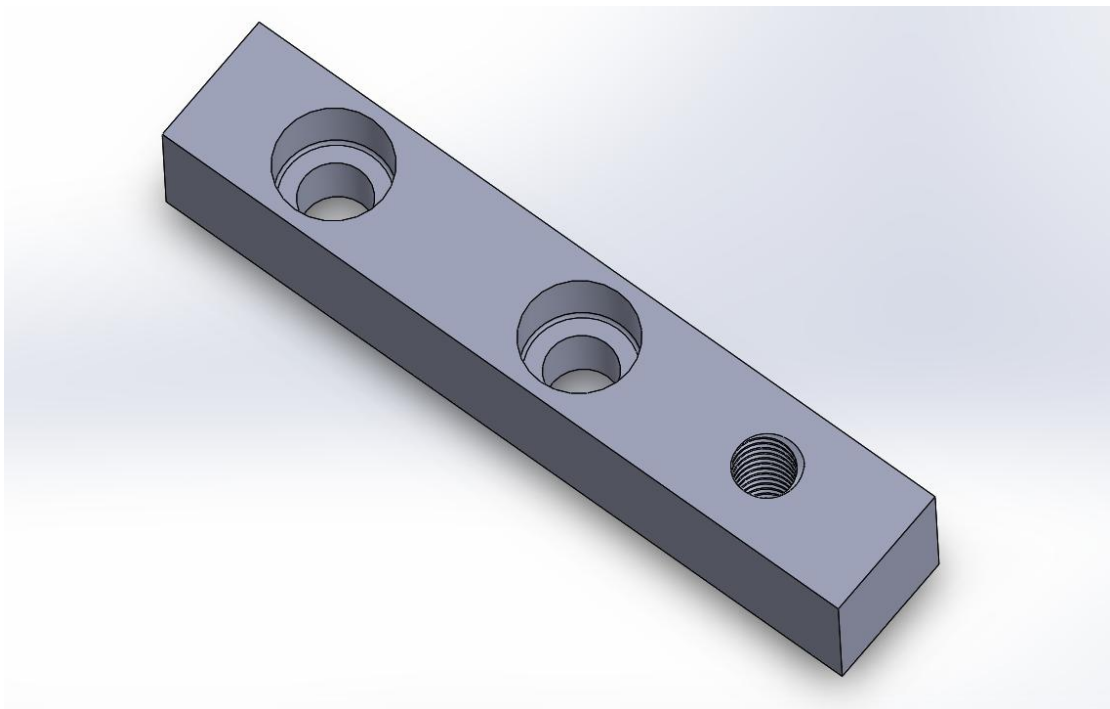


Εικόνα 4-2. Πείρος σύνδεσης, σχεδιασμένος στο περιβάλλον του SolidWorks.

2) Τάκος σύνδεσης.



Εικόνα 4-3. Τάκος σύνδεσης.



Εικόνα 4-4. Τάκος σύνδεσης, σχεδιασμένος στο περιβάλλον του SolidWorks.

Για την κατασκευή του τάκου σύνδεσης αγοράστηκε καλιμπρέ χαλύβδινη λάμα τετραγωνικής διατομής 20x20. Εν συνεχεία κόψαμε με το πριόνι ένα κομμάτι μήκους 112 mm (2 επιπλέον του επιθυμητού τελικού μήκους). Αρχικά έγινε κατεργασία των 2 προσώπων του τάκου, δένοντάς τον κατά μήκος σε τσοκ με 4 σφιγκτήρες. Στο τέλος αυτού του βήματος είχε επιτευχθεί το επιθυμητό μήκος του τάκου (110 mm).

Στη συνέχεια, δέσαμε το τεμάχιο κάθετα στο τσοκ, αφού πρώτα εντοπίσαμε την κατάλληλη θέση δημιουργίας της οπής, χρησιμοποιώντας μετρητικό ρολόι και αξιοποιώντας τη διάμετρο του τσοκ και το ρολόι του Υ άξονα του τόννου. Για τις υπόλοιπες οπές ακολουθήσαμε της ίδια μέθοδο, χρησιμοποιώντας ξανά το μετρητικό ρολόι και αξιοποιώντας τις γνωστές αποστάσεις μεταξύ των αξονικών των οπών.

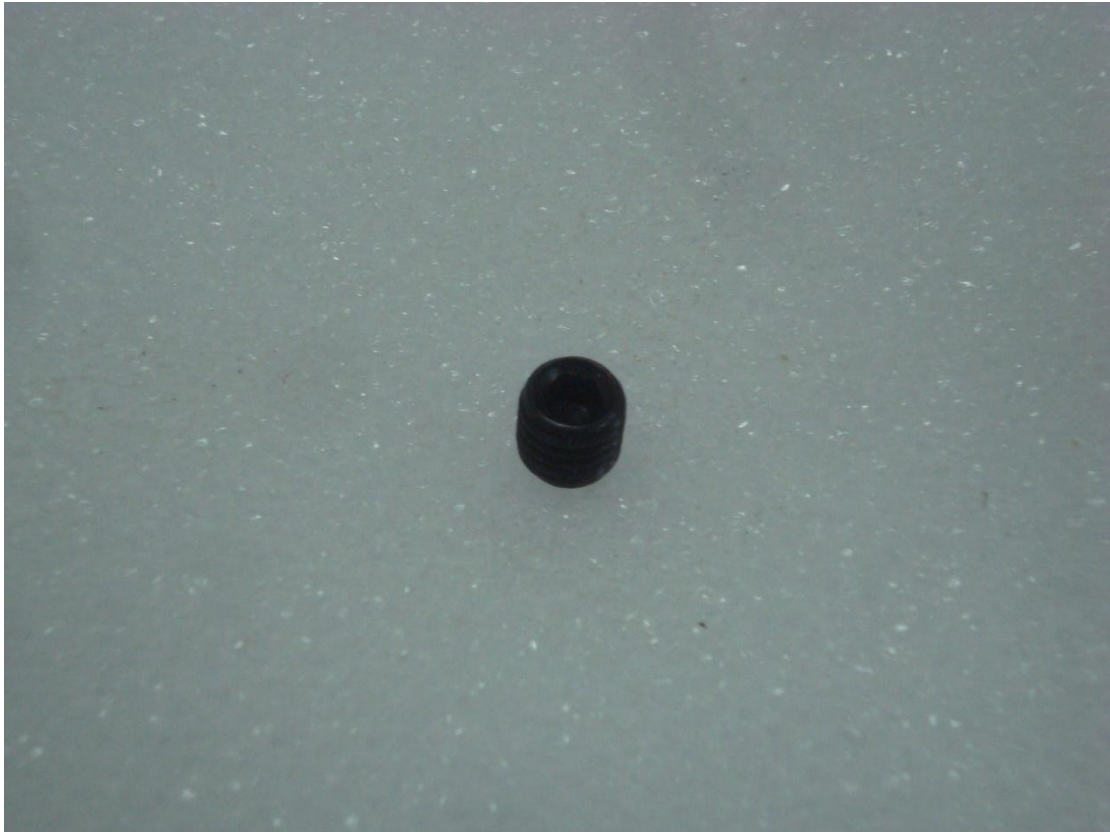
Όλες οι οπές έγιναν δένοντας το κατάλληλο τρυπάνι στην κουκουβάγια του τόννου, αφού πρώτα είχε προηγηθεί χρήση του κεντροτρύπανου. Με διαδοχικά τρυπήματα με τρυπάνια αυξανόμενης διαμέτρου και χρήση σαπουνέλαιου κατά τη διάρκεια της κατεργασίας επετεύχθησαν οι επιθυμητές τελικές διαμέτροι των οπών.

Τέλος, με χρήση των κατάλληλων κολαούζων έγινε το σπείρωμα M10x1.5 της δεξιάς οπής του σχήματος (αριστερή της φωτογραφίας).

3) Κοχλίας Allen M10x1.5 L=10 χωρίς κεφαλή.



Εικόνα 4-5. Πείρος σύνδεσης (αριστερά) και κοχλίας Allen M10x1.5 L=10 χωρίς κεφαλή (δεξιά).

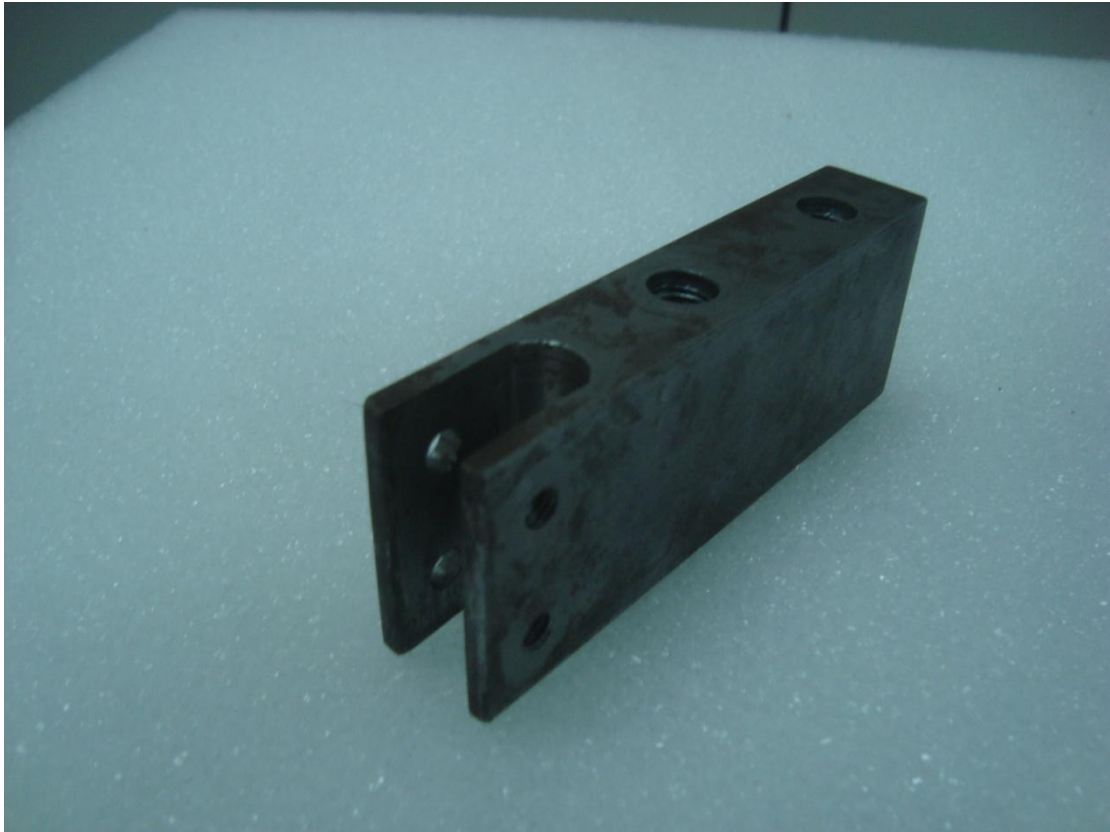


Εικόνα 4-6. Κοχλίας Allen M10x1.5 L=10 χωρίς κεφαλή.

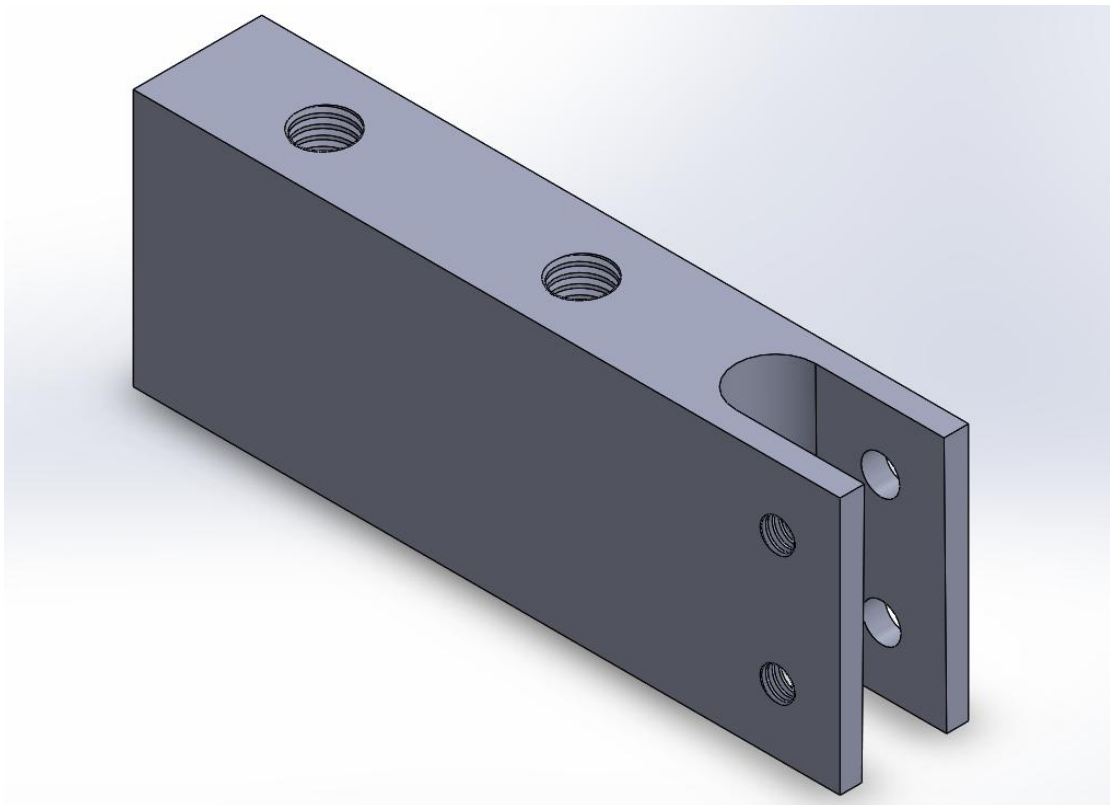
4) Βάση στήριξης grinder.



Εικόνα 4-7. Βάση στήριξης του grinder.



Εικόνα 4-8. Βάση στήριξης του grinder (αντίθετη λήψη).

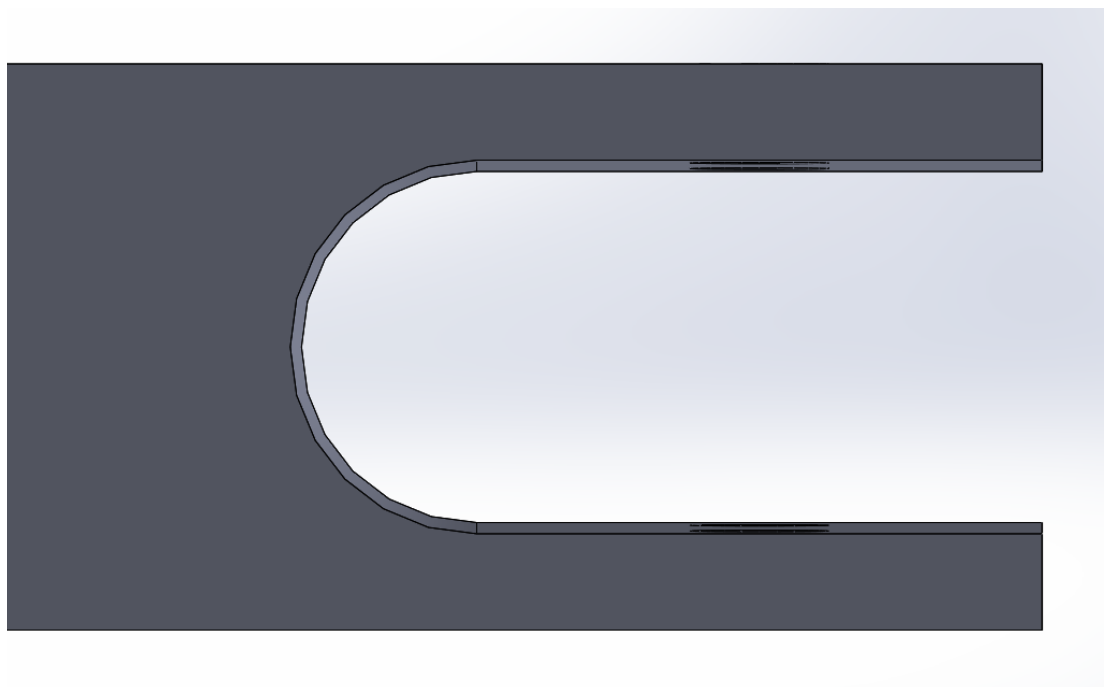


Εικόνα 4-9. Βάση στήριξης του grinder, σχεδιασμένη στο περιβάλλον του SolidWorks.

Για την κατασκευή της βάσης στήριξης του grinder αγοράστηκε καλιμπρέ χαλύβδινη λάμα ορθογωνικής διατομής 20x40. Έχοντας ήδη κατασκευάσει τον τάκο σύνδεσης (2), τον χρησιμοποιήσαμε ως καλίμπρα για να γίνουν οι τρύπες στη βάση στήριξης στα κατάλληλα σημεία με τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια και να αποφευχθούν ατέλειες στο κεντράρισμα τάκου (2) και βάσης (4). Αφού έγιναν οι τρύπες, το τεμάχιο δέθηκε στον τόρνο σε τσοκ με 4 σφιγκτήρες και κεντραρίστηκε στο σωστό σημείο με χρήση της πόντας που δέσαμε στην κουκουβάγια του τόρνου.

Για να κατασκευασθεί η απαιτούμενη κωνικότητα για την πρόσδεση της άκρης του grinder, χρησιμοποιήθηκε κατάλληλο κοπτικό εργαλείο, αρκετά λεπτό ώστε να επιτρέπεται από γεωμετρικής απόψεως η πρόσβασή του εντός της κατασκευασθείσας οπής. Εν συνεχεία, περιστρέψαμε το μικρό εργαλειοφορείο κατά την υπολογισθείσα γωνία (ημιγωνία κώνου) και προχωρήσαμε στην κατεργασία επιλέγοντας την πρόωση και τις στροφές για τη βέλτιστη ποιότητα της προκύπτουσας κωνικής επιφάνειας.

Τέλος, αφού έγιναν τα απαραίτητα σπειρώματα με χρήση των σωστών κολαούζων, έγινε χρήση πριονιού για την αφαίρεση του υλικού δεξιά της κωνικής πλέον οπής, ώστε να είναι δυνατή η πρόσδεση της άκρης του grinder σε αυτή, και τελικώς, η ασφάλισή της με τους κοχλίες M6x1 (8), και ακολούθησε φινίρισμα με λίμα και τροχό μέχρι την απόκτηση του επιθυμητού αποτελέσματος.



Εικόνα 4-10. Βάση στήριξης του grinder, σχεδιασμένη στο περιβάλλον του SolidWorks (άνωψη). Λεπτομέρεια που απεικονίζει την κωνικότητα στο σημείο πρόσδεσης του grinder επί της βάσης.

5) Αποστάτες.



Εικόνα 4-11. Αποστάτες διάταξης.

6) Κοχλίες Allen M10x1.5 L=80 με κεφαλή.



Εικόνα 4-12. Κοχλίες Allen M10x1.5 L=80 με κεφαλή.

7) Κοχλίες Allen M10x1.5 L=16 χωρίς κεφαλή.



Εικόνα 4-13. Κοχλίες Allen M10x1.5 L=16 χωρίς κεφαλή.

8) Κοχλίες M6x1 L=30 εξαγωνικής κεφαλής και 9) Ροδέλες και περικόχλια M6x1.



Εικόνα 4-14. Κοχλίες M6x1 L=30 εξαγωνικής κεφαλής και Ροδέλες και περικόχλια M6x1.

10) Ελατήρια και βάσεις ελατηρίων.



Εικόνα 4-15. Ελατήρια διαφορετικής σταθεράς K και βάσεις συγκράτησης ελατηρίων.



Εικόνα 4-16. Ελατήριο προσαρμοσμένο στις βάσεις συγκράτησής του.

4.3 Συναρμολογημένη διάταξη και αξιοποίηση ελατηρίων

Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται η συναρμολογημένη διάταξη της βάσης. Η άκρη του grinder έχει προσδεθεί στην κωνική υποδοχή που κατασκευάστηκε και έχει ασφαλιστεί με τους κοχλίες M6 και τα αντίστοιχα περικόχλια.

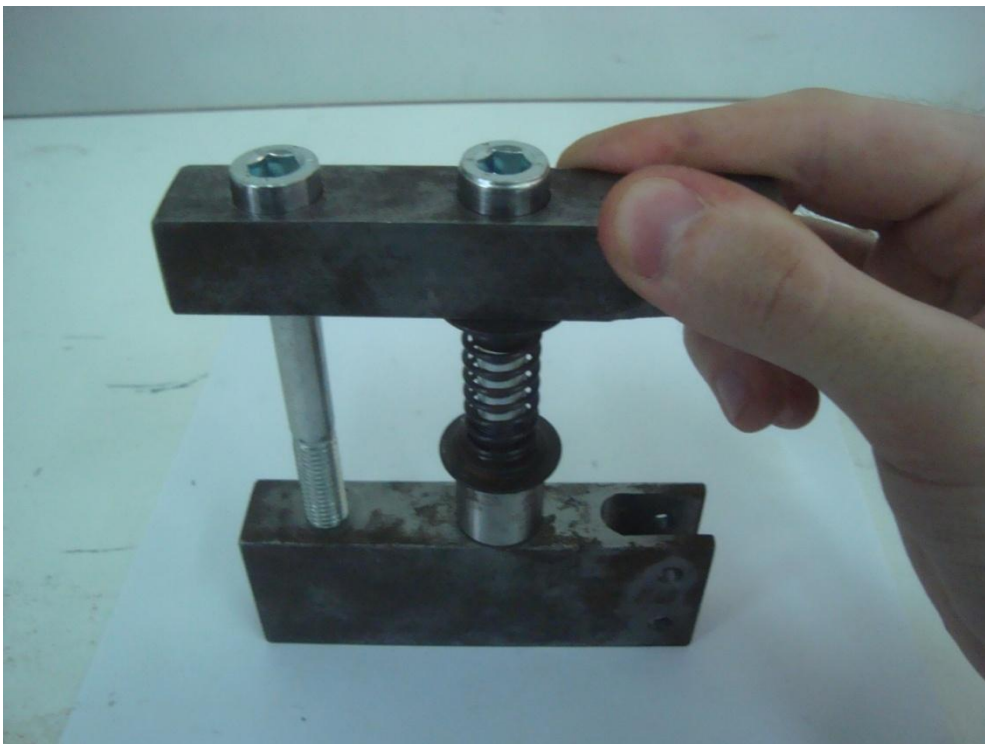


Εικόνα 4-17. Συναρμολογημένη διάταξη βάσης.

Ο αριστερός κοχλίας Allen δεν έχει αποστάτη ή ελατήριο και χρησιμοποιείται ως «οδηγός» κατά τη διάρκεια της κατακόρυφης κίνησης που σηματοδοτείται από τη συσπίρωση του ελατηρίου. Συγκεκριμένα, όταν αυξάνεται η κάθετη δύναμη που ασκείται στην επιφάνεια κατά τη διάρκεια της στίλβωσης, το ελατήριο συσπειρώνεται και η απόσταση ανάμεσα στον τάκο σύνδεσης και τη βάση στήριξης μειώνεται. Ταυτόχρονα, οι κεφαλές των κοχλιών Allen εξωθούνται προς τα πάνω. Στις δύο εικόνες που ακολουθούν φαίνεται ο τρόπος που η επιβολή μίας κάθετης δύναμης επηρεάζει τη γεωμετρία της διάταξης μέσω του ελατηρίου.



Εικόνα 4-18. Συναρμολογημένη διάταξη βάσης (έχει αποσυνδεθεί η άκρη του grinder) σε ελευθερία.



Εικόνα 4-19. Συναρμολογημένη διάταξη βάσης (έχει αποσυνδεθεί η άκρη του grinder) υπό την επιβολή κατακόρυφης δύναμης στον άξονα πρόσδεσης της άκρης του grinder.

Στην εικόνα 4-19 το ελατήριο έχει συσπειρωθεί και οι κεφαλές των κοχλιών Allen έχουν αποκαλυφθεί. Επιλέγοντας το κατάλληλο ελατήριο, με βάση τη σταθερά K που το χαρακτηρίζει, μπορούμε να υπολογίζουμε την ασκούμενη δύναμη μετρώντας τη μεταβολή του μήκους του ελατηρίου από το ελεύθερο μήκος του, δηλαδή το μήκος που έχει εκτός διάταξης, υπό την επιβολή μηδενικής δύναμης. Συνεπώς, χρησιμοποιώντας διαφορετικά ελατήρια, η διάταξη μας παρέχει τη δυνατότητα μελέτης πολλών διαφορετικών ευρών δύναμης.

Συγκεκριμένα, διαθέτουμε 4 ελατήρια διαφορετικής σταθεράς, όλα κατάλληλα για πρόσδεση στη διάταξή μας. Ο υπολογισμός των σταθερών K τους, καθώς και ο έλεγχος της γραμμικότητάς τους έγινε μέσω δοκιμής θλίψης στην πρέσα του Κτηρίου Κατεργασιών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ. Για τον προσδιορισμό του K (μονάδες δύναμης ανά μετατόπιση) χρησιμοποιήθηκε (αφού διαπιστώθηκε ότι τα ελατήρια είναι πράγματι γραμμικά) η σχέση

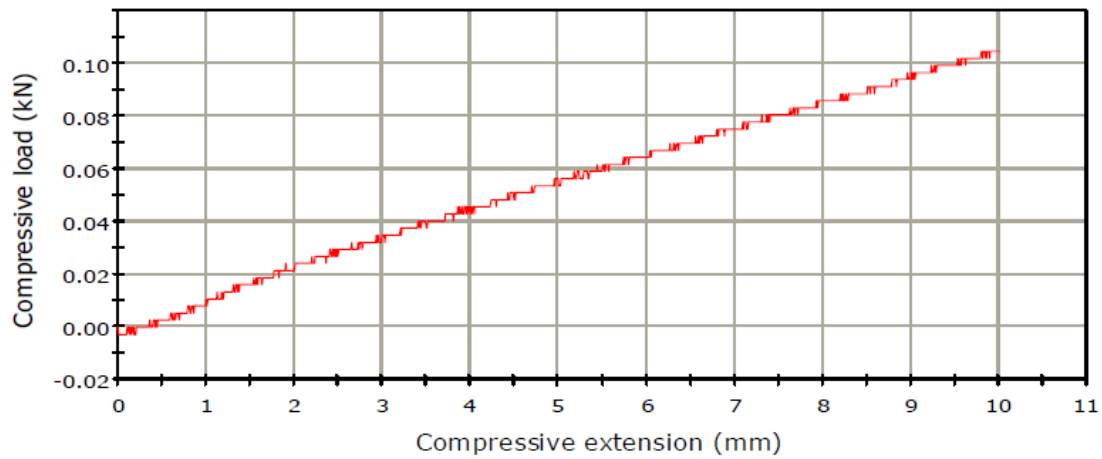
$$F = K \cdot \Delta x \quad (4-1)$$



Εικόνα 4-20. Ελατήρια διαφορετικής σταθεράς διαθέσιμα προς πρόσδεση στη διάταξη της βάσης.

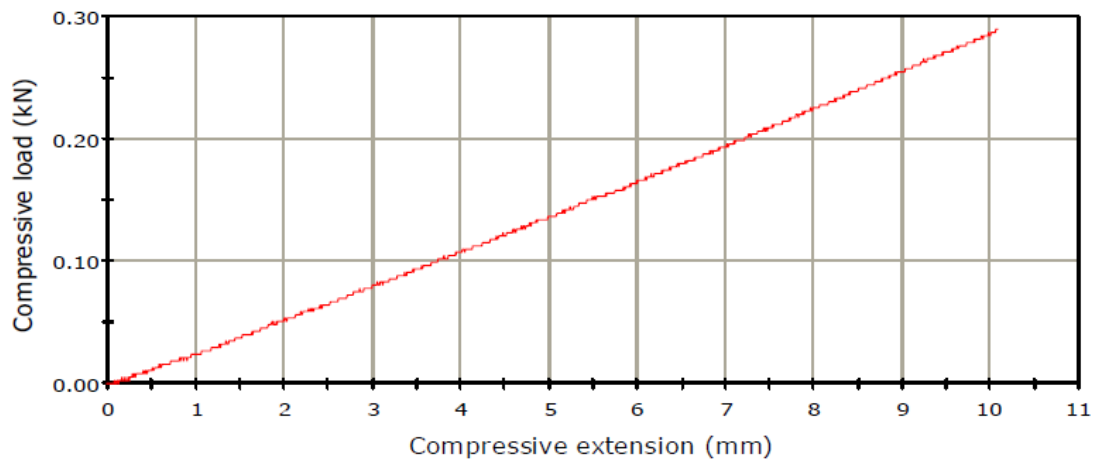
Στην εικόνα 4-20 φαίνονται τα 4 διαφορετικά ελατήρια που διαθέτουμε, αριθμημένα από αριστερά προς τα δεξιά από το 1 έως το 4. Η κλίση των ακόλουθων διαγραμμάτων δίνει τη σταθερά K όπως αυτή ορίστηκε στη σχέση 4-1.

LOAD - DEFLECTION GRAPH



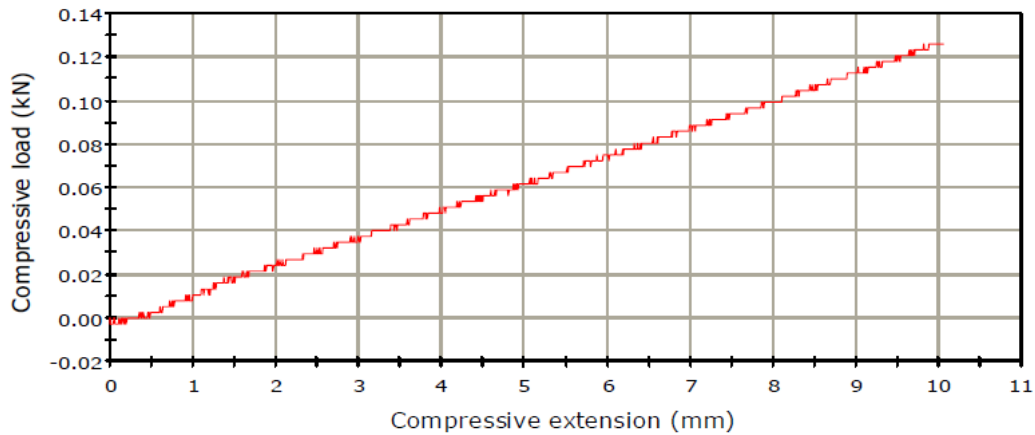
Σχήμα 4-1. Διάγραμμα φορτίου-μεταβολής μήκους του ελατηρίου 1.

LOAD - DEFLECTION GRAPH



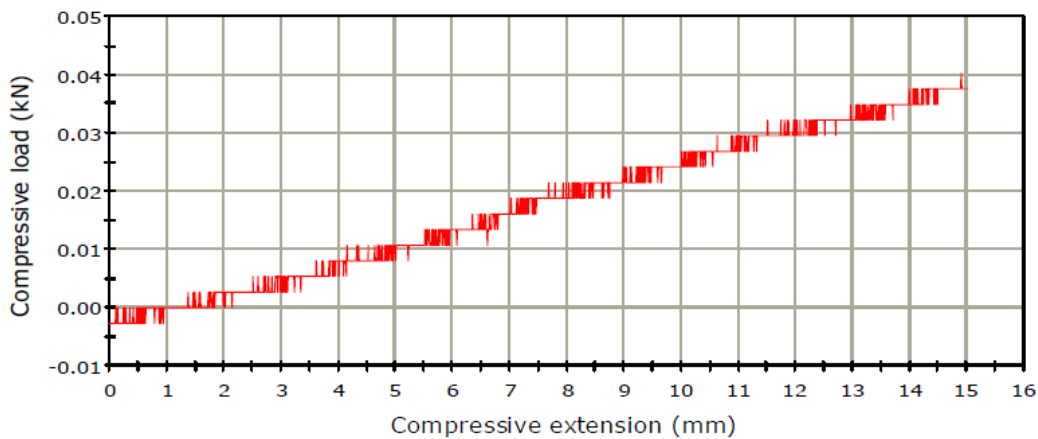
Σχήμα 4-2. Διάγραμμα φορτίου-μεταβολής μήκους του ελατηρίου 2.

LOAD - DEFLECTION GRAPH



Σχήμα 4-3. Διάγραμμα φορτίου-μεταβολής μήκους του ελατηρίου 3.

LOAD - DEFLECTION GRAPH



Σχήμα 4-4. Διάγραμμα φορτίου-μεταβολής μήκους του ελατηρίου 4.

Από τα σχήματα 4-1 έως 4-4 προκύπτουν οι τιμές $K_1 \cong 0.011 \text{ KN/mm}$, $K_2 \cong 0.027 \text{ KN/mm}$, $K_3 \cong 0.012 \text{ KN/mm}$ και $K_4 \cong 2.7 \cdot 10^{-3} \text{ KN/mm}$.

Πίνακας 4-1. Στοιχεία αριθμημένων ελατηρίων εικόνας 4-20.

α/α	Χαρακτηριστικό	D(mm)	L_o (mm)	κ (KN/mm)
1		25.2	61.4	0.011
2		27.8	44.4	0.027
3		18.3	36.6	0.012
4		16.2	44.6	$2.7 \cdot 10^{-3}$

4.4 Διαπιστωμένα μειονεκτήματα κατασκευασθείσας βάσης

Η βάση που περιγράφεται στις προηγούμενες υποενότητες του κεφαλαίου 4 της συγκεκριμένης εργασίας δοκιμάστηκε στο κέντρο κατεργασιών HAAS του εργαστηρίου κατεργασιών των υλικών του ΕΜΠ και έγιναν οι εξής παρατηρήσεις.

Η βάση είναι σχεδιασμένη με τρόπο που αφενός εξασφαλίζει ομοαξονικότητα μεταξύ του άξονα z του κέντρου κατεργασιών με τον άξονα περιστροφής του grinder, ωστόσο δεν είναι αξονοσυμμετρική, καθώς και οι δύο οδηγοί κοχλίες είναι τοποθετημένοι στην μία πλευρά του grinder (δεξιά του όπως φαίνεται στην εικόνα 4-17). Οι δύο κοχλίες έχουν κάποια κενά μεταξύ αυτών και των οπών εντός των οποίων διέρχονται, ενώ η έλλειψη αξονικής συμμετρίας δημιουργεί καμπτική ροπή στην κατασκευή (με κάθε εφαρμογή κάθετης δύναμης), η οποία λαμβάνει μεγαλύτερη τιμή στον εξωτερικό και μικρότερη στον εσωτερικό οδηγό-κοχλία. Η ροπή αυτή αναγκάζει σε επαφή την εσωτερική επιφάνεια των οπών με το υλικό των κοχλίων, αυξάνοντας την τριβή μεταξύ των τοιχωμάτων και δυσχεραίνοντας την ολίσθηση των κοχλίων εντός των οπών. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να απαιτείται πολύ μεγάλη δύναμη για τη συσπείρωση της κατασκευής μέσω της συσπείρωσης του ελατηρίου θλίψεως (πολύ μεγαλύτερη αυτής που απαιτείται απλά και μόνο για τη συσπείρωση του ελατηρίου).

Συνεπώς, αποφασίστηκε η συγκεκριμένη κατασκευή να χρησιμοποιηθεί με χρήση μεταλλικών αποστατών αντί για ελατήρια θλίψεως. Σε αυτήν την περίπτωση η κατασκευή είναι απόλυτα άκαμπτη. Ωστόσο, μία τέτοια ιδιότητα είναι απόλυτα επιθυμητή στην περίπτωση στίλβωσης με στίλβωτικούς δίσκους (σμιυριδόπανα-γυαλόχαρτα). Σε αυτή την κατεργασία ο δίσκος κάμπτεται κατάλληλα υπό την εφαρμογή ελεγχόμενης κατακόρυφης δύναμης για να γυαλίσει σημεία καμπής και περιοχές για τις οποίες οι στίλβωτικοί δακτύλιοι δεν ενδείκνυνται λόγω γεωμετρίας της επιφάνειας. Στην περίπτωση στίλβωσης με δίσκους, η εισαγωγή ενδοτικότητας εκ μέρους της βάσης είναι ανεπιθύμητη, καθώς εισάγει έναν επιπλέον βαθμό δυσκολίας στον υπολογισμό της συνισταμένης δύναμης που ασκείται στην επιφάνεια, ο υπολογισμός της οποίας είναι πολύ απλούστερος αν η μοναδική παραμόρφωση που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι αυτή του εργαλείου (στίλβωτικός δίσκος) συναρτήσει της προς στίλβωση επιφάνειας.

Επίσης, η χρήση χονδρόκοκκων γυαλιστικών πετρών συνοδεία πετρελαίου για λίπανση και ψύξη της επιφάνειας κατά την εκχόνδριση (αρχική φάση γυαλίσματος) είναι εφικτό να πραγματοποιηθεί με αυτή τη βάση και με χρήση

ελατηρίων, καθώς απαιτείται ικανοποιητική στιβαρότητα, όχι όμως απόλυτη ακαμψία του εργαλείου.

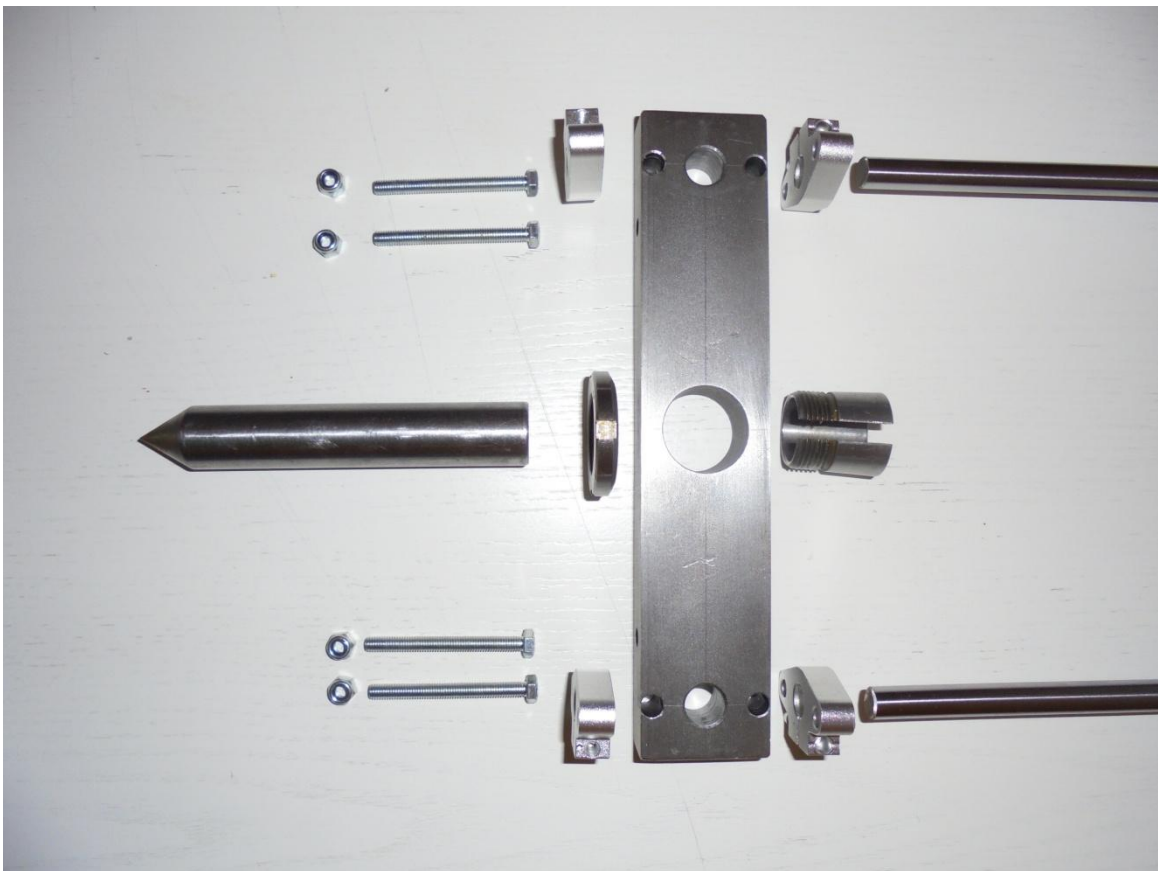
Για τα πειράματα που θέλουμε να πραγματοποιήσουμε για χρήση δακτυλίων στίλβωσης κρίθηκε απαραίτητη η κατασκευή μίας δεύτερης βάσης πρόσδεσης που θα προσδίδει αξονοσυμμετρία επιπλέον των ιδιοτήτων που μας προσφέρει η πρώτη βάση.

4.5 Εξαρτήματα νέας βάσης και τρόπος κατασκευής τους (σχήματα και φωτογραφίες)

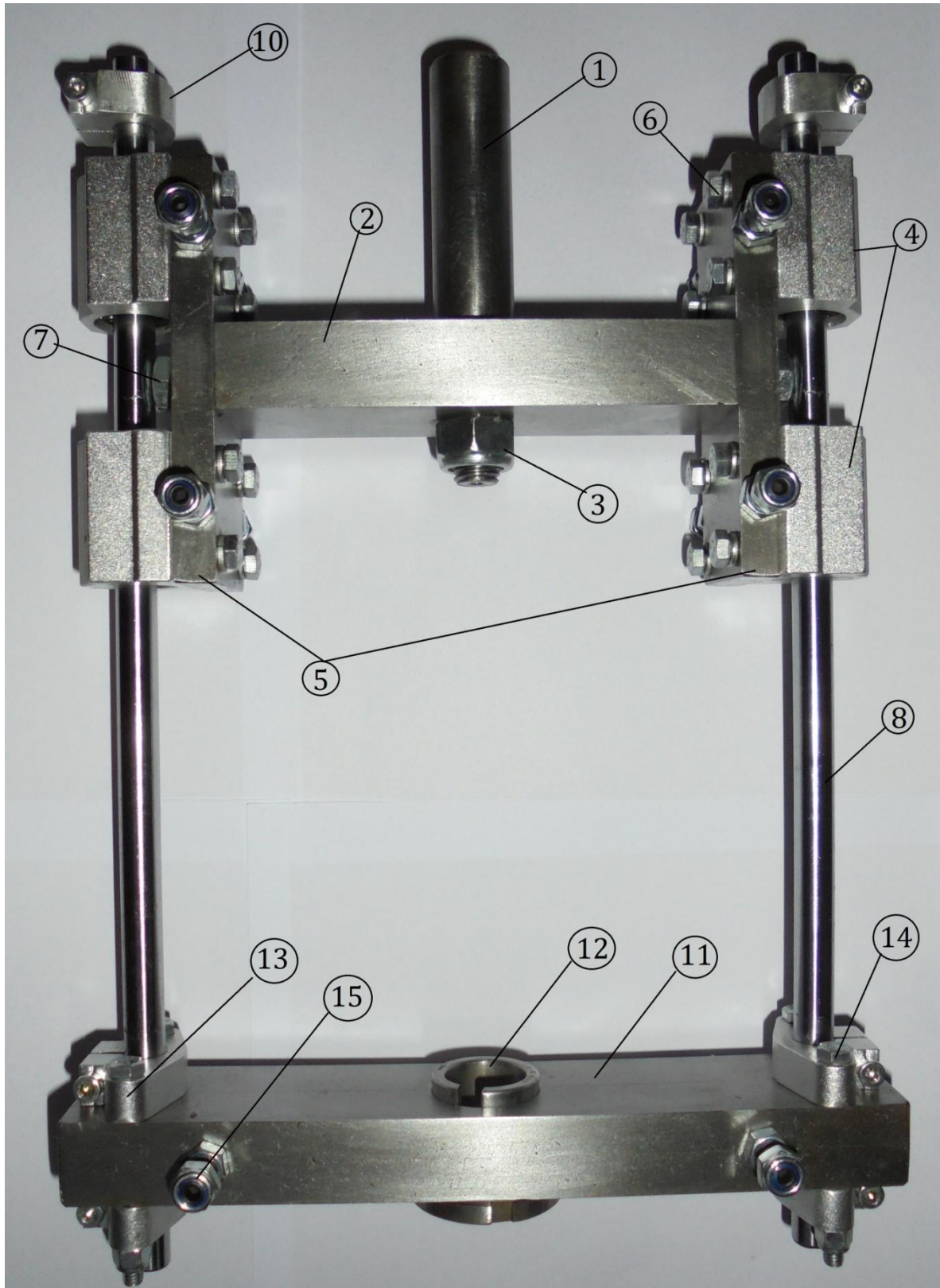
Η νέα βάση που κατασκευάστηκε αποτελείται από τα εξής επιμέρους τεμάχια:

1. Ένας πείρος σύνδεσης της βάσης με την κεφαλή συστελλόμενου σφιγκτήρα του κέντρου κατεργασιών,
2. Ένας τάκος σύνδεσης επί του οποίου βιδώνεται ο πείρος σύνδεσης (1),
3. Ένα αυτασφάλιστο παξιμάδι (περικόχλιο) M12 για την ασφάλιση του πείρου (1) επί του τάκου (2),
4. Τέσσερα γραμμικά ρουλεμάν (linear bearings) διαμέτρου 10 mm ασφαλισμένα εντός πλατφόρμας (Linear Bearing Platforms),
5. Δύο βάσεις πρόσδεσης των γραμμικών ρουλεμάν (4),
6. 16 κοχλίες M5 L15 με εξάγωνη κεφαλή και 16 ροδέλες γκρόβερ για τον καθένα, για την πρόσδεση των γραμμικών ρουλεμάν (4) επί των βάσεων πρόσδεσης (5),
7. Δύο κοχλίες M8 L25 με εξάγωνη κεφαλή και 2 ροδέλες γκρόβερ για τον καθένα, για την σύνδεση των βάσεων πρόσδεσης (5) εκατέρωθεν του τάκου σύνδεσης (2),
8. Δύο άξονες από ανοξείδωτο χάλυβα διαμέτρου 10 mm,
9. 4 κουφωτές ασφάλειες για την ασφάλιση των βάσεων πρόσδεσης (5) στη σωστή θέση ως προς τον τάκο σύνδεσης (2) για εξασφάλιση παραλληλίας των αξόνων (8),
10. Δύο Horizontal Axis Brackets SHF10 για την ασφάλιση του άνω μέρους των αξόνων (8),
11. Μία βάση στήριξης του grinder που κατασκευάστηκε με την απαραίτητη κωνικότητα για την ιδανική προσαρμογή και ασφάλιση του συστελλόμενου σφιγκτήρα (12) εντός της κατασκευασθείσας κοιλότητας,
12. Ένας συστελλόμενος σφιγκτήρας εσωτερικής διαμέτρου ~20 mm συνοδευόμενος από κατάλληλο παξιμάδι, για να συγκρατήσει την κυλινδρική άκρη του grinder,

13. 4 Horizontal Axis Brackets SHF10 για την ασφάλιση του κάτω μέρους των αξόνων (8) άνω και κάτω της βάσης στήριξης (10),
14. 4 κοχλίες M5 L50 με εξάγωνη κεφαλή και 4 αυτασφάλιστα περικόχλια M5, ένα για τον καθένα, για την συγκράτηση των Horizontal Axis Brackets (12) επί της βάσεως στήριξης (11),
15. 12 κοχλίες Allen M6 L25 χωρίς κεφαλή, με 12 περικόχλια και 12 αυτασφάλιστα περικόχλια, από ένα για τον κάθε κοχλία, για τη δημιουργία προεξοχών για την τοποθέτηση λάστιχων ή ελατηρίων έλξης.



Εικόνα 4-21. Δεύτερη συναρμολογημένη βάση. Εικονίζεται αποσυναρμολογημένο το κάτω μέρος της βάσης (βάση στήριξης) καθώς και ο κώνος κέντρωσης.



Εικόνα 4-22. Δεύτερη συναρμολογημένη βάση με αριθμημένα τα επιμέρους εξαρτήματα (το grinder δεν είναι συνδεδεμένο).

Ο πείρος σύνδεσης (1) κατασκευάστηκε από καλιμπρέ χαλύβδινη μπάρα σε τόρνο, όπου έγινε και το κατάλληλο σπείρωμα για επίτευξη ακρίβειας στην καθετότητά του ως προς τον τάκο σύνδεσης (2). Το εσωτερικό σπείρωμα στη μεσαία οπή του τάκου (1) έγινε επίσης στον τόρνο, δένοντας στην κουκουβάγια το κατάλληλο κολαούζο και στρέφοντας προσεκτικά το τσοκ με το χέρι. Οι οπές στις πλάγιες όψεις του τάκου (1) έγιναν στον τόρνο επίσης, και τα σπείρώματα σε αυτές με κολαούζο και μανέλα με το χέρι.

Οι οπές για την πρόσδεση των γραμμικών ρουλεμάν (4) στις βάσεις πρόσδεσης (5) έγιναν με το δράπανο και δεν έχουν σπείρώματα, ενώ οι οπές για τις προεξοχές ελαστικών στοιχείων έγιναν με το δράπανο και τα σπείρώματα χειροκίνητα με χρήση κολαούζων και μανέλας.

Στη βάση στήριξης (11), η κεντρική οπή έγινε στον τόρνο, με χρήση κατάλληλων τρυπανιών. Στη συνέχεια, μετρήθηκαν οι διαστάσεις του συστελλόμενου σφιγκτήρα (12) και υπολογίστηκε η κωνικότητά του (2.2°). Το μικρό εργαλειοφορείο στράφηκε κατά γωνία 2.2° και επιλέχθηκε εργαλείο κατάλληλο για να εισχωρήσει στη διανοιχθείσα οπή. Ακολούθησε κατεργασία μέχρι να επιτευχθεί η επιθυμητή διαμόρφωση που να επιτρέπει συναρμογή με το συστελλόμενο σφιγκτήρα (12) και το περικόχλιο που τον συνοδεύει. Όλες οι υπόλοιπες οπές της βάσης (11) έγιναν στο δράπανο και τα σπείρώματα χειροκίνητα με χρήση κολαούζων και μανέλας.

Η συναρμολόγηση της βάσης έγινε με τον ακόλουθο τρόπο. Αρχικά συνδέθηκε ο πείρος (1) με τον τάκο (2) και ασφαλίστηκε με το αυτασφάλιστο περικόχλιο (3). Κατόπιν, προσαρμόζονται οι βάσεις πρόσδεσης (5) επί του τάκου (2) με τη χρήση των κοχλιών και γκρόβερ (7). Δεν σφίγγουμε μέχρι τέλους τους κοχλίες, ώστε οι βάσεις (5) να μπορούν να περιστρέφονται με επιβολή μεσαίας δύναμης περί των κοχλιών (7). Στη συνέχεια, με τη χρήση των κοχλιών-γκρόβερ (6), δένουμε τα γραμμικά ρουλεμάν (4) επί των βάσεων πρόσδεσης (5). Οι οπές επί των βάσεων (5) δια των οποίων διέρχονται οι κοχλίες (6) είναι μεγαλύτερες από την ονομαστική διάμετρο των κοχλιών (περαστοί κοχλίες), και επιτρέπουν ελάχιστη κίνηση των ρουλεμάν, ώστε να εξασφαλιστεί η βέλτιστη κύλιση των αξόνων (8) εντός αυτών. Όταν περάσουμε εντός των ρουλεμάν τους άξονες και εντοπισθεί το βέλτιστο σημείο ως προς την κύλιση, σφίγγουμε καλά τους κοχλίες (6). Κατόπιν, δένουμε τα Horizontal Axis Brackets SHF10 (10) για ασφάλιση των αξόνων και ορισμό του κατώτατου σημείου στο οποίο μπορεί να φτάσουν αυτοί. Συνεχίζουμε περνώντας τα Horizontal Axis Brackets SHF10 (13) και τη βάση στήριξης (11). Σφίγγουμε καλά το κάτω δεξιά (ή κάτω αριστερά) Horizontal Axis Bracket SHF10 (13). Περνάμε τους κοχλίες με τα αυτασφάλιστα περικόχλια (14) και τα σφίγγουμε ελαφρά. Παρατηρούμε ότι η βάση στήριξης (11) έχει «κενά», μπορεί δηλαδή να κινηθεί ελάχιστα στους

άξονες x και y . Κατόπιν, δένουμε στην κωνική οπή της βάσης στήριξης (11) με χρήση του συσπασμένου σφιγκτήρα (12) έναν κύλινδρο με κωνικό κάτω άκρο (θα αναφέρεται στο εξής ως «κώνος κέντρωσης», βλέπε εικόνα 4-21). Πρέπει να ακολουθήσει διαδικασία καλιμπράρισματος για να επιτευχθεί τέλειο κεντράρισμα της βάσης.

Αρχικά, έπρεπε να γίνει καλιμπράρισμα των βάσεων πρόσδεσης (5). Δέσαμε τον κώνο κέντρωσης με την κωνική απόληξη προς τα πάνω και πραγματοποιήθηκε κύλιση των αξόνων (8) εντός των γραμμικών ρουλεμάν μέχρι αυτός να εισχωρήσει στην οπή που είχε γίνει με κεντροτρύπανο κατά την κατεργασία, στο κάτω μέρος του πείρου (1). Σε εκείνη τη θέση σφίξαμε τους κοχλίες (7) όσο το δυνατό πιο σφιχτά.

Κατόπιν, στο κέντρο κατεργασιών HAAS σε τέλεια επίπεδη επιφάνεια δοκιμίου κάνουμε μία οπή με κεντροτρύπανο. Χωρίς να μετακινήσουμε το τραπέζι κατά x και y , αλλάζουμε εργαλείο στη μηχανή και συνδέουμε την κατασκευασθείσα βάση, με προσδεμένο τον κώνο κέντρωσης πάνω σε αυτή. Κατεβάζουμε με τη λειτουργία hand jog την κεφαλή κατά z μέχρι να εισχωρήσει ο κώνος κέντρωσης στην οπή που δημιουργήσαμε με το κεντροτρύπανο. Σφίγγουμε τους κοχλίες (14) που δεν είχαμε σφίξει καλά και εξακριβώνουμε την ποιότητα του κεντραρίσματος σε ένα διαφορετικό ύψος z .

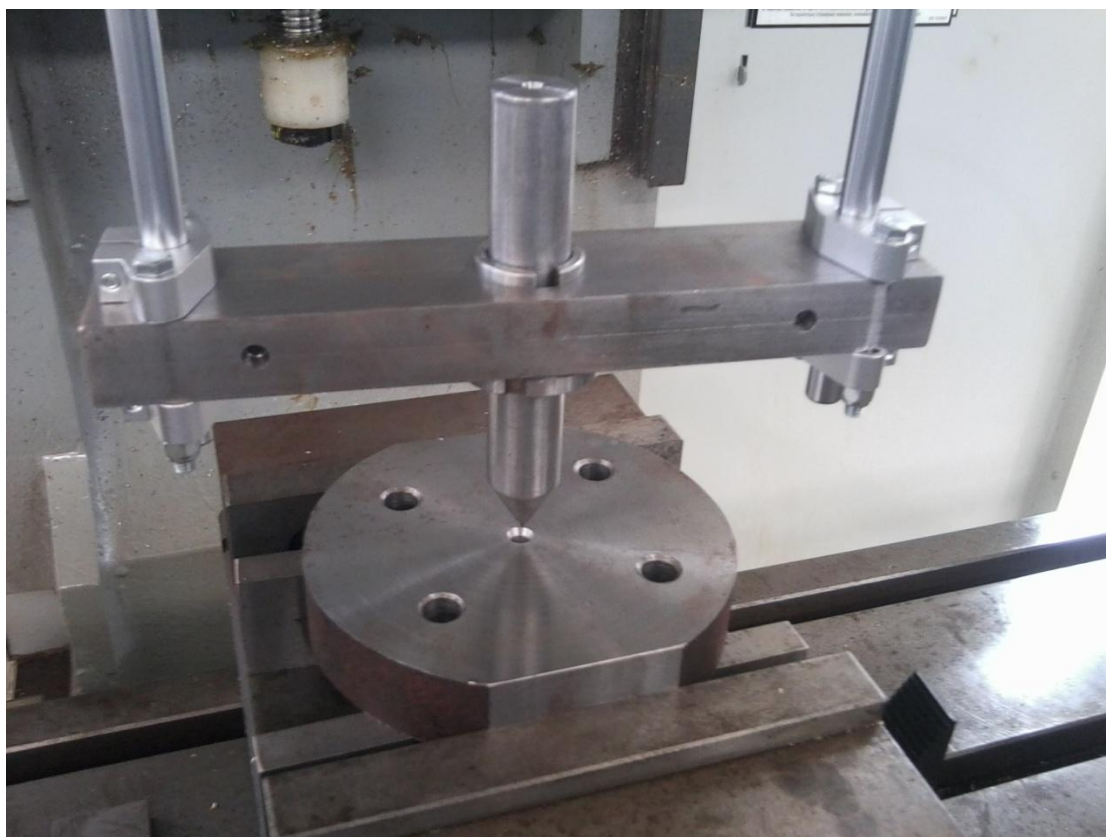


Εικόνα 4-23. Καλιμπράρισμα δεύτερης βάσης με χρήση πείρου κέντρωσης.

Έχοντας σφίξει όλους τους κοχλίες στην επιθυμητή θέση, με χρήση δράπανου χειρός κάναμε 2 οπές εκατέρωθεν των κοχλιών (7) στις βάσεις πρόσδεσης (5), αρκετά βαθιές ώστε να εισχωρούν στον τάκο (2). Σε αυτές με ένα σφυρί εισάγαμε κουφωτές ασφάλειες για να διασφαλίσουμε ότι οι βάσεις πρόσδεσης (5) δεν θα περιστραφούν καθόλου περί των κοχλιών (7) και η κέντρωση θα παραμείνει ιδανική.

Τέλος, η συναρμολόγηση ολοκληρώνεται με αφαίρεση του κώνου κέντρωσης και πρόσδεση της άκρης του grinder με χρήση του συστελλόμενου σφιγκτήρα (12) στην κωνική οπή της βάσης στήριξης (11). Συνδέουμε επίσης τους κοχλίες-περικόχλια και αυτασφάλιστα περικόχλια (15) πάνω στη βάση στήριξης (11) και τις βάσεις πρόσδεσης (5) και τοποθετούμε κατάλληλα λαστιχάκια/ελατήρια έλξης με άκρα αυτές τις προεξοχές.

Με χρήση της ηλεκτρονικής ζυγαριάς μπορούμε να φτιάξουμε το διάγραμμα μετατόπισης-κάθετης δύναμης που ασκείται πάνω στην προς στίλβωση επιφάνεια. Στη συνέχεια, είναι εφικτό να γνωρίζουμε πόση κάθετη δύναμη ασκείται στην επιφάνεια ανάλογα με το πόσες μονάδες μήκους κατά τον άξονα z μετακινούμε το εργαλείο του κέντρου κατεργασιών HAAS.



Εικόνα 4-24. Κοντινή λήψη εισαγωγής πείρου κέντρωσης σε οπή που έγινε από κεντροτρύπανο για καλιμπράρισμα της 2^{ης} βάσης.

5 Προκαταρκτικά στοιχεία πειραμάτων και θεωρητικά στοιχεία μοντέλων στίλβωσης

5.1 Προσδιορισμός τύπου χάλυβα δοκιμίου πειραμάτων

Το ακριβές υλικό που χρησιμοποιήθηκε για τα πειράματά μας δεν ήταν γνωστό και για αυτό το λόγο έπρεπε να προσδιοριστούν τα στοιχεία του, ώστε να καταστεί εφικτό να επιλεγούν οι κατάλληλες προώσεις και στροφές που θα χρησιμοποιούνταν για τη δημιουργία της αρχικής τραχύτητας επί της επιφάνειας του δοκιμίου (αναλύεται στην παράγραφο 5.2).

Η μέθοδος που ακολουθήθηκε για τον προσδιορισμό της σκληρότητας του υλικού του δοκιμίου ήταν η σκληρομέτρηση κατά Vickers. Κατά τη σκληρομέτρηση κατά Vickers ένα εργαλείο σχήματος τετραεδρικής πυραμίδας διεισδύει στο τεμάχιο υπό συγκεκριμένη δύναμη, και αφήνει ένα τετραγωνικό αποτύπωμα. Μετρώντας τα μήκη των διαγωνίων αυτού του τετραγώνου είναι δυνατό να υπολογίσουμε τη σκληρότητα Vickers, ως εξής. Έστω d_1 και d_2 τα μήκη των δύο διαγωνίων του αποτυπώματος. Υπολογίζουμε τον μέσο όρο τους και τον ονομάζουμε d . Αν F η δύναμη υπό την οποία το εργαλείο διεισδύει στο δοκίμιο, τότε η σκληρότητα Vickers υπολογίζεται από τη σχέση

$$HV \left(\frac{Kp}{mm^2} \right) = \frac{1.8544 \cdot F}{d^2} \quad (5-1)$$

Μετρήθηκαν $d_1 = 0.33$, $d_2 = 0.34$, άρα $d = (d_1 + d_2)/2 = 0.335$, ενώ η ασκούμενη

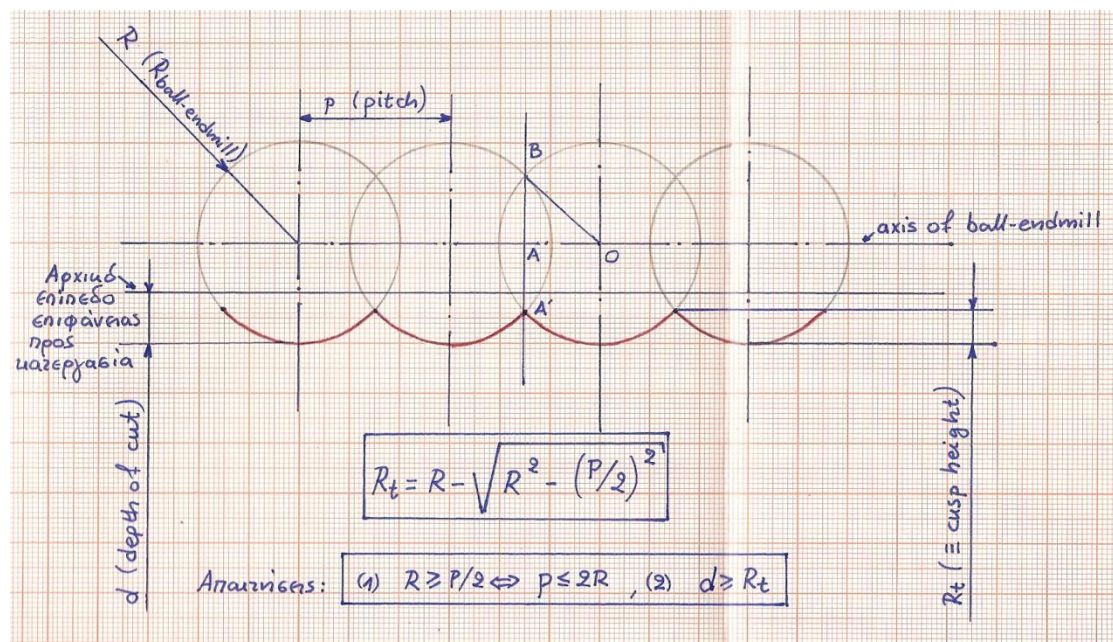
δύναμη ήταν $F = 10 \text{ Kp}$. Προκύπτει $HV \left(\frac{Kp}{mm^2} \right) = 165.24$. Βάσει προσεγγιστικής σχέσης, ισχύει ότι $(\text{tensile strength}) = HV/0.33 \cong 500 \text{ MPa}$.

5.2 Μέθοδος δημιουργίας αρχικής τραχύτητας

Θεωρείται δεδομένο ότι για να γίνουν πειράματα με την απαιτούμενη αξιοπιστία πρέπει να είναι εφικτό να δημιουργηθούν επιφάνειες προς στίλβωση με συγκεκριμένη αρχική τραχύτητα, καθώς και με μία δεδομένη μορφή. Με αυτόν τον τρόπο η αρχική τραχύτητα θα είναι ένας ελεγχόμενος παράγοντας στα πειράματα, καθώς θα μπορούμε να επιλέξουμε το επίπεδό της και να ακολουθήσουμε μία συγκεκριμένη τυποποιημένη μεθοδολογία για τη δημιουργία της επί του πειραματικού δοκιμίου.

Η μέθοδος δημιουργίας αρχικής τραχύτητας που ακολουθήθηκε βασίζεται στη δημιουργία αυλακώσεων με σταθερό βήμα μεταξύ τους με κονδύλι με σφαιρικό άκρο συγκεκριμένης ακτίνας. Η peak-to-valley τραχύτητα θα ισούται με το cusp height που θα προκύψει μετά την κατεργασία και θα είναι συνάρτηση του βήματος (pitch) και της ακτίνας του χρησιμοποιούμενου ball-end mill, με δεδομένο ότι ισχύουν συγκεκριμένοι περιορισμοί που θα διατυπωθούν παρακάτω.

Στο σχήμα που ακολουθεί (σχήμα 5-1) φαίνεται το προφίλ της αρχικής και της δημιουργούμενης επιφάνειας με 4 διαδοχικά πάσα βήματος p με ball-end mill ακτίνας R .



Σχήμα 5-1. Σχηματική απεικόνιση δημιουργίας αρχικής τραχύτητας με διαδοχικά πάσα κοπτικού σφαιρικής γεωμετρίας.

Από το σχήμα και το ορθογώνιο τρίγωνο OAB (μέσω Πυθαγόρειου Θεωρήματος), είναι προφανές ότι η R_t ισούται με

$$R_t = (\text{cusp height}) = R - (AB) = R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{p}{2}\right)^2} \quad (5-2)$$

Με περιορισμούς που πρέπει να ισχύουν τους εξής. Το βάθος κοπής d πρέπει να είναι μεγαλύτερο από την υπολογισθείσα τραχύτητα, ώστε να έχουμε ακμές μεταξύ των αυλακώσεων και όχι επίπεδες περιοχές στα σημεία μέγιστου ύψους («όρη»). Επίσης, αναγκαίο είναι το βήμα p να είναι μικρότερο από τη διάμετρο του ball-end mill, καθώς σε αντίθετη περίπτωση οι κύκλοι δεν τέμνονται, αλλά είτε εφάπτονται, είτε δεν έχουν κοινά σημεία, συνεπώς πάλι θα δημιουργούνται επίπεδες περιοχές αντί για ακμές. Οι δύο αυτοί περιορισμοί εκφράζονται στις ακόλουθες σχέσεις.

$$d \geq R_t \quad (5-3)$$

$$R \geq \frac{p}{2} \Leftrightarrow p \leq 2R = D \quad (5-4)$$

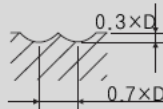
Για τη δημιουργία της αρχικής επιφάνειας κάνουμε ένα αρχικό πέρασμα με φρεζοκεφαλή, για να δημιουργηθεί τέλεια επίπεδη επιφάνεια. Στη συνέχεια επιλέγουμε κονδύλι με σφαιρικό άκρο με δύο φτερά (flutes), από τον παρακάτω πίνακα.



Εικόνα 5-1. Two flute Ball-end mill.

Πίνακας 5-1. Προώσεις και ταχύτητες περιστροφής για κατεργασία με ball-endmill ανάλογα με το κατεργαζόμενο υλικό.

MATERIAL	CARBON STEELS ALLOY STEELS TOOL STEELS		CARBON STEELS ALLOY STEELS TOOL STEELS		CARBON STEELS ALLOY STEELS TOOL STEELS		CARBON STEELS ALLOY STEELS TOOL STEELS		ALUMINUM ALUMINUM ALLOYS	
	HARDNESS	STRENGTH	~ HRc20		HRc20 ~ HRc30		HRc30 ~ HRc40			
DIAMETER	RPM	FEED	RPM	FEED	RPM	FEED	RPM	FEED	RPM	FEED
R 1.5 × 3.0	4500	95	3400	70	2000	30	1400	20	11000	230
R 2.0 × 4.0	3200	115	2400	80	1400	35	1000	25	8000	260
R 3.0 × 6.0	2200	135	1700	90	1000	45	700	25	5600	280
R 4.0 × 8.0	1600	160	1200	105	700	50	500	30	4000	350
R 5.0 × 10.0	1300	180	1000	120	560	60	400	35	3200	360
R 6.0 × 12.0	1000	170	800	105	450	55	320	35	2500	340
R 8.0 × 16.0	800	150	600	100	350	55	250	35	2000	300
R 10.0 × 20.0	600	140	500	85	300	50	200	35	1600	280
R 12.5 × 25.0	500	130	400	70	220	40	160	30	1300	250



※ The FEED, in long & extra long types, should be reduced by around 50%

RPM=REVOLUTION PER MIN.
FEED=mm/min.

Το τεμάχιο που χρησιμοποιούμε είναι χαλύβδινο με αντοχή σε εφελκυσμό-θλίψη περίπου ίσο με $500 \text{ MPa} = 500 \text{ N/mm}^2$, όπως εκτιμήθηκε στην παράγραφο 5.1 μέσω της διαδικασίας που ακολουθήθηκε. Συνεπώς, για την επιλογή προώσεων (feed) και στροφών (RPM) θα χρησιμοποιηθεί η πρώτη στήλη του πίνακα 5-1. Ωστόσο, όπως βλέπουμε από το σχήμα στο κάτω μέρος του πίνακα του κατασκευαστή του κονδυλιού, εάν το βήμα ληφθεί επίπεδες ίσο με $0.7 \cdot D$, τότε το cusp height θα ισούται με $0.3 \cdot D$.

Έστω ότι θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε ball-end mill με διάμετρο D mm με βήμα μεταξύ των αυλακώσεων ίσο με p mm. Για να εκτιμήσουμε σύμφωνα με την αναλογία που δίνει ο κατασκευαστής την τραχύτητα που θα προκύψει εργαζόμεστε ως εξής. Εάν παίρναμε βήμα ίσο με $p_o = 0.7 \cdot D$, με επαρκές βάθος κοπής βέβαια, σύμφωνα με τον περιορισμό (5-3), θα προέκυπτε cusp height ίσο με $R_{t_{o_{manuf.}}} = 0.3 \cdot D$. Αν στη σχέση (5-2) θέσουμε D ως διάμετρο και p_o ως βήμα, θα προκύψει cusp height ίσο με

$$R_{t_{o_{theor.}}} = \left(\frac{D}{2}\right) - \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{p_o}{2}\right)^2} = \left(\frac{D}{2}\right) - \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{0.7 \cdot D}{2}\right)^2} \quad (5-5)$$

Και διαιρώντας κατά μέλη με τη σχέση του $R_{t_{o_{manuf.}}}$, προκύπτει η αναλογία

$$\frac{R_{t_{o_{theor.}}}}{R_{t_{o_{manuf.}}}} \cong 0.476 \quad (5-6)$$

Κατόπιν, υπολογίζουμε το $R_{t_{theor.}} = \left(\frac{D}{2}\right) - \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{p}{2}\right)^2}$, και διαιρούμε με την τιμή 0.476 για να υπολογίσουμε την τραχύτητα που εκτιμά ο κατασκευαστής ότι θα έχει δημιουργηθεί. Δηλαδή γίνεται παραδοχή ότι ισχύει η σχέση

$$\frac{R_{t_{theor.}}}{R_{t_{manuf.}}} = \frac{R_{t_{o_{theor.}}}}{R_{t_{o_{manuf.}}}} \quad (5-7)$$

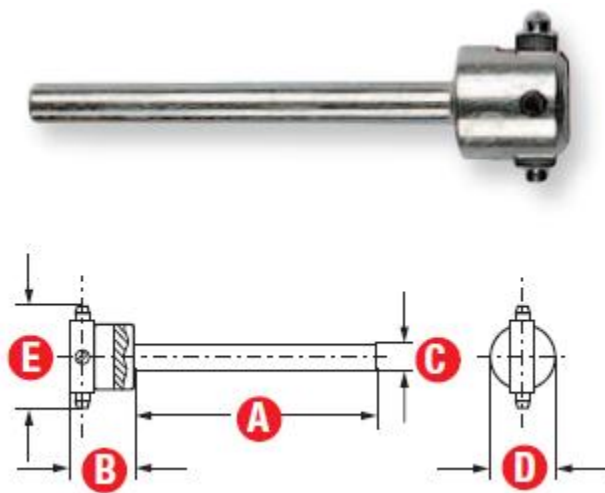
Αυτή η διαδικασία ακολουθείται, καθώς η επιφάνεια που δημιουργεί το κονδύλι δεν είναι ιδανική σύμφωνα με το γεωμετρικό μοντέλο, αλλά υπάρχει πολλές άλλες παράμετροι που επηρεάζουν, και τις οποίες έχει λάβει υπόψη ο κατασκευαστής. Δημιουργήθηκε αρχείο Excel που εκτελεί αυτή τη διαδικασία και φτιάχνει το main part του G-code που δημιουργεί την εκάστοτε αυλάκωση. Το αρχείο έχει ονομασία «Peak to valley roughness calculation» και είναι πολύ χρήσιμο καθώς ελαχιστοποιεί τον απαιτούμενο χρόνο γραψίματος κώδικα για διαφορετικό συνδυασμό ακτίνας κοπτικού εργαλείου και βήματος μεταξύ των αυλακώσεων.

Ας σημειωθεί ότι μετά την χρήση του G-code η τραχύτητα peak-to-valley της επιφάνειας που δημιουργήθηκε μετρήθηκε με τρεις διαφορετικούς τρόπους, με μετρητικό ρολόι (προσεγγιστικά), με μικροσκόπιο και με τραχύμετρο (μετρήσεις ακριβείας) και τα αποτελέσματα ήταν εξαιρετικά κοντά μεταξύ τους, απείχαν ωστόσο κατά ένα μικρό ποσό σε σχέση με την εκτίμηση του κατασκευαστή για το παραγόμενο cusp height, προφανώς λόγω σφάλματος που εισάγει η μηχανή (κέντρο κατεργασιών HAAS) στην οποία πραγματοποιήθηκε η κατεργασία. Σε επόμενες μελέτες μπορεί να γίνει κάποια μοντελοποίηση της ταλαντωτικής συμπεριφοράς της εν λόγω μηχανής, ώστε τα αποτελέσματα να είναι απόλυτα ελεγχόμενα και να επιτυγχάνεται ελαχιστοποίηση της απόκλισης από την εκτίμηση του κατασκευαστή.

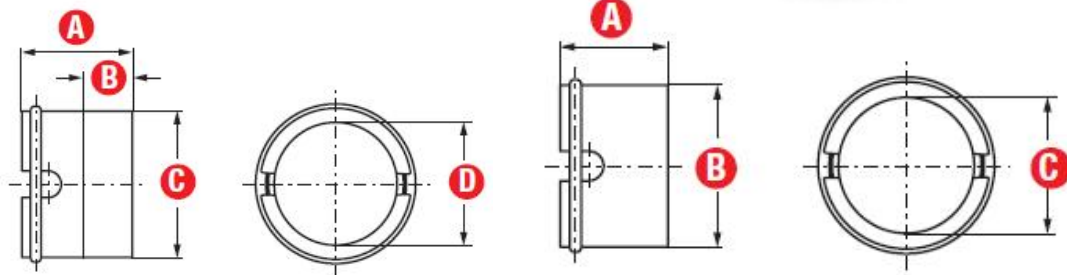
5.3 Υπολογισμός γεωμετρικών περιορισμών δακτυλίου στίλβωσης

Η μέθοδος στίλβωσης με χρήση στίλβωτικού δακτυλίου είναι εφικτή σε περίπτωση επίπεδων επιφανειών, οριζόντιων ή κεκλιμένων και κυρτών ή κοίλων επιφανειών που μπορούν να προσεγγιστούν ικανοποιητικά μέσω τμημάτων σφαίρας. Ένας από τους βασικούς σκοπούς της συγκεκριμένης μελέτης είναι να καθορίσουμε περιορισμούς και παραμέτρους για τη βέλτιστη αξιοποίηση του στίλβωτικού δακτυλίου ως εργαλείο στίλβωσης μέσω της χρήσης της βάσης που περιγράφηκε στην ενότητα 4 και της πρόσδεσής της στο κέντρο κατεργασιών τριών αξόνων HAAS.

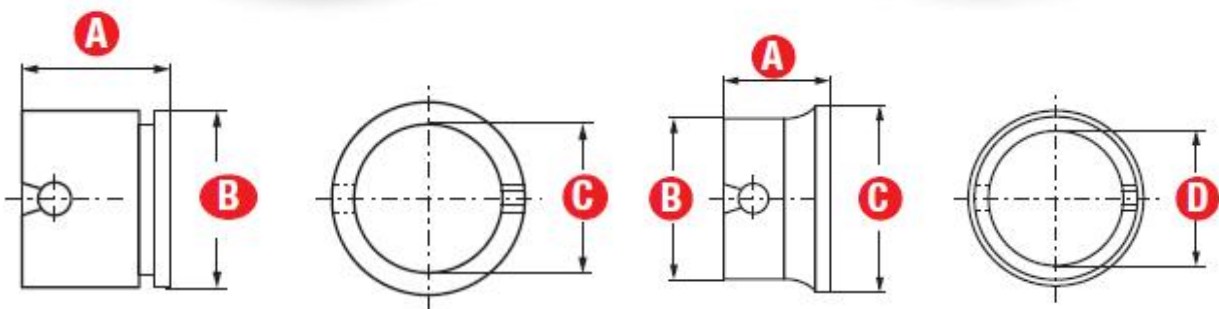
Γνωρίζοντας ότι η μηχανή που θα χρησιμοποιηθεί διαθέτει τρεις βαθμούς ελευθερίας (μετατοπίσεις κατά x, y και z), συν την περιστροφή κατά z φυσικά, είναι ευκόλως αντιληπτό ότι σε περίπτωση κεκλιμένης επιφάνειας ο δακτύλιος θα παρουσιάσει στροφή ως προς τους άξονες x και y . Πρέπει συνεπώς να προσδιοριστεί με ακρίβεια η μέγιστη επιτρεπόμενη γωνία στροφής, καθώς αν υπερβούμε κάποιο όριο ο δακτύλιος δεν θα μπορέσει να περιστραφεί περαιτέρω λόγω γεωμετρικών περιορισμών που εισάγονται εξαιτίας της κατασκευής του, πράγμα που θα οδηγήσει σε θραύση του εργαλείου και πιθανώς σε καταστροφή της αποκτηθείσας επιφάνειας. Ο υπολογισμός αυτής της γωνίας προϋποθέτει τον ακριβή σχεδιασμό των εργαλείων στίλβωσης, τα οποία απεικονίζεται στα επόμενα σχήματα.



Σχήμα 5-2. Άτρακτος πρόσδεσης δακτυλίου στίλβωσης (mandrel for ring-finish system).



Σχήμα 5-3 (Αριστερά). Εικόνα και σχέδιο Diamond polishing ring.
(Δεξιά). Εικόνα και σχέδιο Brass polishing ring.



Σχήμα 5-4 (Αριστερά). Εικόνα και σχέδιο Plastic polishing ring.
(Δεξιά). Εικόνα και σχέδιο Cloth disk ring.

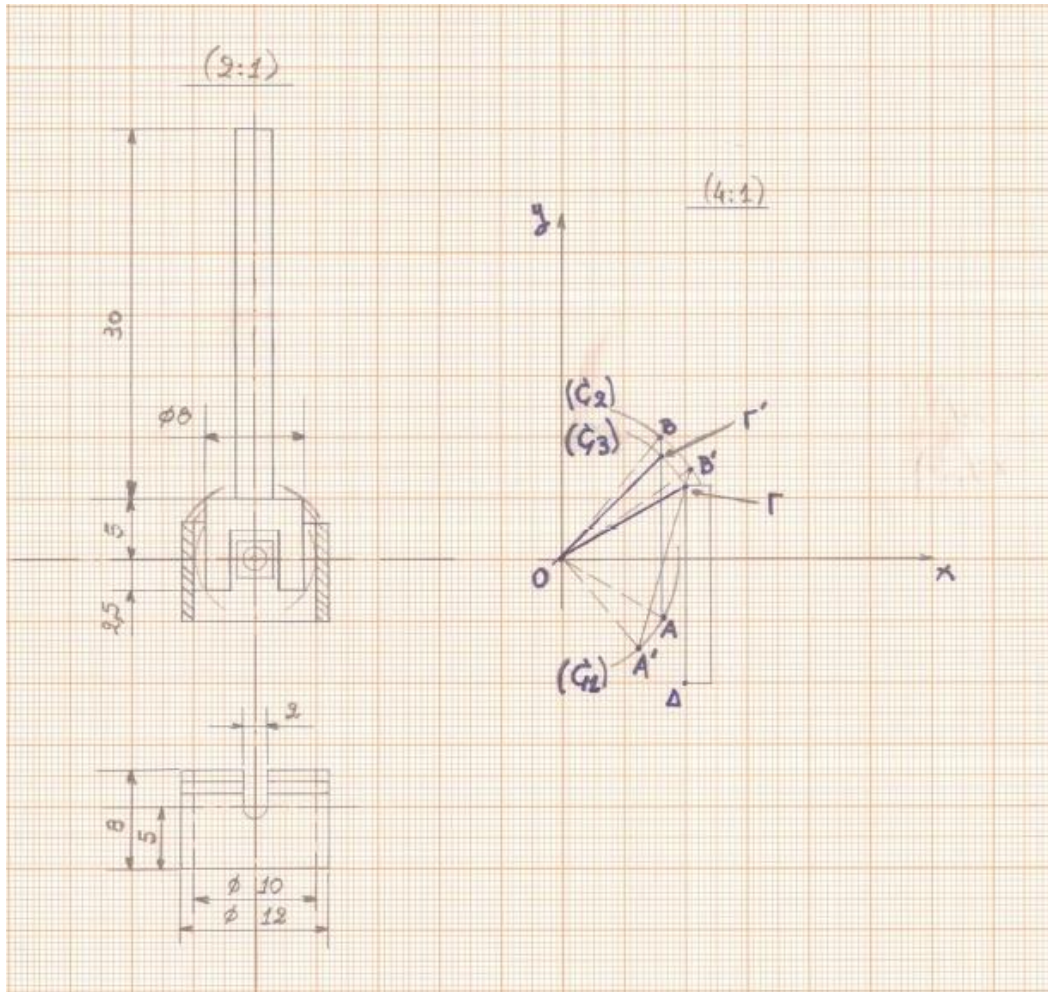
Πίνακας 5-2. Γεωμετρικά μεγέθη στιλβωτικών δακτυλίων σχημάτων 5-2 έως 5-4.

Όνομα	Novapax Model	A(mm)	B(mm)	C(mm)	D(mm)	E(mm)
Mandrel	630201	30	7.5	3	8	12
Diamond ring	630212	8.8	3.5	12	10	-
Brass ring	630213/01	8	12	10	-	-
Plastic ring	630214/01	8	13	10	-	-
Cloth disk ring	630215/01	8	13	14	10	-

Στο σχήμα 5-5 φαίνεται η συναρμογή μεταξύ Mandrel (σχήμα 5-2) και Brass polishing ring (σχήμα 5-3 δεξιά). Ακολουθεί γεωμετρική επίλυση του προβλήματος εύρεσης της μέγιστης δυνατής γωνίας στρέψης. Ας σημειωθεί ότι, επειδή η συγκεκριμένη διάταξη έχει τον z ως άξονα συμμετρίας, η μέγιστη γωνία στροφής κατά x ισούται με τη μέγιστη γωνία στροφής κατά y, και θα ονομάζεται από εδώ και στο εξής θ_{max} .

Αρχικά, το σημείο τομής των δύο αξονικών γραμμών ορίζει το σημείο γύρω από το οποίο περιστρέφεται ο δακτύλιος ως προς έναν από τους άξονες x και y, έστω τον y. Συνεπώς εικονίζεται το επίπεδο xz. Ωστόσο στην ανάλυση που θα ακολουθήσει θα θεωρηθεί ότι ο δακτύλιος μένει ακίνητος και η άτρακτος περιστρέφεται περί του συγκεκριμένου σημείου, έστω O. Τα δύο προβλήματα είναι ισοδύναμα.

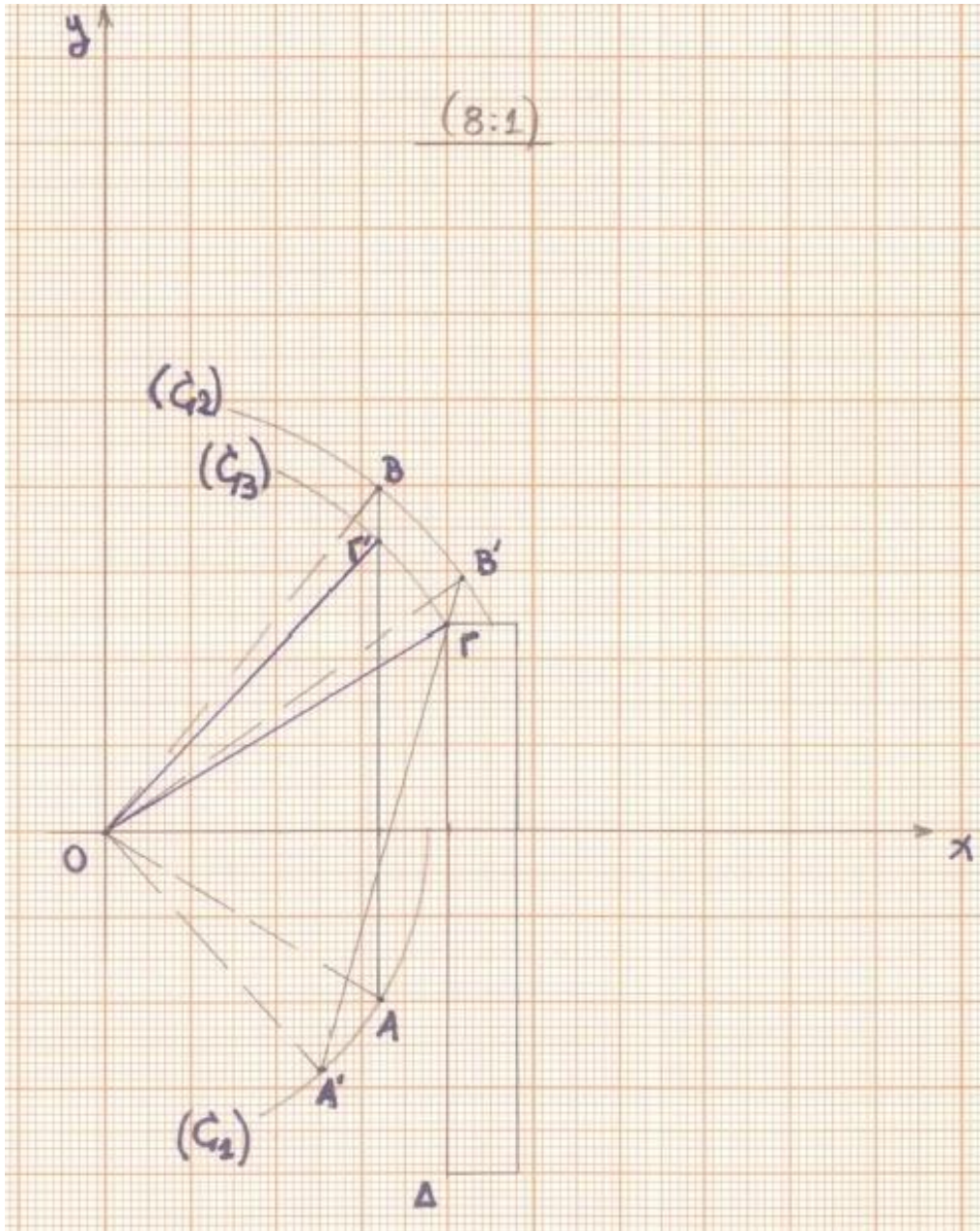
Σε σύστημα αξόνων Oxyz σχεδιάζουμε 2 ευθύγραμμο τμήματα, το AB και το ΓΔ. Το AB συμβολίζει το δεξί «όριο» της ατράκτου, ενώ το ΓΔ συμβολίζει το δεξί εσωτερικό «όριο» του μπρούντζινου στιλβωτικού δακτυλίου. Το ευθύγραμμο τμήμα ΓΔ είναι ακλόνητο και αποτελεί το γεωμετρικό περιορισμό της περιστροφής του AB περί του κέντρου O των αξόνων. Με βάση τον πίνακα 5-2, αλλά και μετρώντας με παχύμετρο τις διαστάσεις που δεν αναγράφονται στον πίνακα σχεδιάστηκε η συναρμογή του σχήματος 5-4, βάση της οποίας προσδιορίζονται οι συντεταγμένες των σημείων A(4,-2.5), B(4,5), Γ(5,3) και Δ(5,-5). Το ευθύγραμμο τμήμα AB είναι μέρος της κατακόρυφης ευθείας (ε_{AB}): $x = 4$, ενώ το ΓΔ είναι μέρος της (επίσης κατακόρυφης) ευθείας ($\varepsilon_{\Gamma\Delta}$): $x = 5$.



Σχήμα 5-5α. Συναρμογή mandrel με Brass polishing ring και ορισμός αξόνων.

Το σημείο A περιστρέφεται γύρω από το O διαγράφοντας κύκλο C_1 κέντρου $O(0,0)$ και ακτίνας ίσης με το μέτρο του διανύσματος $\vec{OA} = (4, -2.5)$. Αντίστοιχα, το σημείο B περιστρέφεται γύρω από το O διαγράφοντας κύκλο C_2 κέντρου $O(0,0)$ και ακτίνας ίσης με το μέτρο του διανύσματος $\vec{OB} = (4,5)$. Ισχύουν οι εξισώσεις ορισμού των δύο κύκλων (C_1): $x^2 + z^2 = |\vec{OA}|^2 = 4.717^2$ και (C_2): $x^2 + z^2 = |\vec{OB}|^2 = 6.403^2$. Παρατηρούμε ότι η απόσταση του κέντρου περιστροφής $O(0,0)$ του ευθύγραμμου τμήματος AB είναι μεγαλύτερη από την ακτίνα του κύκλου (C_1) και μικρότερη από την ακτίνα του κύκλου (C_2). Συνεπώς, κατά την ανتيωρολογιακή περιστροφή του AB ως προς το O, κανένα σημείο αυτού δεν θα ακουμπήσει επί του «ορίου» ΓΔ.

Αντίθετα, κατά την ωρολογιακή περιστροφή του AB περί του O κάποιο σημείο του θα ακουμπήσει το σημείο Γ, αναγκάζοντας την περιστροφή να σταματήσει. Θα ονομάσουμε αυτό το σημείο του AB, $\Gamma'(x_{\Gamma'}, z_{\Gamma'})$. Τα σημεία Γ και Γ' , ανήκουν σε κύκλο με κέντρο το O και ακτίνα ίση με το μέτρο του διανύσματος $\vec{OG} = (5,3)$. Θα ονομάσουμε αυτόν τον κύκλο (C_3): $x^2 + z^2 = |\vec{OG}|^2 = 5.831^2$.



Σχήμα 5-5β. Σχηματική απεικόνιση συναρμογής mandrel με Brass polishing ring και ορισμός αξόνων.

Το σημείο Γ' προσδιορίζεται αν λύσουμε το σύστημα εξισώσεων

$$(\varepsilon_{AB}): x = 4 \quad (5-8)$$

$$(C_3): x^2 + z^2 = |\overline{O\Gamma}|^2 = 5.831^2 \quad (5-9)$$

οπότε προκύπτει $\Gamma'(x_{\Gamma'}, z_{\Gamma'}) \equiv (4, 4.243)$. Ισχύει ότι

$$\theta_{max} = A\hat{O}A' = B\hat{O}B' = \Gamma\hat{O}\Gamma' \quad (5-10)$$

Χρησιμοποιώντας τον ορισμό του εσωτερικού γινομένου διανυσμάτων, υπολογίζουμε:

$$\overline{OG} \cdot \overline{OG'} = (x_G, z_G) \cdot (x_{G'}, z_{G'}) = x_G \cdot x_{G'} + z_G \cdot z_{G'} \stackrel{\text{def}}{=} |\overline{OG}| \cdot |\overline{OG'}| \cdot \cos(\Gamma \hat{OG}') \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \boxed{\theta_{max} = \Gamma \hat{OG}' \cong 15.72^\circ}. \quad (5-11)$$

Ας σημειωθεί ότι με το μοιρογνωμόνιο στην πραγματική διάταξη μετράμε περίπου 19-20°, ωστόσο το σφάλμα μπορεί να αποδοθεί σε σφάλμα μέτρησης διαστάσεων με το παχύμετρο. Σε κάθε περίπτωση, γωνία μεγαλύτερη της υπολογισθείσας οδηγεί σε κραδασμούς και καταστροφή της ποιότητας επιφάνειας λόγω δημιουργίας χαραγών, οπότε, για να μπορέσει να θεωρηθεί ότι γίνεται μελέτη «on the safe side», από εδώ και στο εξής θα λαμβάνεται ως περιορισμός η σχέση (5-11).

Ας σημειωθεί ότι, ενώ για τους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκαν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του Brass polishing ring, τα υπόλοιπα είναι σχεδόν ομοίων διαστάσεων με αυτό, οπότε η συγκεκριμένη τιμή μας καλύπτει σε κάθε περίπτωση, αν και για λόγους πληρότητας, είναι δυνατό με την ίδια μεθοδολογία να υπολογιστούν και οι τιμές της γωνίας θ_{max} για τα άλλα είδη στιλβωτικών δακτυλίων που διαθέτουμε.

5.4 Βασική ιδέα για στίλβωση σε 3 διαστάσεις μέσω CNC

Για την κατασκευή ενός οποιουδήποτε καλουπιού μέσω του κέντρου κατεργασιών HAAS του εργαστηρίου κατεργασιών του ΕΜΠ ακολουθείται η ακόλουθη διαδικασία. Αρχικά, το καλούπι σχεδιάζεται με ακρίβεια στο περιβάλλον του SolidWorks. Στη συνέχεια χρησιμοποιείται το λογισμικό του SolidCAM για να γίνει προσομοίωση της κατεργασίας κοπής με το κατάλληλο κονδύλι. Το SolidCAM εξάγει σαν αποτέλεσμα τον G-code που πρέπει να χρησιμοποιηθεί για να δημιουργηθεί το καλούπι με τα εργαλεία που έχουμε επιλέξει δουλεύοντας στο περιβάλλον εργασίας του. Αυτός ο κώδικας αντιστοιχεί σε ακολουθία σημείων επί της επιφάνειας προς στίλβωση. Συνεπώς, μπορούν να αξιοποιηθούν σαν καμπύλη-οδηγός για τη χάραξη μίας τροχοειδούς καμπύλης που θα αποτελέσει το tool-path που θα ακολουθήσει το εργαλείο στίλβωσης για να εκτελέσει το γυάλισμα της επιφάνειας του καλουπιού.

Αρχικά, το tool-path του κονδυλιού που λαμβάνεται από το SolidCAM προβάλλεται πάνω σε ένα επίπεδο της μορφής $(\Pi): z = c$, με το c να είναι σταθερός πραγματικός αριθμός. Πάνω στην προβολή του tool-path του κονδυλιού στο επίπεδο (Π) ακολουθούμε τη μεθοδολογία που περιγράφηκε στην ενότητα 3. Χρησιμοποιούμε την καμπύλη αυτή ως οδηγό για τη χάραξη κατάλληλης τροχοειδούς καμπύλης επί του επιπέδου (Π) . Εκτιμούμε ποιο από τα δύο μοντέλα θα χρησιμοποιήσουμε, αν και ενδείκνυται το (κατάλληλα τροποποιημένο) ακριβές μοντέλο, καθώς η πλήρης

κάλυψη μίας επιφάνειας καθιστά αναγκαία την ύπαρξη περιοχών μεγάλης κλίσης, καθώς και περιοχές «στροφών» (η καμπύλη δεν είναι συνάρτηση).

Τέλος, μετά τη χάραξη της τροχοειδούς και με γνώση των σημείων της επιφάνειας του καλουπιού, προβάλλουμε το επίπεδο (Π) ξανά πάνω στην επιφάνεια του καλουπιού, μαζί με τη χαραχθείσα τροχοειδή καμπύλη.

Ας σημειωθεί ότι, για να είναι δυνατή η στίλβωση μίας τρισδιάστατης επιφάνειας με χρήση στιλβωτικών δακτυλίων πρέπει να αποτελείται μόνο από επίπεδες περιοχές και περιοχές που είναι ή που μπορούν να θεωρηθούν με πολύ ικανοποιητική ακρίβεια, τμήματα σφαίρας. Σε αντίθετη περίπτωση χρησιμοποιούνται άλλες μέθοδοι σύμφωνα με το μοντέλο της εταιρείας Novarax, με κυριότερη τη μέθοδο παλινδρομικής στίλβωσης Flex-rolit (βλέπε πίνακα 2-3).

Επιπλέον είναι αναγκαία συνθήκη η προς στίλβωση επιφάνεια να μην έχει σε κανένα σημείο της κλίση μεγαλύτερη από την γωνία θ_{max} που προσδιορίστηκε στην παράγραφο 5.3, ως προς κανέναν από τους άξονες x και y .

Με βάση τα όσα αναφέρθηκαν θα διατυπωθούν δύο απλά μοντέλα με τα οποία μπορεί να γίνει προσδιορισμός του G-code που θα πρέπει να ακολουθεί ο στιλβωτικός δακτύλιος.

5.5 2D model για υπολογισμό σημείων G-code

Μετά την πρόσδεση του καλουπιού προς στίλβωση στο κέντρο κατεργασιών τριών αξόνων HAAS, η προς στίλβωση επιφάνεια μπορεί να περιγραφεί μέσω οποιασδήποτε από τις 3 μεθόδους που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 2.3.1. Η συγκεκριμένη επιφάνεια μπορεί να διαφοριστεί θεωρώντας αμελητέου πάχους «φέτες» που προκύπτουν από την τομή του καλουπιού με 2 επίπεδα, το (Π_1): $y = c$ και το (Π_2): $y = c + dy$. Με αυτόν τον τρόπο, παίρνουμε ένα προφίλ της επιφάνειας προς στίλβωση με τη μορφή μίας καμπύλης, η οποία δίνεται αν σε οποιαδήποτε από τις σχέσεις που συμβολίζουν την επιφάνεια (δηλαδή τις 2-2 ή 2-3) αντικατασταθεί η τιμή $y = c$, οπότε προκύπτει σχέση της μορφής $z = f(x)$ (από την 2-2) ή $F(x, z) = 0$ (από την 2-3). Και οι δύο τελευταίες σχέσεις συμβολίζουν καμπύλες γραμμές στο επίπεδο Oxz , ή πιο συγκεκριμένα, στο επίπεδο (Π_1), που είναι παράλληλο στο Oxz .

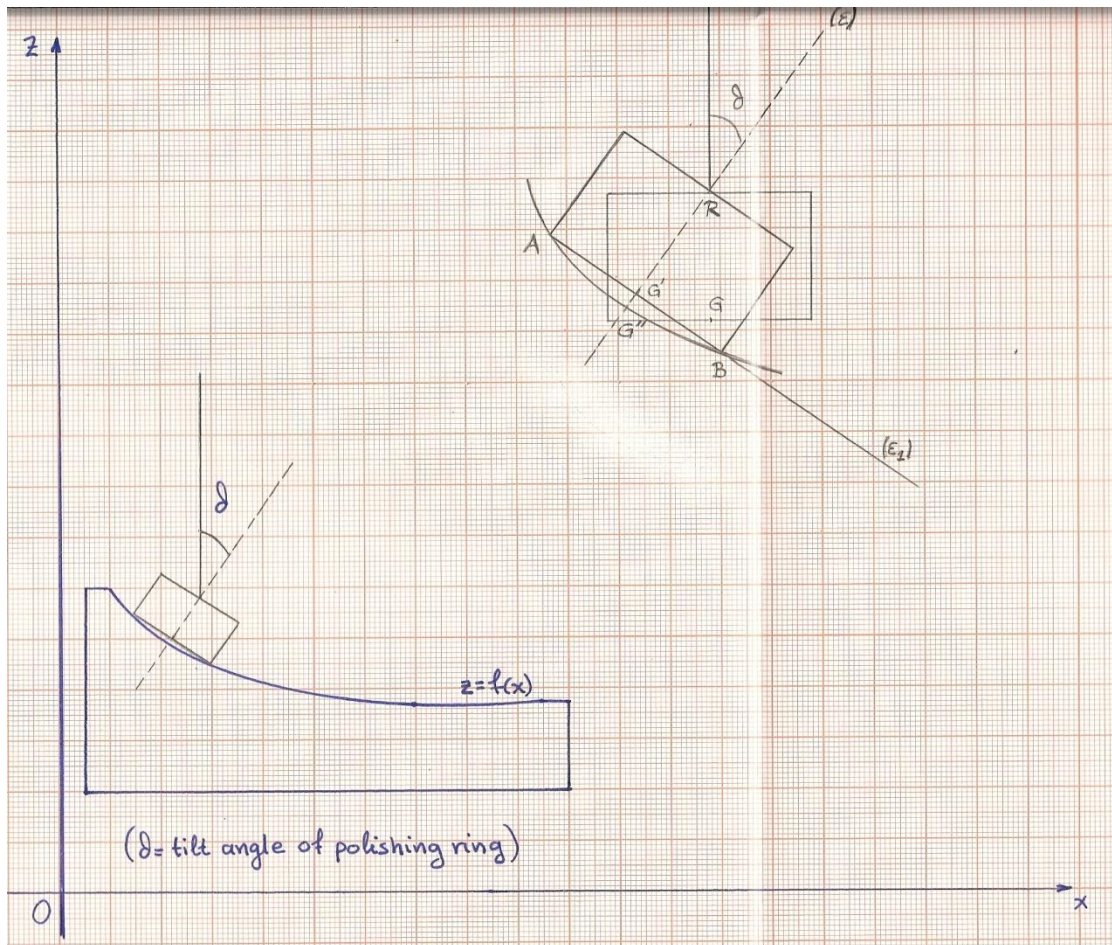
Ας θεωρήσουμε την περίπτωση που το προφίλ της προς στίλβωση επιφάνειας μπορεί να εκφραστεί μέσω μη πεπλεγμένης σχέσης της μορφής

$$z = f(x) \quad (5-12)$$

Το κέντρο κατεργασιών HAAS είναι τριών αξόνων, δηλαδή είναι δυνατός ο έλεγχος μόνο μετατοπίσεων στους 3 άξονες, αλλά καμίας περιστροφής (πλην των RPM). Ας σημειωθεί ότι το εργαλείο δεν έχει σταθερή γεωμετρία, όπως το κονδύλι

που χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία αρχικής αυλάκωσης, καθώς περιστρέφεται μέχρι γωνίας θ_{max} περί των αξόνων x και y . Δηλαδή, τους άλλους δύο βαθμούς ελευθερίας τους λαμβάνουμε μέσω του συγκεκριμένου κοπτικού εργαλείου, αντί της μηχανής, έστω και με περιορισμό ως προς τη μέγιστη τιμή που μπορούν να πάρουν. Συνεπώς, πρέπει να ακολουθηθεί κάποια σύμβαση για το πώς θα προγραμματιστεί η κίνηση του δακτυλίου. Πρέπει δηλαδή να προγραμματίσουμε την κίνηση ενός σταθερού σημείου του χώρου ως προς την άτρακτο (mandrel) του δακτυλίου στίλβωσης. Με δεδομένο ότι είναι εύκολο να ακουμπήσουμε τον δακτύλιο στην οριζόντια επιφάνεια εκατέρωθεν του καλουπιού, θέση στην οποία οι γωνίες περιστροφής του δακτυλίου ως προς τους άξονες x και y είναι μηδενικές, ακολουθείται η εξής σύμβαση. Στον G-code που θα περιγράφει την κίνηση του στίλβωτικού δακτυλίου οι συντεταγμένες που ορίζονται αφορούν το μέσον του κυκλικού δίσκου που καλύπτει ο δακτύλιος όταν εφάπτεται σε οριζόντιο επίπεδο. Ωστόσο, εδώ ο δακτύλιος είναι κεκλιμένος, συνεπώς πρέπει να υπολογίσουμε τις συντεταγμένες που θα είχε το σημείο αυτό αν ο δακτύλιος ήταν τοποθετημένος σε οριζόντια θέση.

Έστω τυχαίο σημείο επί της καμπύλης που προσδιορίζεται από την (5-12). Κάθε τέτοιο τυχαίο σημείο της επιφάνειας προς στίλβωση θα συμβολίζεται με $G''(x_{G''}, z_{G''})$, όπου $z_{G''} = f(x_{G''})$. Έστω ότι στην περιοχή γύρω από το σημείο G'' η επιφάνεια είναι κοίλη (concave). Στο σχήμα 5-6 φαίνεται ο τρόπος με τον οποίο θα ακουμπά ο δακτύλιος στην επιφάνεια. Η απόσταση (AB) ισούται με την εξωτερική διάμετρο του δακτυλίου και το μέσον του ευθύγραμμου τμήματος (AB) είναι το κέντρο του «κυκλικού δίσκου επαφής» του δακτυλίου. Η ευθεία ϵ συμβολίζει τον άξονα του κυλίνδρου του δακτυλίου (άξονας περιστροφής του δακτυλίου) και η ϵ_1 την ευθεία που περιέχει το ευθύγραμμο τμήμα (AB). Το σημείο G'' ορίζεται στο πρόβλημα ως το σημείο τομής της ϵ (μεσοκάθετος του AB) με την καμπύλη που αναπαριστά την προς στίλβωση επιφάνεια.



Σχήμα 5-6. 2D model υπολογισμού σημείων G-code.

Ο δακτύλιος είναι κεκλιμένος κατά γωνία θ ως προς τον άξονα της απράκτου πρόσδεσης (mandrel). Όταν η επιφάνεια έχει αρνητική κλίση, τότε το θ είναι μικρότερο του μηδενός, ενώ όταν έχει θετική κλίση ισχύει ότι θ μεγαλύτερο του μηδενός. Δηλαδή ισχύει

$$f'(x_{G''}) > 0 \Leftrightarrow \theta > 0 \text{ και } f'(x_{G''}) < 0 \Leftrightarrow \theta < 0 \quad (5-13)$$

Με γνωστό το σημείο G'' μπορούμε επίσης να γράψουμε τις εξισώσεις των ευθειών ϵ και ϵ_1 , ως εξής

$$(\epsilon_1): z = \tan\theta \cdot x + \beta \quad (5-14)$$

$$(\epsilon): z = -\frac{1}{\tan\theta} \cdot x + \left[z_{G''} + \frac{1}{\tan\theta} \cdot x_{G''} \right] \quad (5-15)$$

Ας επισημανθεί ότι γενικά ισχύει $\tan\theta \neq f'(x_{G''})$. Δηλαδή, στο μαθηματικό πρόβλημα που λύνουμε έχουμε σαν δεδομένα την καμπύλη της σχέσης (5-12) (άρα κάθε σημείο της) και την εξωτερική διάμετρο του δακτυλίου $D_{ring,outer}$, που ισούται με (AB) . Τα ζητούμενα είναι οι συντεταγμένες των σημείων A, B, G' και G, καθώς και η γωνία θ . Η σταθερά β της σχέσης (5-14) είναι προς υπολογισμό.

Τα σημεία A και B έχουν συντεταγμένες (x_A, z_A) και (x_B, z_B) αντίστοιχα, με $z_A = f(x_A)$ και $z_B = f(x_B)$. Το σημείο $G'(x_{G'}, z_{G'})$ είναι το σημείο τομής του AB με την μεσοκάθετό του, ευθεία ε , άρα οι συντεταγμένες του δίνονται από τις σχέσεις

$$x_{G'} = \frac{x_A + x_B}{2} \quad (5-16)$$

$$z_{G'} = \frac{z_A + z_B}{2} = \frac{f(x_A) + f(x_B)}{2} \quad (5-17)$$

Η κλίση της ευθείας ε_1 μπορεί να οριστεί μέσω των σημείων A και B, ως εξής

$$\tan\theta = \frac{f(x_B) - f(x_A)}{x_B - x_A} \quad (5-18)$$

Επειδή το σημείο G' ανήκει στην ευθεία ε και με χρήση των σχέσεων (5-16) έως (5-18), με αντικατάσταση στην (5-15), προκύπτει ότι

$$\frac{f(x_A) + f(x_B)}{2} = \frac{x_A - x_B}{f(x_B) - f(x_A)} \cdot \frac{x_A + x_B}{2} + [z_{G''} + \frac{x_B - x_A}{f(x_B) - f(x_A)} \cdot x_{G''}] \quad (5-19)$$

Επίσης, γνωρίζουμε ότι η απόσταση μεταξύ A και B ισούται με την εξωτερική διάμετρο του δακτυλίου στίλβωσης, οπότε εξάγεται η σχέση

$$(x_B - x_A)^2 + [f(x_B) - f(x_A)]^2 = D_{ring,o}^2 \quad (5-20)$$

Οι σχέσεις (5-19) και (5-20) είναι ένα πεπλεγμένο, μη γραμμικό σύστημα δύο εξισώσεων με δύο αγνώστους που μπορεί να λυθεί αριθμητικά μέσω της εντολής `fsolve` στο περιβάλλον της Matlab, ή με μεθόδους όπως η Gauss-Seidel και η Newton-Raphson για μη γραμμικά συστήματα.

Αφού υπολογιστούν οι τιμές x_A και x_B , μπορεί να υπολογιστεί η γωνία θ μέσω της σχέσης (5-18) και οι συντεταγμένες του σημείου G' μέσω των (5-16) και (5-17). Γνωρίζοντας επιπλέον από το σχήμα 5-5 την απόσταση $(G'R)$ του G' από το κέντρο περιστροφής του δακτυλίου, μπορούμε να υπολογίσουμε τις συντεταγμένες του σημείου $R(x_R, z_R)$. Το σημείο R ανήκει στην ευθεία ε , συνεπώς ισχύει

$$z_R = -\frac{1}{\tan\theta} \cdot x_R + [z_{G''} + \frac{1}{\tan\theta} \cdot x_{G''}] \quad (5-21)$$

Επίσης, η απόσταση του $(G'R)$ ισούται με 5 mm για μπρούντζινο δακτύλιο. Γενικά (για οποιοδήποτε είδος δακτυλίου) ισχύει η σχέση

$$(x_{G'} - x_R)^2 + (z_{G'} - z_R)^2 = (G'R)^2 \quad (5-22)$$

Από αυτό το σύστημα, αν αντικατασταθεί η (5-21) στην (5-22) δημιουργείται μία δευτεροβάθμια εξίσωση από την οποία προκύπτουν δύο πιθανές λύσεις για το x_R . Θα επιλεγεί η σωστή με βάση την κλίση του δακτυλίου. Προφανώς ισχύει ότι

$$\text{An } \theta > 0^\circ \Leftrightarrow x_R < x_{G'} \text{ και an } \theta < 0^\circ \Leftrightarrow x_R > x_{G'} \quad (5-23)$$

Με γνωστά τα σημεία G' και R , καθώς και την γωνία θ , το μόνο που απομένει για τον προσδιορισμό του σημείου G του G-code, είναι να περιστρέψουμε το διάνυσμα $\overrightarrow{RG'}$ ως προς την αρχή του κατά γωνία $(-\theta)$.

Σχηματίζουμε τα εξής διανύσματα

$$\overrightarrow{RG'} = (x_{G'} - x_R, z_{G'} - z_R) \quad (5-24)$$

$$\overrightarrow{RG} = (x_G - x_R, z_G - z_R) \quad (5-25)$$

Για να περιστρέψουμε το $\overrightarrow{RG'}$ κατά γωνία $(-\theta)$ ώστε να προκύψει το \overrightarrow{RG} , πολλαπλασιάζουμε με τον πίνακα περιστροφής, ως εξής

$$\begin{bmatrix} x_G - x_R \\ z_G - z_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(-\theta) & -\sin(-\theta) \\ \sin(-\theta) & \cos(-\theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_{G'} - x_R \\ z_{G'} - z_R \end{bmatrix} \quad (5-26)$$

Από τη σχέση (5-26) προκύπτει τελικώς το σημείο $G(x_G, z_G)$.

Σαν επαλήθευση μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι σχέσεις:

$$x_G = x_R \quad (5-26\alpha)$$

$$z_G = z_R - (G'R) \quad (5-26\beta)$$

Είναι προφανές ότι για να χαραχθεί το tool path που εξάγεται από το δισδιάστατο μοντέλο, πρέπει η συγκεκριμένη μεθοδολογία να εφαρμοστεί για όλα τα σημεία της καμπύλης της εξίσωσης (5-12), συνεπώς επιβάλλεται να γραφεί κώδικας που να υπολογίζει τα σημεία του G-code με δεδομένη την εξίσωση (5-12) και τη γεωμετρία του εκάστοτε δακτυλίου.

Αν σε τέλεια σφαιρική επιφάνεια προς στίλβωση σε κάποιο σημείο της εφαρμοστεί το δισδιάστατο μοντέλο αρχικά κατά y , όπως έχει διατυπωθεί δηλαδή, και μετά κατά x , προσδιορίζονται και οι δύο γωνίες στροφής του δακτυλίου ως προς τους άξονες x και y και η ακριβής θέση του στο χώρο. Το ίδιο είναι εφικτό σε κεκλιμένο ως προς του άξονες x και y επίπεδο.

Οι περιπτώσεις επιπέδου και τέλει (ή με πολύ καλή προσέγγιση τέλει) σφαιρικής επιφάνειας είναι και οι μόνες περιπτώσεις που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τη μέθοδο στίλβωσης με χρήση δακτυλίων στίλβωσης. Αυτό είναι εύκολα κατανοητό αν αναλογιστούμε ότι πρέπει να εφάπτεται ολόκληρη η περιφέρεια του δακτυλίου επί της επιφάνειας προς στίλβωση ανά πάσα στιγμή για την επίτευξη του επιθυμητού αποτελέσματος. Η τομή σφαιρικής επιφάνειας με οποιοδήποτε επίπεδο είναι κύκλος, συνεπώς ο κυκλικός δακτύλιος είναι ιδανικό εργαλείο για τη στίλβωση σφαιρικών επιφανειών. Ωστόσο, σε τυχαία τρισδιάστατη επιφάνεια κάτι τέτοιο δεν ισχύει. Αν σε κάποιο σημείο η ακτίνα καμπυλότητας κατά x είναι πολύ διαφορετική από την ακτίνα καμπυλότητας κατά y , τότε δύο σημεία της περιφέρειας

του δακτυλίου θα ακουμπούν στην επιφάνεια κατά τον άξονα επί τη διεύθυνση του οποίου εμφανίζεται η ελάχιστη ακτίνα καμπυλότητας και όλα τα υπόλοιπα σημεία της περιφέρειας δεν ακουμπούν στην επιφάνεια προς στίλβωση. Αυτό έχει σαν συνέπεια να εμφανίζονται χαραγές λόγω υπερβολικής πίεσης επί των δύο αυτών σημείων και να μην γυαλίζεται καθόλου η υπόλοιπη επιφάνεια. Επίσης, είναι δυνατό να οδηγήσει σε αυξανόμενες ταλαντώσεις του δακτυλίου λόγω συντονισμού κατά την κατεργασία και σε πιθανή θραύση κάποιου εξαρτήματος. Για να αποφευχθούν τέτοιες περιπτώσεις είναι χρήσιμος ο έλεγχος της ακτίνας καμπυλότητας κατά x και y (ίσως και ως προς ενδιάμεσες διευθύνσεις για σιγουριά). Γεωμετρικά, η ακτίνα καμπυλότητας ορίζεται ως η ακτίνα του κυκλικού τόξου που προσεγγίζει καλύτερα (ακριβέστερα) την καμπύλη στο συγκεκριμένο σημείο. Με δεδομένη τη σχέση του προφίλ επιφανείας από τη σχέση (5-12) (έκφραση μέσω καρτεσιανών συντεταγμένων), η ακτίνα καμπυλότητας δίνεται από τη σχέση

$$R = R(x) = \left| \frac{[1+(z')^2]^{(3/2)}}{z''} \right| \quad (5-27)$$

όπου ισχύουν οι συντομεύσεις $z' = \frac{dz}{dx}$ και $z'' = \frac{d^2z}{dx^2}$. Στην περίπτωση που το προφίλ επιφανείας είναι ορισμένο παραμετρικά, πράγμα πολύ πιθανό σε πολύπλοκες επιφάνειες όπως αυτές που εξετάζονται σε αυτή την εργασία, ισχύουν τα ακόλουθα. Έστω $x(t)$ και $z(t)$ οι παραμετρικές εξισώσεις ορισμού του προφίλ επιφανείας. Η ακτίνα καμπυλότητας δίνεται από τη σχέση

$$R = \left| \frac{ds}{d\varphi} \right| = \left| \frac{(\dot{x}^2 + \dot{z}^2)^{(3/2)}}{\dot{x}\ddot{z} - \dot{z}\ddot{x}} \right| \quad (5-28)$$

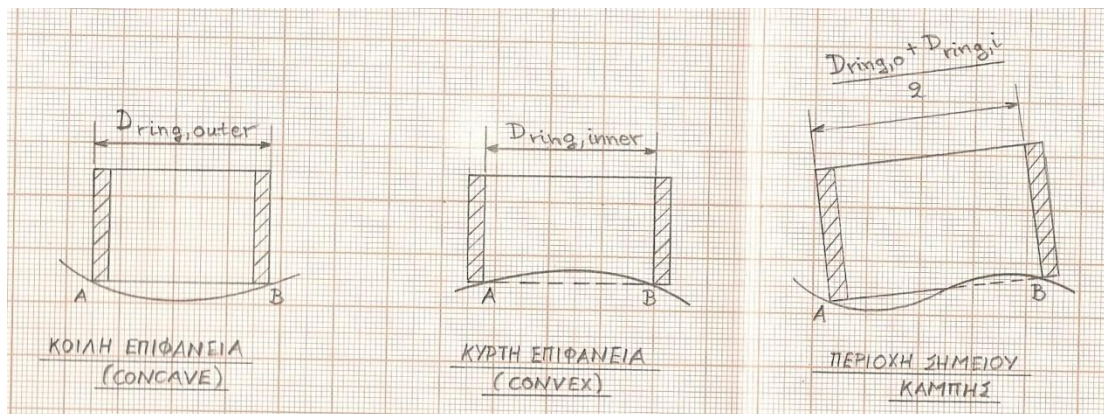
όπου $\dot{x} = \frac{dx}{dt}$, $\dot{z} = \frac{dz}{dt}$, $\ddot{x} = \frac{d^2x}{dt^2}$ και $\ddot{z} = \frac{d^2z}{dt^2}$.

Η ακτίνα καμπυλότητας κατά y προκύπτει αν γίνει τομή της ολικής επιφανείας στη θέση αυτού του σημείου (G'') με 2 επίπεδα της μορφής (Π_1): $x = c$ και το (Π_2): $x = c + dx$. Η καμπύλη που θα προκύψει θα είναι της μορφής $z = f(y)$. Ακολουθείται η ίδια διαδικασία με τη νέα συνάρτηση, και θέτοντας όπου x το y .

Στα παραπάνω έγινε η παραδοχή ότι η επιφάνεια είναι κοίλη (concave). Ωστόσο, το μοντέλο μπορεί να εφαρμοστεί εύκολα για κυρτή (convex) επιφάνεια, με μόνη διαφορά ότι θα εφάπτεται η εσωτερική περιφέρεια του δακτυλίου, συνεπώς σε όποια σχέση χρειάζεται θα εισαχθεί το $D_{ring, inner}$ αντί του $D_{ring, outer}$. Η μεθοδολογία μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στη «γειτονιά» σημείων καμπής, δηλαδή μετάβασης από κοίλο σε κυρτό και το αντίστροφο, φροντίζοντας στην κυρτή περιοχή να

ακουμπά η εσωτερική και στην κοίλη η εξωτερική περιφέρεια του δακτυλίου ταυτόχρονα. Η απόσταση AB δηλαδή θα ισούται με

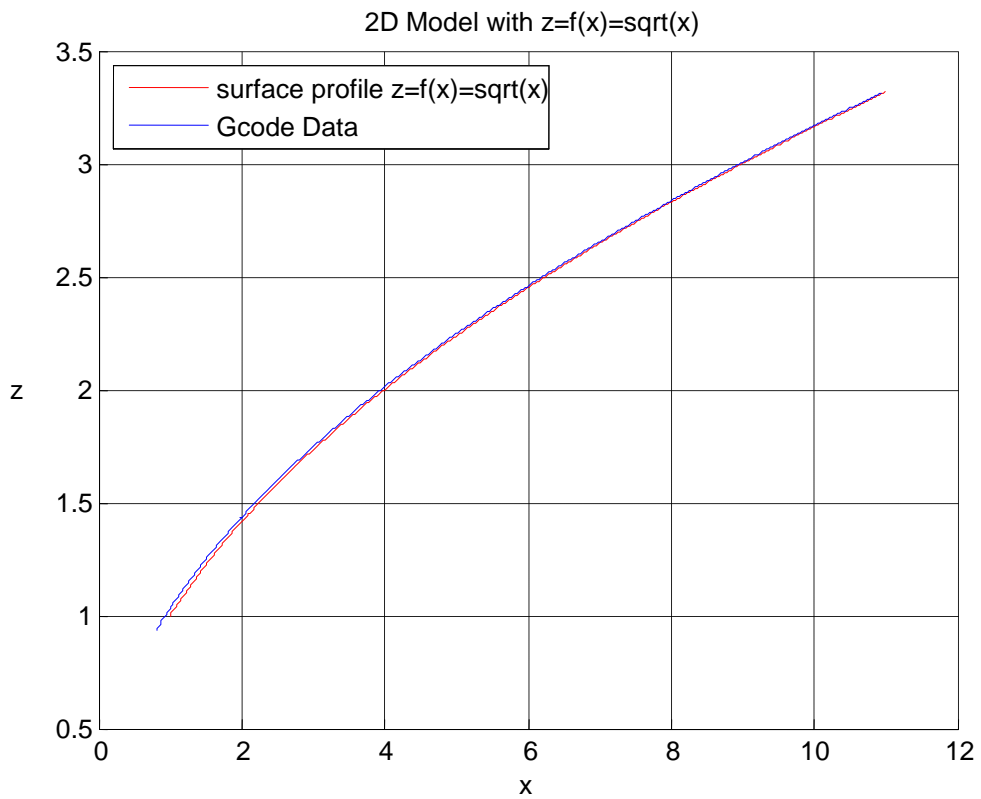
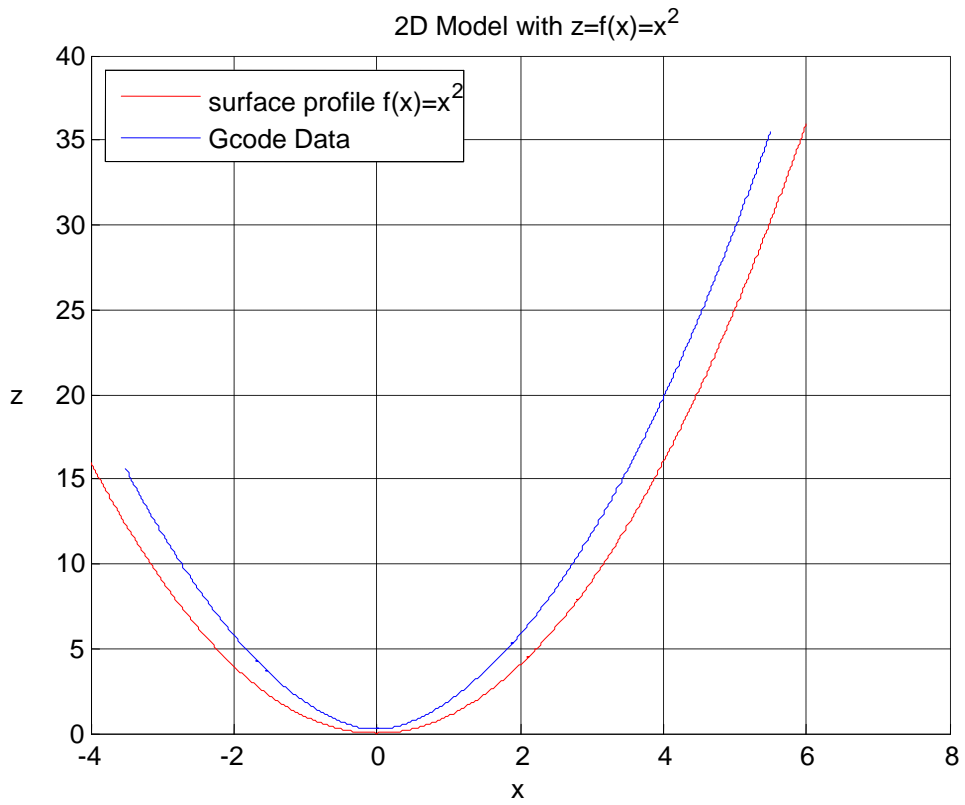
$$(AB) = \frac{D_{ring,outer} + D_{ring,inner}}{2} \quad (5-29)$$

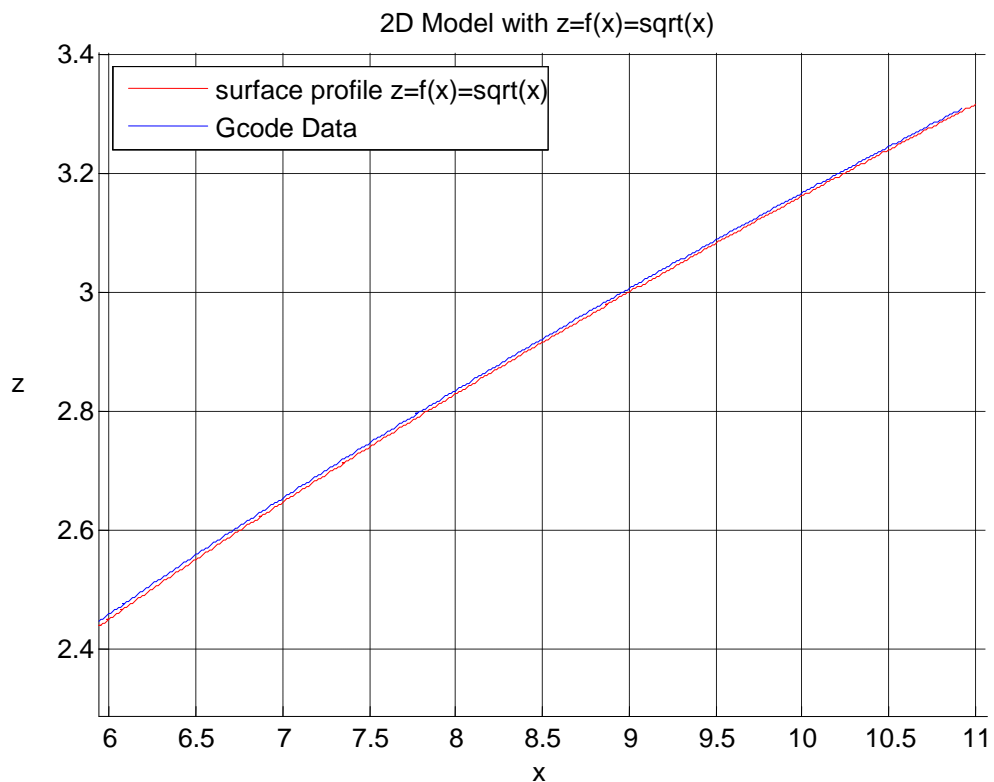
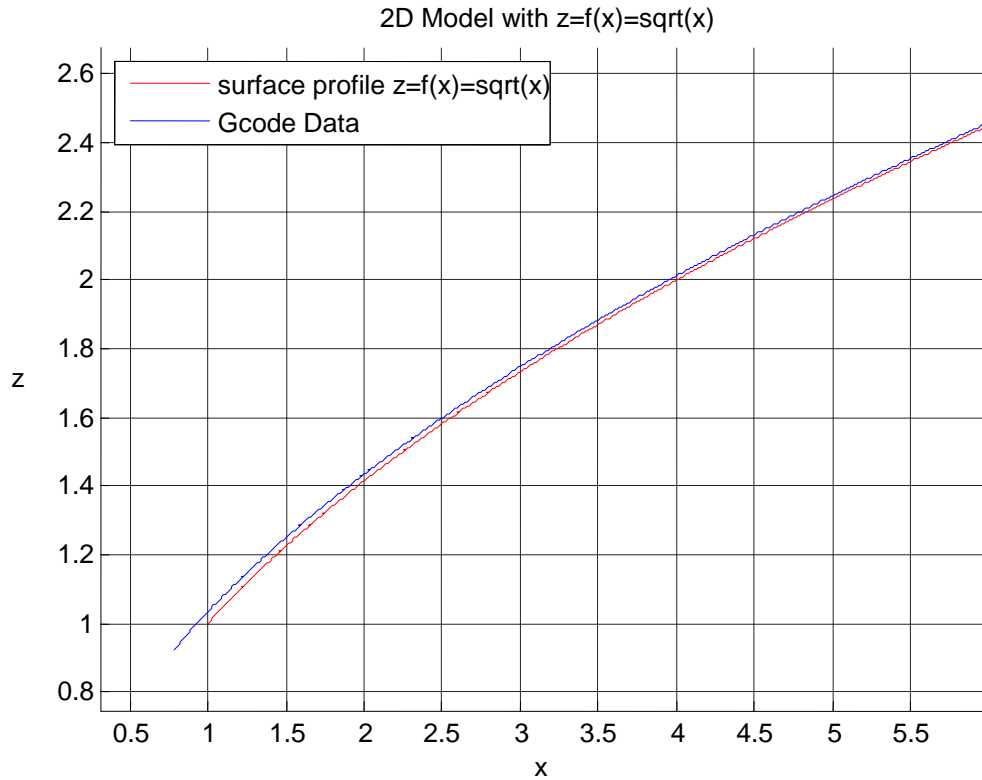


Σχήμα 5-7. Εφαρμογή 2D model επί σημείου καμπής και τρόπος επαφής δακτυλίου.

Ας σημειωθεί βέβαια, ότι ο τρόπος επαφής του δακτυλίου σε περιοχή σημείου καμπής παρατίθεται για λόγους πληρότητας, καθώς η στίλβωση με χρήση αυτής της μεθόδου ενδείκνυται μόνο για επίπεδες και τέλειες ή με πολύ καλή προσέγγιση σφαιρικές επιφάνειες. Στην περιοχή του σημείου καμπής είναι αδύνατο να έχουμε κανένα από αυτά τα δύο είδη επιφανειών, συνεπώς πρέπει να ακολουθηθεί άλλη μέθοδος για την στίλβωση της συγκεκριμένης περιοχής.

Ο κώδικας του 2D model που έχει γραφεί επιλύει το πρόβλημα μόνο για κυρτά και κοίλα προφίλ επιφανείας, ενώ προσφέρεται η δυνατότητα αναγνώρισης των περιοχών όπου υπάρχει κοίλη και κυρτή επιφάνεια με έλεγχο του προσήμου της 2^{ης} παραγώγου.





Σχήμα 5-8. Γεωμετρικός τόπος G-data για δύο διαφορετικά είδη προφίλ επιφανείας.
Ο υπολογισμός έγινε με τη χρήση του κώδικα του 2D-Model.

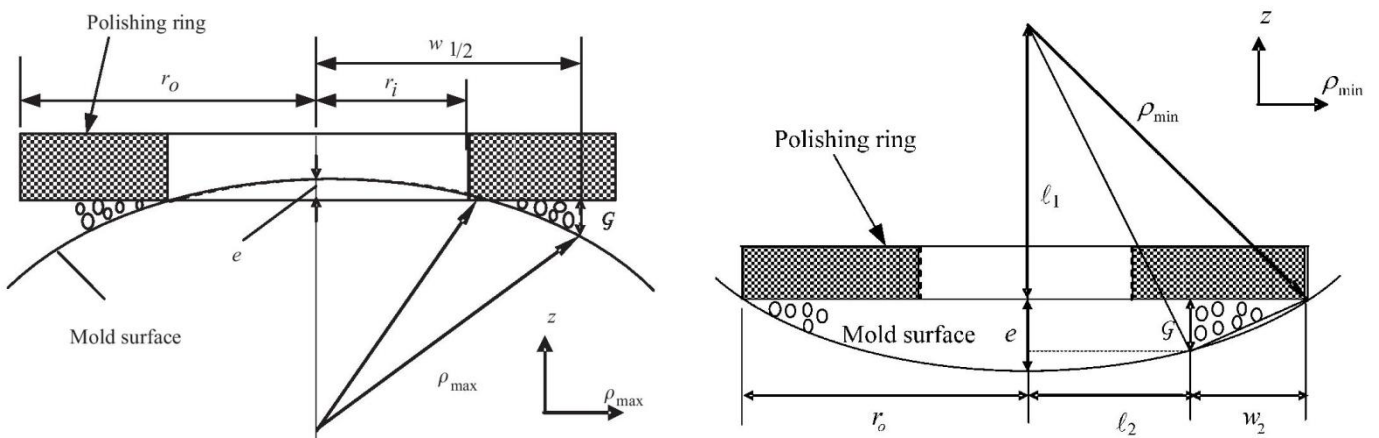
5.6 Παρατηρήσεις επί του 2D model.

Μετά από αρκετά τρεξίματα του κώδικα για διαφορετικά είδη προφίλ επιφανείας, παρατηρήθηκε ότι σε υπερβολικά μικρές κλίσεις το 2D model μπορεί να παρουσιάσει σφάλματα, καθώς η γωνία θ παίρνει πολύ μικρές τιμές και η ποσότητα $\tan^2 \theta$ πρέπει να χρησιμοποιηθεί στον παρονομαστή αρκετών ποσοτήτων κατά την επίλυση του πολυωνύμου που οδηγεί στην εύρεση του σημείου R. Συνεπώς, θα μπορούσε να γίνει χρήση μεταβλητών τύπου double αντί για float στον κώδικα, για να αποφευχθούν περιπτώσεις overflow ή underflow που θα οδηγούσαν σε απροσδιοριστία. Ωστόσο, επειδή περιοχές με πολύ μικρή κλίση εντοπίζονται σε σημεία όπου η επιφάνεια προσεγγίζεται πολύ καλά από οριζόντιο επίπεδο, κάτι τέτοιο δεν κρίνεται απαραίτητο.

Ας σημειωθεί ότι ο κώδικας δίνει σωστή λύση ακόμα και σε περιπτώσεις που η καμπύλη του προφίλ επιφανείας είναι τέλεια ευθεία. Οι μόνες περιπτώσεις που πρέπει να αποφεύγεται η χρήση του είναι περιοχές με πολύ μικρή κλίση, ώστε να αποφευχθεί ο μηδενισμός των παρονομαστών συγκεκριμένων κλασμάτων στη συνέχεια της επίλυσης του μοντέλου.

Επιπροσθέτως, η εύρεση του σημείου R γίνεται με χρήση της απόστασης (RG'), η οποία διαφέρει μεταξύ των τεσσάρων διαφορετικών ειδών δακτυλίων στίλβωσης. Στο μοντέλο μας θεωρείται ωστόσο σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια της στίλβωσης. Στην πραγματικότητα το συγκεκριμένο μήκος μειώνεται με το χρόνο, γεγονός λογικό αν αναλογιστούμε την φθορά του εργαλείου. Για δυναμική μελέτη του φαινομένου είναι δυνατό να εισαχθεί κάποιο μαθηματικό μοντέλο φθοράς που θα οδηγήσει στον υπολογισμό της μείωσης του συγκεκριμένου μήκους συναρτήσει του χρόνου. Κατόπιν, με επιλογή πρόωσης, μεγέθους κόκκου διαμανταλοιφής και παραμέτρων τροχοειδούς, είναι εφικτό να υπολογίζεται με ακρίβεια το σημείο G του G-code με δεδομένο μοντέλο φθοράς εργαλείου.

Επιπλέον, ανάλογα με την ακτίνα καμπυλότητας και το αν η επιφάνεια είναι κυρτή ή κοίλη, η ποιότητα της στίλβωσης διαφέρει. Αυτό συμβαίνει διότι, σε μη επίπεδη επιφάνεια, το επίπεδο στίλβωσης εξαρτάται από τους κόκκους της διαμανταλοιφής που εγκλωβίζονται μεταξύ του δακτυλίου στίλβωσης και της προς στίλβωση επιφάνειας εκατέρωθεν των σημείων επαφής A και B. Όπως φαίνεται στο σχήμα 5-9, οι κόκκοι της διαμανταλοιφής εγκλωβίζονται στις «εσοχές» που δημιουργούνται κατά την επαφή και η περιστροφή του δακτυλίου τους αναγκάζει να εισχωρούν στην κατεργαζόμενη επιφάνεια αφαιρώντας μικρές ποσότητες υλικού, επιτυγχάνοντας την οπτική βελτίωση της επιφάνειας στην οποία αποσκοπεί η στίλβωση.



Σχήμα 5-9. Εισχώρηση κόκκων διαμανταλοιφής στις εσοχές μεταξύ των δύο επιφανειών σε κυρτή (αριστερά) και κοίλη (δεξιά) επιφάνεια προς στίλβωση.

Συνεπώς, ακόμα και στις περιπτώσεις όπου οι ακτίνες καμπυλότητας έχουν διαφορά και η επιφάνεια δεν είναι δυνατό να θεωρηθεί με πολύ καλή προσέγγιση ως σφαιρική, είναι δυνατό να επιτευχθεί στίλβωση και να οριστεί μία “effective contact area”. Αυτή η περιοχή θα είναι υποσύνολο της επιφάνειας που προκύπτει ως προβολή του κυκλικού δακτυλίου του polishing ring επί της προς στίλβωση επιφάνειας και το σχήμα του θα εξαρτάται καθαρά από το είδος της επιφάνειας (μέγιστη και ελάχιστη ακτίνα καμπυλότητας στο συγκεκριμένο σημείο). Ας σημειωθεί ότι σε κοίλη επιφάνεια (δεξιά) τα σημεία επαφής (A και B του 2D Model) είναι επί της διεύθυνσης στην οποία εντοπίζεται η ελάχιστη ακτίνα καμπυλότητας, ενώ σε κυρτή επιφάνεια (αριστερά) εντοπίζονται στη διεύθυνση προς την οποία υπολογίζεται η μέγιστη ακτίνα καμπυλότητας. Ωστόσο, η μελέτη της συγκεκριμένης περίπτωσης και ο προσδιορισμός της περιοχής επαφής εκπίπτει από το σκοπό και το θέμα που πραγματεύεται η συγκεκριμένη εργασία.

6 Πειράματα και έκθεση αποτελεσμάτων

6.1 Χειροκίνητα πειράματα και υλικά που χρησιμοποιήθηκαν.

Προτού προχωρήσουμε σε αυτοματοποιημένα πειράματα, κρίθηκε χρήσιμο να πραγματοποιηθούν σε πρώτο στάδιο κάποιες χειροκίνητες δοκιμές στίλβωσης, με σκοπό να αποκτηθεί η απαραίτητη τεχνογνωσία επί του αντικειμένου, ώστε να χρησιμοποιηθεί αυτή η εμπειρία για τον προσδιορισμό των λεπτομερειών της μεθόδου που οδηγούν σε επιτυχή αποτελέσματα.

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν με χρήση των υλικών και εργαλείων που καταγράφονται στην ακόλουθη λίστα. Ας σημειωθεί η υπερπολύτιμη βοήθεια που προσέφερε ο ιδιοκτήτης της εταιρείας Novarax Greece, κύριος Μανώλης Μαρινάκης στην διαδικασία αυτή.

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν είναι:

1. Διαμαντένιος στιλβωτικός δακτύλιος,
2. Μπρούντζινος στιλβωτικός δακτύλιος,
3. Πλαστικός στιλβωτικός δακτύλιος,
4. Πλαστικός στιλβωτικός δακτύλιος με σχισμή για ασφάλιση κετσέ,
5. Άτρακτος σύνδεσης δακτυλίων στο τσικ του grinder,
6. Διαμανταλοιφές 28, 15, 10, 7 και 3 μm grain size,
7. Οινόπνευμα,
8. Διάλυμα γλυκόλης και οινόπνεύματος,
9. Χαρτί κουζίνας,
10. Κετσές και βαμβάκι,
11. Σμυριδόπανο με σχετικά μεγάλο μέγεθος κόκκου (P 120) για "τρόχισμα" του διαμαντένιου δακτυλίου αν αυτό κρίνεται αναγκαίο,
12. Μεγεθυντικός φακός, για έλεγχο της επιφάνειας μετά από κάθε στάδιο.

Η διαδικασία της στίλβωσης έγινε με το grinder BSG-135 Set Bavaria της εταιρείας Einhell, datasheet του οποίου παρατίθεται στο Παράρτημα Δ. Τα στοιχεία των τεσσάρων ειδών στιλβωτικών δακτυλίων που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και της ατράκτου πρόσδεσης αυτών στο τσικ του grinder παρατίθενται στο κεφάλαιο 5, στα σχήματα 5-2, 5-3, 5-4 και στον πίνακα 5-2. Οι διαμανταλοιφές είναι προϊόντα της εταιρείας Novarax Greece και περιέχονται σε σωληνάρια (σύριγγες) των 5 γραμμαρίων που διακρίνονται από ειδικό χρωματικό κώδικα. Συγκεκριμένα, το καφέ χρώμα αντιστοιχεί σε διαμανταλοιφή με grain size 28 μm, το μπλε σε αυτή των 15, το γαλάζιο σε αυτή των 10, το κόκκινο σε αυτή των 7 και το πράσινο σε αυτή των 3ών

μm. Το οινόπνευμα χρησιμοποιείται για τον επιμελή καθαρισμό των επιφανειών και εργαλείων μετά από κάθε στάδιο της διαδικασίας, ενώ το διάλυμα γλυκόλης-οινοπνεύματος σαν διαλύτης της διαμανταλοιφής. Χαρτί κουζίνας χρησιμοποιήθηκε για τον καθαρισμό των επιφανειών, ενώ κετσές και βαμβάκι για το φινίρισμα της επιφάνειας για ποιότητα "καθρέφτη".

Στο κεφάλαιο 2 είχε γίνει μία πρώτη προσέγγιση της διαδικασίας που ακολουθείται. Στην επόμενη παράγραφο θα γίνει εκτενής ανάλυση της μεθόδου που ακολουθείται, και θα επισημανθούν διάφορες λεπτομέρειες κομβικής σημασίας για την επίτευξη του βέλτιστου δυνατού αποτελέσματος.

6.2 Ανάλυση διαδικασίας και παρατηρήσεις.

Τα πειράματα χειροκίνητης στίλβωσης έγιναν σε 2 διαφορετικά είδη δοκιμίων. Το πρώτο σε κυρτή σφαιρική επιφάνεια από ηλεκτροδιάβρωση και το δεύτερο σε επίπεδη επιφάνεια με αυλακώσεις που δημιουργήθηκαν από σφαιρικό κονδύλι σε κέντρο κατεργασιών CNC με τη μέθοδο που περιγράφηκε στην παράγραφο 5.2. Με αυτόν τον τρόπο διαπιστώθηκε ότι η συγκεκριμένη μέθοδος είναι απόλυτα εφαρμόσιμη χωρίς καμία τροποποίηση ή προσαρμογή και στις δύο αυτές περιπτώσεις δοκιμίων και δίνει εξαιρετικής ποιότητας επιφάνεια.

Για να ξεκινήσει η διαδικασία του γυαλίσματος, πρώτο στάδιο είναι αυτό της εκχόνδρισης. Πιο αναλυτικά, είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί κατάλληλο εργαλείο (πέτρα, δισκάκι με κόκκο κατάλληλου μεγέθους ή διαμαντένιος δακτύλιος) για να αφαιρεθούν τα μικροεξογκώματα ("γρίφια") που δημιουργεί ως κατάλοιπο πάνω στην επιφάνεια η ηλεκτροδιάβρωση, ή τα "όρη" που σχηματίζονται μεταξύ των αυλακώσεων που δημιουργεί το σφαιρικό κονδύλι κατά το φρεζάρισμα. Επιλέχθηκε διαμαντένιος δακτύλιος (1) και προσδέθηκε στο grinder μέσω της ατράκτου (5), όπως περιγράφεται στο σχήμα 5-5. Το συγκεκριμένο στάδιο της κατεργασίας χαρακτηρίζεται ως "στεγνό", καθώς στην προς στίλβωση επιφάνεια δεν αλείφεται διαμανταλοιφή και δεν χρησιμοποιείται λιπαντικό (8). Ο διαμαντένιος δακτύλιος δηλαδή, χρησιμοποιείται καθαρά ως κοπτικό εργαλείο. Για την εκχόνδριση επιλέγεται σχετικά υψηλός αριθμός στροφών (~15000 RPM) και σχετικά υψηλή πίεση, καθώς επιδιώκεται η αφαίρεση σχετικά μεγάλης ποσότητας υλικού. Η μέγιστη πίεση που μπορούμε να εφαρμόσουμε εξαρτάται από την ισχύ του grinder, καθώς αν αυτή δεν είναι αρκετή και υπερβούμε ένα όριο πίεσης, θα ακολουθήσει stall-άρισμα και μείωση των στροφών. Ας σημειωθεί ότι το 90-95% της συνολικά αφαιρεθείσας ποσότητας υλικού καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας γυαλίσματος αφαιρείται κατά την εκχόνδριση. Από αυτό το γεγονός, είναι ευκόλως κατανοητό ότι ο έλεγχος για την

επίτευξη της επιθυμητής διαστασιακής ακρίβειας πρέπει να γίνει κατά τη διάρκεια και μετά το πέρας της εκχόνδρισης.

Το χέρι μας κατά τη διάρκεια αυτού του σταδίου πραγματοποιεί τροχοειδή κίνηση μεριμνώντας ώστε να επιτυγχάνεται πληρότητα και ομοιομορφία κάλυψης της προς στίλβωση επιφάνειας. Κατά τη διάρκεια της εκχόνδρισης, παρατηρείται η εμφάνιση σκόνης χάλυβα (μικρογρεζιών) πάνω στην επιφάνεια, και συγκεκριμένα υπό μορφή ενός μικρού τοιχίου στο περίγραμμα της επιφάνειας που καλύπτεται με το δακτύλιο. Παρότι το μεγαλύτερο μέρος αυτής της σκόνης εξωθείται εκτός του περιγράμματος της επιφάνειας, ή καταλήγει εντός του δακτυλίου, στο κενό που υπάρχει ως "clearing area", υπάρχει η πιθανότητα κάποιος κόκκος να διεισδύσει στο υλικό του δακτυλίου και να ακολουθεί την πορεία του, συρόμενο επί της επιφάνειας. Κάτι τέτοιο γίνεται αντιληπτό από την ξαφνική εμφάνιση δονήσεων του εργαλείου και έχει σαν συνέπεια την εμφάνιση βαθύτερων του επιθυμητού χαραγών επί της επιφάνειας. Δονήσεις ("χοροπήδημα") του δακτυλίου επάνω στην επιφάνεια μπορούν να συμβούν επίσης λόγω υπέρβασης του γεωμετρικού περιορισμού περί μέγιστης γωνίας κλίσης του δακτυλίου θ_{max} , όπως αυτή υπολογίστηκε από τη μέθοδο της παραγράφου 5.3, ή από μεγάλη κάμψη της ντίζας του grinder. Το grinder πρέπει να είναι κρεμασμένο σε ύψος τέτοιο ώστε η ντίζα να κρέμεται προς τα κάτω και να μην λυγίζει υπέρμετρα, εισάγοντας ανεπιθύμητο "χοροπήδημα" (ταλάντωση του δακτυλίου) στην κατεργασία.

Το συγκεκριμένο φαινόμενο είναι ανεπιθύμητο καθώς οδηγεί σε στιγμιαία ύπαρξη σημείου και όχι επιφάνειας επαφής εργαλείου-γυαλιζόμενης επιφάνειας, με συνέπεια να δημιουργούνται βαθιές χαραγές σε κάποιες περιοχές. Εφόσον παρατηρηθεί αυτό το φαινόμενο, σταματάμε τη διαδικασία, καθαρίζουμε την επιφάνεια και το διαμαντένιο δακτύλιο από τα γρέζια με χαρτί κουζίνας και οινόπνευμα και τροχίζουμε λίγο την επιφάνεια του δακτυλίου πάνω στο συμριδόπανο, ακουμπώντας το επί του συμριδόπανου καθώς στρέφεται. Στη συνέχεια συνεχίζουμε την εκχόνδριση κανονικά. Κατά τη διάρκεια της εκχόνδρισης, το "τρέμουλο" του grinder πρέπει να μειώνεται σταδιακά, καθώς μειώνεται η τραχύτητα της EDM επιφάνειας, ή των αυλακώσεων. Ελέγχουμε με τον μεγεθυντικό φακό σε τι στάδιο είμαστε. Οπτικά, η διαστασιακή ακρίβεια έχει επιτευχθεί όταν έχουν εξαφανιστεί πλήρως τα σημάδια που δημιούργησε η ηλεκτροδιάβρωση ή τα όρη που δημιούργησε το σφαιρικό κονδύλι κατά το φρεζάρισμα. Το μόνο που πρέπει να φαίνεται εντός της επιφάνειας είναι οι τροχοειδούς μοτίβου χαραγές που αφήνει αναπόφευκτα το διαμαντένιο δακτυλίδι, οι οποίες πρέπει να έχουν ίδιο βάθος. Αν εντοπιστεί κάποια βαθύτερη χαραγή, οφείλεται σε γρέζι ή ταλαντωτικό φαινόμενο του

εργαλείου και απαιτείται ένα ακόμη πέρασμα, πιο ελαφράς πίεσης ωστόσο, με το διαμαντένιο δακτύλιο.

Με το πέρας της εκχόνδρισης μπορούμε να περάσουμε στη χρήση των διαμανταλοιφών για τη διαδικασία του lapping και fine-lapping. Ακουμπώντας ελαφρά την δημιουργηθείσα επιφάνεια με το δάχτυλό μας μετά την εκχόνδριση διαπιστώνουμε ότι, παρότι οι χαραγές είναι ορατές, δεν είναι εύκολα αντιληπτές με την αφή. Καθαρίζουμε την επιφάνεια με οινόπνευμα ώστε να απομακρυνθούν ίχνη λιπαρότητας από το δάχτυλό μας και τυχόν γρέζια που παρέμειναν, και χρησιμοποιούμε αρχικά τη διαμανταλοιφή των 15 μm grain size. Η χρήση της αλοιφής 28 μm δεν κρίνεται απαραίτητη στο lapping ή το fine-lapping (χρησιμοποιείται και αυτή για εκχόνδριση σε σπάνιες περιπτώσεις).

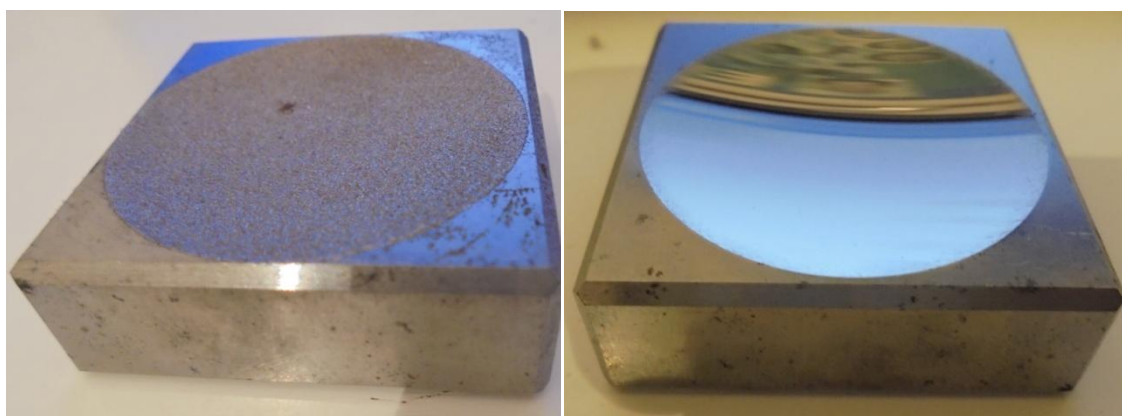
Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η εξής. Χρησιμοποιούμε τη σύριγγα για να τοποθετήσουμε 3-4 μικρές σφαίρες διαμανταλοιφής σε μέγεθος μικρότερο από ένα μπιζέλι πάνω στην επιφάνεια που θα γυαλίσουμε. Ρίχνουμε 3-4 μικρές σταγόνες διαλύτη (8) και χρησιμοποιούμε ένα λαστιχένιο γάντι για να απλώσουμε την αλοιφή στην επιφάνεια, δημιουργώντας μία σχετικά ομοιογενή πάστα. Ξεκινάμε χρησιμοποιώντας μπρούντζινο δακτύλιο, ρυθμίζοντας το grinder σε χαμηλές στροφές (~500 RPM) και ασκώντας ελάχιστη πίεση (απαλό "χάδι"). Πλέον, ο δακτύλιος είναι απλά ένα μέσο για να γίνει η τριβή των κόκκων της αλοιφής πάνω στην επιφάνεια, και η αφαίρεση υλικού γίνεται αποκλειστικά από τους κόκκους διαμαντιού. Για αυτό το λόγο και το αφαιρεθέν υλικό είναι πολύ λιγότερο απ' ό τι στην εκχόνδριση. Ανά τακτά χρονικά διαστήματα σκουπίζουμε τμήμα της επιφάνειας με το χαρτί κουζίνας και ελέγχουμε με το φακό την ποιότητα της επιφάνειας που παράγεται. Η διάσταση πρέπει να παραμένει ίδια και οι χαραγές να είναι μικρότερου βάθους και ομοιόμορφες μεταξύ τους. Σε περίπτωση "χοροπηδήματος" του εργαλείου, ρίχνουμε 1-2 σταγόνες διαλύτη (8) επιπλέον, ώστε να αραιώσει η πάστα και να γίνει πιο λεπτόρρευστη ξανά. Αν αυτό δεν είναι αρκετό, καθαρίζουμε επιφάνεια και δαχτυλίδι και αν είναι αναγκαίο μετά τον οπτικό έλεγχο, κάνουμε ένα ακόμα πέρασμα με την ίδια αλοιφή και δακτύλιο. Για να σιγουρευτούμε ότι έχουμε επιθυμητό αποτέλεσμα και μπορούμε να πάμε σε πιο "fine" στάδιο στίλβωσης, χρησιμοποιούμε πλαστικό δακτύλιο (3) και ίδια ποσότητα 15άρας αλοιφής και διαλύτη με αυτή που χρησιμοποιήθηκε στο πέρασμα με μπρούντζινο δακτύλιο. Εφαρμόζουμε μεγάλη πίεση και ~15000 RPM (υψηλές στροφές). Αυτό γίνεται απλά για να "καθαρίσει" η επιφάνεια και να μας δείξει την ποιότητα που έχουμε αποκτήσει, σε περίπτωση που ο οπτικός έλεγχος δεν είναι αρκετός για να μας βεβαιώσει για το αν μπορούμε να προχωρήσουμε ή όχι.

Τα ίδια βήματα που έγιναν με την αλοιφή 15 μm , επαναλαμβάνουμε και με τις αλοιφές των 10 και 7 μm , πάντα με ιδιαίτερη προσοχή στη μετάβαση από στάδιο σε

στάδιο. Ας σημειωθεί ότι το μπρούντζινο και τον πλαστικό δακτύλιο που χρησιμοποιήσαμε με τη 15άρα αλοιφή, μπορούμε να τον χρησιμοποιήσουμε μόνο με 15άρα πλέον, καθώς αν προσπαθήσουμε να τον χρησιμοποιήσουμε με τη 10άρα ή την 7άρα, οι κόκκοι απλά θα "χάνονται" στις βαθιές εγκοπές που δημιουργήσαν οι κόκκοι διαμέτρου 15 μm στο υλικό του δακτυλίου και η κατεργασία δε θα έχει κανένα αποτέλεσμα. Άρα απαιτείται φύλαξη των δακτυλίων στο ίδιο πλαστικό κουτάκι με την αλοιφή με την οποία χρησιμοποιούνται για αποφυγή χρήσης αλοιφής με "λάθος" δακτύλιο.

Η ποιότητα "καθρέφτη" αρχίζει να εμφανίζεται από τη χρήση της 7άρας αλοιφής και μετά. Η χρήση της 3άρας καλείται και "fine-lapping" και γίνεται χωρίς τη χρήση διαλύτη (8). Γίνεται αρχικά με πλαστικό δακτύλιο (3), μεγάλη πίεση και πολλές στροφές (~15000 RPM). Κατόπιν, χρησιμοποιείται για το φινίρισμα ("polishing") πλαστικός δακτύλιος (4) στον οποίο προσαρμόζεται ειδικό πανάκι (κετσές). Είναι σημαντικό να μην φοβόμαστε να εφαρμόσουμε αρκετή πίεση σε αυτό το στάδιο, καθώς η ποσότητα αφαιρούμενου υλικού είναι ελάχιστη, άρα δεν κινδυνεύουμε με καταστροφή της επιφάνειας.

Σε κάθε περίπτωση, πιθανές ατέλειες μπορούν να διορθωθούν με επανάληψη του προηγούμενου βήματος, προσέχοντας να μην υπερβούμε τους περιορισμούς διαστασιακής ακρίβειας αφαιρώντας υπερβολικά μεγάλη ποσότητα υλικού, γιατί κάτι τέτοιο θα κατέστρεφε το τεμάχιο και πιθανώς να το καθιστούσε άχρηστο.



Εικόνα 6-1. (Αριστερά). Δοκίμιο με κυρτή σφαιρική επιφάνεια μετά από EDM Ηλεκτροδιάβρωση.

(Δεξιά). Το ίδιο δοκίμιο μετά από διαδικασία χειροκίνητης στίλβωσης (ποιότητα "καθρέφτη").

Μετά από κάθε στάδιο της κατεργασίας, πέραν του οπτικού ελέγχου πραγματοποιείται και μέτρηση τραχύτητας peak-to-valley με τραχύμετρο και καταγραφή των αποτελεσμάτων. Ας σημειωθεί ότι οι αριθμοί 28, 15, 10, 7 και 3 μm που χαρακτηρίζουν τις διάφορες διαμανταλοιφές δείχνουν τη διάμετρο των κόκκων διαμαντιού που συναντάται σε καθεμία εξ αυτών και όχι την τραχύτητα επιφανείας που επιτυγχάνουμε επί της προς στίλβωση επιφάνειας χρησιμοποιώντας τη συγκεκριμένη διαμανταλοιφή. Η peak-to-valley τραχύτητα επιφανείας που επιτυγχάνεται μετρημένη σε μm , μπορεί να είναι μία, ακόμα και δύο τάξεις μεγέθους καλύτερη (“finer”) και είναι σημαντικό να μη συγχέονται το grain size με την τραχύτητα που επιτυγχάνεται. Για παράδειγμα, από τον πίνακα 2-3 παρατηρούμε ότι για polishing με cloth disk και πλαστικό δακτύλιο (4), μπορεί να επιτευχθεί τραχύτητα peak-to-valley έως και 0.06 μm , χρησιμοποιώντας αλοιφή με grain size 3 μm , δηλαδή δύο τάξεων μεγέθους μεγαλύτερη της επιτευχθείσας τραχύτητας.

Αν παρατηρήσουμε προσεκτικά τα άκρα του δοκιμίου στην δεξιά φωτογραφία, στο όριο της στιλβωθείσας περιοχής, είναι ορατές κάποιες χαραγές οι οποίες αφέθηκαν επί σκοπού, για να υπάρξει αντιδιαστολή καλής με κακή ποιότητα στίλβωσης.

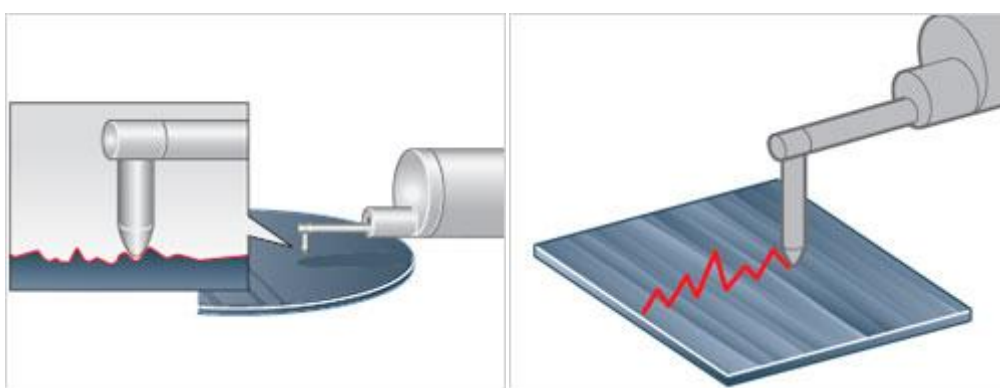
Την ίδια διαδικασία γυαλίσματος ακολουθήσαμε χειροκίνητα και σε δοκίμιο επίπεδης επιφάνειας με αυλακώσεις δημιουργημένες από σφαιρικό κονδύλι σε φρεζάρισμα στο κέντρο κατεργασιών HAAS του εργαστηρίου κατεργασιών του ΕΜΠ. Τα αποτελέσματα ήταν αντίστοιχα, δείγμα του ότι η μέθοδος εφαρμόζεται άψογα και στις δύο περιπτώσεις που εξετάστηκαν.

6.3 Αποτελέσματα και παρατηρήσεις χειροκίνητων πειραμάτων.

Για να ξεκινήσουν τα αυτοματοποιημένα πειράματα, απαιτείται μία συγκεκριμένη προεργασία μέσω χειροκίνητων πειραμάτων, για καθορισμό των επιπέδων δύναμης που θα εφαρμοστούν και για εντοπισμό λεπτομερειών που επηρεάζουν την όλη διαδικασία σε δοκίμιο με αυλακώσεις. Αρχικά, είναι απαραίτητο να υπολογίζεται η δύναμη κατά τον άξονα z που ασκείται στην επιφάνεια σε κάθε χρονική στιγμή. Η δύναμη ασκείται μέσω αποσυσπείρωσης των ελαστικών συνδέσμων της δεύτερης κατασκευασθείσας βάσης, όπως αυτή περιγράφεται στην παράγραφο 4.5. Για να συμβεί αυτό, πρέπει, αφού προσαρμοστούν οι ελαστικοί σύνδεσμοι στις κατάλληλες θέσεις να προσδεθεί η βάση στο κέντρο κατεργασιών και να γίνουν μετρήσεις κάθετης δύναμης (βάρους που ασκείται στην επιφάνεια) συναρτήσει της κάθετης μετατόπισης (επί του άξονα z). Χρησιμοποιείται για αυτές τις μετρήσεις ηλεκτρονική ζυγαριά μοντέλου KERN KB 5000-1, ακρίβειας δεκάτου του

γραμμαρίου (0.1 g) και με δυνατότητα ζύγισης βάρους μέχρι 5100 γραμμαρίων, στοιχεία που κρίνονται ιδιαίτερα ικανοποιητικά για τα πειράματα που θέλουμε να διεξάγουμε. Αφού γίνει η συγκεκριμένη βαθμονόμηση, θα χρησιμοποιείται το διάγραμμα κάθετης μετατόπισης-δύναμης που έχει δημιουργηθεί για τον προσδιορισμό της δύναμης κατεργασίας.

Χρησιμοποιήσαμε το δοκίμιο με επίπεδη επιφάνεια και αυλακώσεις δημιουργημένες με σφαιρικό κονδύλι. Μετρήθηκε η αρχική τραχύτητα των αυλακώσεων με το τραχύμετρο. Στο σχήμα 6-2 φαίνεται ο τρόπος με τον οποίο η βελόνα του τραχύμετρου ακολουθεί το προφίλ της επιφάνειας της οποίας επιθυμούμε να μετρήσουμε την τραχύτητα.



Σχήμα 6-1. Τρόπος λειτουργίας τραχύμετρου για μέτρηση τραχύτητας επίπεδων επιφανειών.

Η μύτη (ακίδα) του τραχύμετρου εισχωρεί στις κοιλάδες και ακολουθεί τα όρη καθώς κινείται επί μίας ευθείας γραμμής πάνω στην επιφάνεια, ακολουθώντας το προφίλ τραχύτητας. Στη συνέχεια, το λογισμικό του τραχύμετρου υπολογίζει τα διάφορα είδη τραχύτητας και μας τα επιστρέφει σαν ένδειξη επί της οθόνης. Οι αυλακώσεις δημιουργήθηκαν μέσω της μεθόδου που περιγράφηκε στην παράγραφο 5.2, με ball-end mill ακτίνας 10 mm και με βήμα μεταξύ διαδοχικών αυλακώσεων ίσο με 0.9 mm. Από το αρχείο Excel με τίτλο “Peak to valley roughness calculation” εκτιμούμε με τη θεωρητική (γεωμετρική) μέθοδο τραχύτητα περίπου 10 μm. Ο κατασκευαστής του κονδυλίου, συνυπολογίζοντας πλαστική παραμόρφωση και ενδοτικότητα (compliance) του εργαλείου εκτιμά την τραχύτητα σε 21 μm. Ωστόσο, λόγω σφάλματος που εισάγεται εξαιτίας της μηχανής στην οποία έγινε η κατεργασία, μετράμε τελικά 36.8 μm peak-to-valley τραχύτητας.

Για προσδιορισμό της τιμής των παραμέτρων κατεργασίας που πρέπει να χρησιμοποιηθούν για να έχουμε το επιθυμητό αποτέλεσμα, ακολουθήσαμε την εξής διαδικασία. Τοποθετήσαμε το δοκίμιο πάνω στον ηλεκτρονικό ζυγό ακριβείας και

μηδενίσαμε την ένδειξη. Πραγματοποιήσαμε χειροκίνητη στίλβωση όπως αυτή περιγράφηκε στην παράγραφο 6.2 προσαρμόζοντας την ένδειξη της ζυγαριάς με τέτοιο τρόπο, ώστε να επιτύχουμε το αποτέλεσμα που θέλουμε.

Πρώτο βήμα ήταν η εκχόνδριση. Χρησιμοποιήθηκε διαμαντένιος δακτύλιος χωρίς αλοιφή ή λιπαντικό υγρό. Επιλέξαμε την 4^η σκάλα ταχύτητας του grinder (~15000 RPM) και κρατήσαμε την κάθετη δύναμη στην περιοχή 600-800 g, δηλαδή περίπου 6-8 N. Ακολουθήσαμε πιστά όλες τις οδηγίες της παραγράφου 6.2 και αφού αποκτήσαμε ομοιόμορφη επιφάνεια, επί της οποίας εμφανίζονται μόνο οι χαραγές από το διαμαντένιο δακτύλιο, μετρήσαμε την τραχύτητα με το τραχύμετρο. Η τιμή που μετρήθηκε ήταν 16.8 μm .

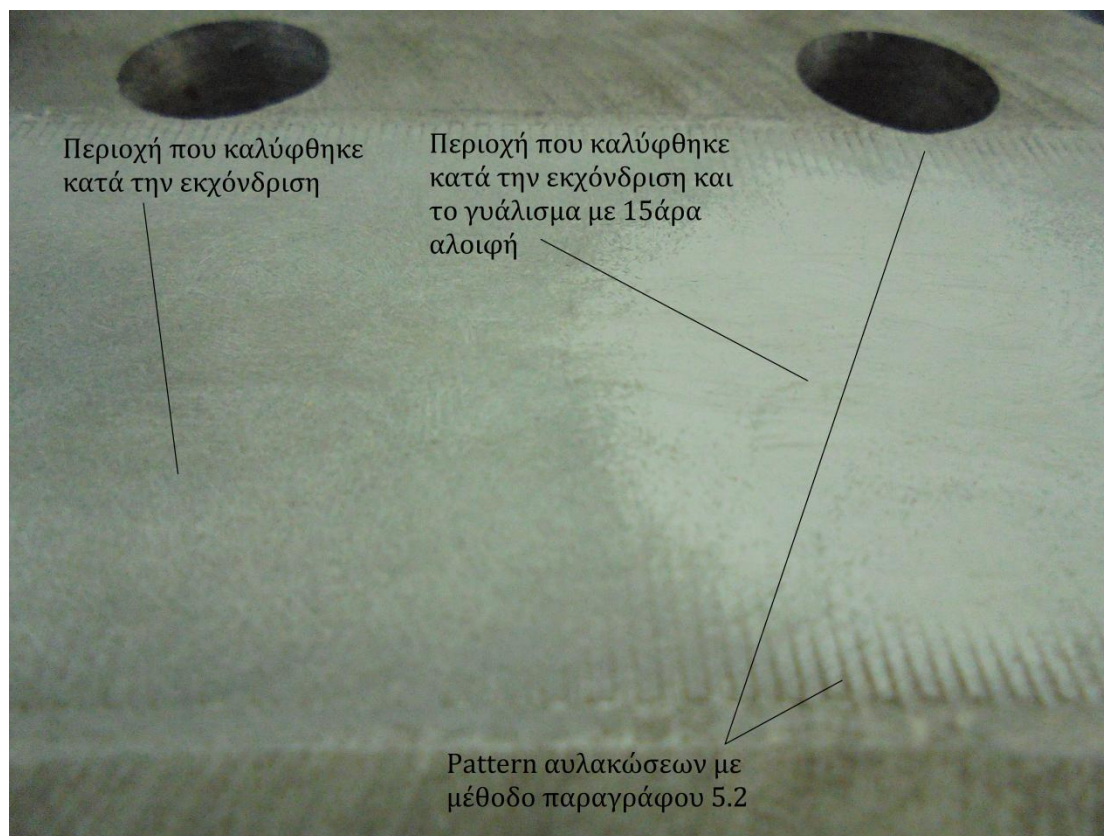
Στη συνέχεια χρησιμοποιήσαμε μπρούντζινο δακτύλιο με αλοιφή κόκκου 15 μm και με λιπαντικό υγρό. Επιλέξαμε την 1^η σκάλα ταχύτητας του grinder (~1500 RPM) και κρατήσαμε την κάθετη δύναμη στην περιοχή 120-180 g, δηλαδή περίπου 1.2-1.8 N. Και πάλι ακολουθήθηκαν όλες οι παρατηρήσεις και οδηγίες της προηγούμενης παραγράφου και όταν με οπτικό έλεγχο κρίθηκε επαρκές το επίπεδο γυαλισματος έγινε τραχυμέτρηση. Η τιμή που μετρήθηκε ήταν 3.6-4.2 μm .

Κατόπιν χρησιμοποιήθηκε μπρούντζινος δακτύλιος με αλοιφή κόκκου 10 μm και με λιπαντικό υγρό, σε ίδια ταχύτητα περιστροφής και δύναμη. Μετά το πέρας του σταδίου, μετρήθηκε τραχύτητα 2.8 μm .

Για το στάδιο της διαμανταλοιφής μεγέθους κόκκου 7 μm χρησιμοποιήθηκε αρχικά μπρούντζινος δακτύλιος με ίδιες τιμές παραμέτρων στίλβωσης όπως και στα δύο προηγούμενα στάδια και με λιπαντικό υγρό. Ωστόσο, επειδή η επιφάνεια ήταν γυαλισμένη, αλλά φαινόταν θαμπή, ακολούθησε ένα ακόμα πέρασμα με πλαστικό δακτύλιο αυτή τη φορά. Η ταχύτητα ρυθμίστηκε στην 4^η σκάλα του grinder και η πίεση περίπου στα 550-700 g, δηλαδή στα 5.5-7 N. Και εδώ χρησιμοποιήθηκε λιπαντικό υγρό. Μετά από αυτά τα δύο στάδια άρχισε να είναι εμφανής η ποιότητα “καθρέφτη” και μετρήθηκε τραχύτητα ίση με 0.7 μm .

Το στάδιο του polishing με αλοιφή μεγέθους κόκκου 3 μm έγινε και αυτό σε δύο μέρη. Χρησιμοποιήθηκε αρχικά πλαστικός δακτύλιος με την 4^η σκάλα του grinder και δύναμη περίπου 600-800 g, δηλαδή κατά προσέγγιση ίση με 6-8 N. Εν συνεχεία, χρησιμοποιήθηκε ένα μικρό κομμάτι χαρτιού κουζίνας για να τρίψουμε δυνατά μία νέα ποσότητα αλοιφής πάνω στην επιφάνεια (φινίρισμα). Η δύναμη εδώ άγγιξε τα 3000 g, δηλαδή περίπου τα 30 N. Ας σημειωθεί ότι σε κανένα από τα δύο μέρη του σταδίου του polishing με αλοιφή 3 μm δεν χρησιμοποιήθηκε λιπαντικό υγρό. Η τραχύτητα που μετρήθηκε μετά από αυτό το στάδιο μετρήθηκε στην περιοχή 0.2-0.6 μm .

Στην εικόνα 6-2 φαίνεται το επίπεδης επιφάνειας δοκίμιο στο οποίο έγιναν αρχικά οι αυλακώσεις. Το pattern των αυλακώσεων φαίνεται στα άκρα της γυαλισμένης επιφάνειας. Στο αριστερό τμήμα της έχει γίνει μόνο εκχόνδριση, ενώ στο δεξί εκχόνδριση και πέρασμα με διαμανταλοιφή κόκκου μεγέθους 15 μm .



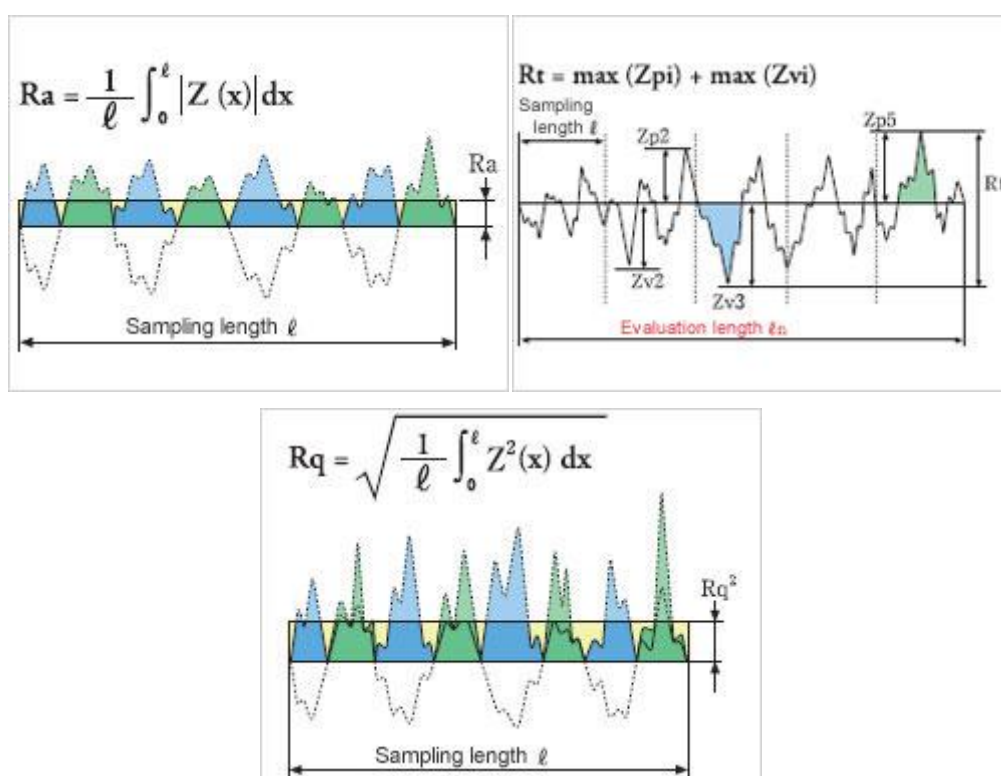
Εικόνα 6-2. Δοκίμιο επίπεδης επιφάνειας - αντιπαραβολή εκχόνδρισης και γυαλίσματος με 15άρα αλοιφή.

Στην εικόνα 6-2 έχουν επισημανθεί οι περιοχές στις οποίες λόγω ελλιπούς-αμελούς εκχόνδρισης έχουν παραμείνει οι αυλακώσεις που δημιουργήθηκαν με το σφαιρικό κονδύλι. Επίσης έχει επισημανθεί η περιοχή που καλύφθηκε μόνο με διαμαντένιο δακτύλιο (εκχόνδριση) και η περιοχή που, μετά την εκχόνδριση, πέραστηκε και με μπρούντζινο δακτύλιο με αλοιφή 15 μm . Η διαφορά τραχύτητας είναι εμφανής, μεταβαίνοντας από τις βαθιές χαραγές στην περιοχή των παραμενουσών αυλακώσεων, στις λιγότερο βαθιές της εκχονδρισμένης περιοχής και, φυσικά στις πιο ήπιες της γυαλισμένης με 15άρα αλοιφή περιοχής. Ωστόσο, η διαφορά φωτεινότητας μεταξύ σημείων εντός της εκχονδρισμένης περιοχής φανερώνει ατέλειες στην διαδικασία που οδηγούν σε ανεπιθύμητη ανομοιομορφία.

Πίνακας 6-1. Στοιχεία επίπεδης στίλβωσης επιφάνειας (με αυλακώσεις) - μετρήσεις.

	Αρχή	Μετά την εκχόνδριση	15	10	7	3
R_t (μm)	34.4	18.2	3.6-4.2	2.8	0.7	0.4
R_a (μm)	6.44	2.1	0.5	0.29	0.11	0.08
Weight (g)	1917.8	1904.1	1903.5	1902.9	1902.5	1902.3

Εκτός από μείωση της peak-to-valley τραχύτητας (R_t), παρατηρούμε και αισθητή μείωση της μέσης τραχύτητας R_a . Τα τρία βασικά είδη τραχύτητας ορίζονται στο ακόλουθο σχήμα (σχήμα 6-2).[33].



Σχήμα 6-2. Ορισμός βασικών ειδών τραχύτητας με βάση τη μέση γραμμή (mean line).

Όταν τελικώς επιτυγχάνεται η ποιότητα επιφάνειας τύπου "καθρέφτη", τόσο η peak-to-valley, όσο και η μέση τραχύτητα έχουν σημειώσει πτώση δύο τάξεων μεγέθους, ακολουθώντας μάλιστα παρόμοια συμπεριφορά απομείωσης, όπως φαίνεται και από τα δεδομένα των μετρήσεων που παρατίθενται στον πίνακα 6-1.

Το τελικό βάρος του δοκιμίου (μετά τη στίλβωση) μετρήθηκε ίσο με 1902.3 g. Το αρχικό βάρος ανερχόταν σε 1917.8 g. Δηλαδή, συνολικά αφαιρέθηκε ποσότητα

μετάλλου ίση με 15.5 g. Μετά την εκχόνδριση, το βάρος μετρήθηκε ίσο με 1904.1 g. Δηλαδή, κατά την εκχόνδριση και μόνο, αφαιρέθηκε ποσότητα μετάλλου ίση με 13.7 g, ίση με το 88.4% της συνολικής ποσότητας υλικού που αφαιρέθηκε (ως “απόβλητο”). Η συγκεκριμένη τιμή είναι πολύ κοντά στο 90-95% της εκτίμησης που είχε προηγηθεί στην παράγραφο 6.2, συνεπώς τα πειραματικά μας αποτελέσματα επαληθεύουν τα στοιχεία της θεωρίας που έχουμε παραθέσει με μία μικρή αναμενόμενη απόκλιση.

Στην εικόνα 6-3 φαίνεται το δοκίμιο στίλβωσης επίπεδης επιφάνειας (με αυλακώσεις) μετά και το στάδιο του “polishing”.



Εικόνα 6-3. Οπτική παραμόρφωση καθρεπτιζόμενου ειδώλου λόγω ανεπιθύμητης καμπυλότητας.

Στην εικόνα 6-3 βλέπουμε να καθρεφτίζεται το πάνω μέρος της οθόνης του υπολογιστή στην στιλβωθείσα περιοχή του δοκιμίου (η στίλβωση έγινε με τη χειροκίνητη μέθοδο της παραγράφου 6.2). Με κόκκινο οβάλ έχει επισημανθεί μία περιοχή του ειδώλου της οθόνης. Η άσπρη περιοχή έπρεπε να καθρεφτίζεται ως ορθογώνιο, ωστόσο το πάχος της παρουσιάζει αυξομειώσεις. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η στιλβωθείσα περιοχή δεν είναι ακριβώς επίπεδη, αλλά παρουσιάζει διαφορετικές τιμές ακτίνας καμπυλότητας σε κάθε σημείο της λόγω ανομοιομορφίας στίλβωσης. Η ανομοιομορφία στίλβωσης είναι πρόβλημα που εντοπίζεται πιθανότατα

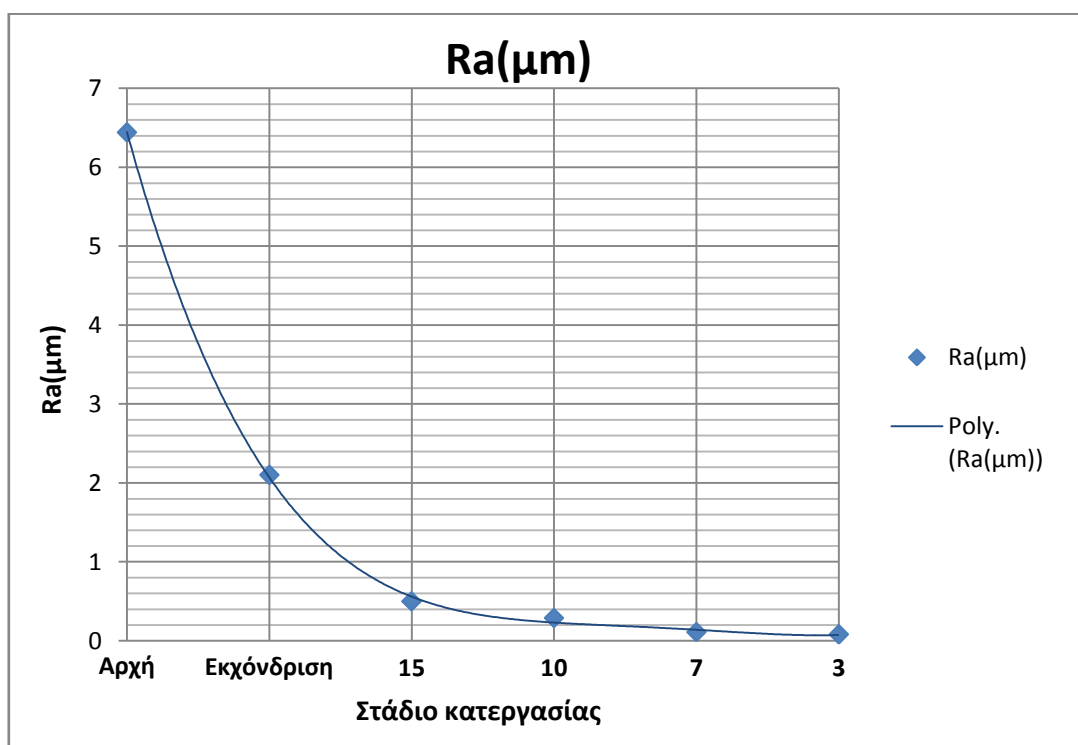
στο στάδιο της εκχόνδρισης, καθώς αυτό καθορίζει το επίπεδο διαστασιακής ακρίβειας που επιτυγχάνεται καθ'όλη τη διάρκεια της διαδικασίας. Αυτό το πρόβλημα είναι σημαντικό, καθώς σε περιπτώσεις στίλβωσης γυαλιών οράσεως ή μεγεθυντικών φακών που απαιτείται τεράστια διαστασιακή ακρίβεια, μία ανεπιθύμητη απόκλιση ως προς την επιθυμητή ακτίνα καμπυλότητας μπορεί να καταστήσει το προϊόν άχρηστο, αφού θα έχει απωλέσει τις επιθυμητές οπτικές ιδιότητες (π.χ. σημείο εστίασης). Η αντιμετώπισή του είναι εύκολη μέσω αυτοματοποίησης της μεθόδου στίλβωσης. Με αυτόν τον τρόπο είναι απόλυτα ελεγχόμενες όλες οι παράμετροι που επηρεάζουν τη διαστασιακή ακρίβεια, όπως είναι ο αριθμός πάσων και η διατήρηση σταθερής πίεσης και ταχύτητας πρόωσης καθ'όλη τη διάρκεια της εκχόνδρισης.

Ωστόσο, η αυτοματοποίηση της εκχόνδρισης παρουσιάζει τεχνικές δυσκολίες που έχουν να κάνουν με την απομάκρυνση των μικρογρεζιών από την επιφάνεια και από το διαμαντένιο δακτύλιο, καθώς υπάρχει περίπτωση (όπως αναφερθηκε στην παράγραφο 6.2) αυτά να δημιουργήσουν ανεπιθύμητες ταλαντώσεις. Συνεπώς, σε επόμενο στάδιο μπορεί να δημιουργηθεί μία παλέτα εργαλείων που θα καθαρίζει αυτόματα το δακτύλιο με οινόπνευμα και τρόχισμα επάνω σε σμυριδόπανο και την επιφάνεια μόνο με οινόπνευμα και αέρα υπό πίεση για την απομάκρυνση των αποβλήτων. Αυτό βεβαίως, αφού αναπτυχθεί μέθοδος για την αυτόματη αναγνώριση αυτών των ταλαντώσεων το οποίο θα εντοπίζει τότε ξεκινάει να ταλαντώνεται πέραν του αποδεκτού το εργαλείο (πιθανώς με ηχητικό εντοπισμό ή επιταχυνσιόμετρο) και θα δίνει σήμα για να ξεκινήσει η διαδικασία καθαρισμού, μετά το πέρας της οποίας θα δίνεται νέο σήμα για συνέχιση της εκχόνδρισης από το σημείο στο οποίο αυτή είχε προσωρινά διακοπεί.

Συγκρίνοντας την εικόνα 6-1 (Δεξιά) με την εικόνα 6-3, παρατηρούμε ότι ναι μεν και οι δύο επιφάνειες έχουν φτάσει σε ποιότητα “καθρέφτη”, ωστόσο, η ποιότητα του πομπέ δοκιμίου (6-1) είναι ανώτερη του επιπέδου (6-3). Αυτό μπορεί να αποδοθεί στο ότι το πομπέ δοκίμιο, σε αντίθεση με το επίπεδο, αποτελείται από βαμμένο χάλυβα και όπως εξηγήθηκε στην παράγραφο 2.1 (και συγκεκριμένα μέσω του σχήματος 2-1) η ποιότητα της στίλβωθείσας επιφάνειας που μπορούμε να αποκτήσουμε είναι ανώτερη για χάλυβες που έχουν υποστεί βαφή, λόγω βέλτιστης διάταξης μορίων (καλύτερη γεωμετρία).

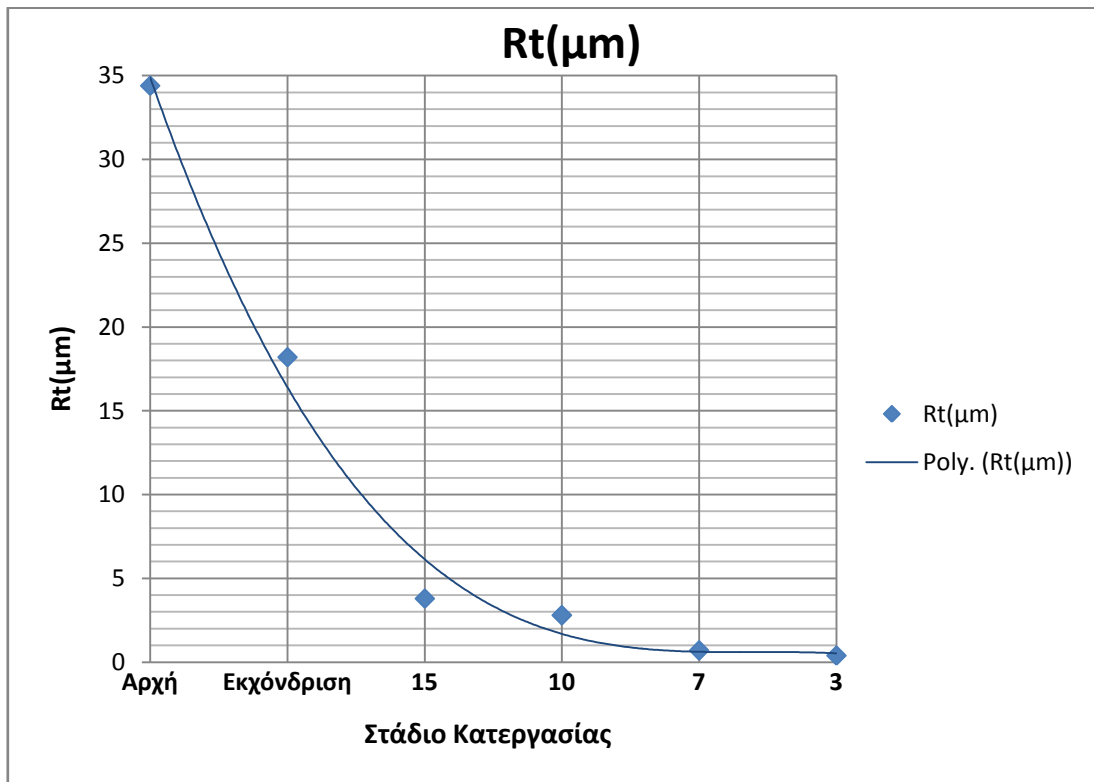
Στα σχήματα 6-3, 6-4 και 6-5 παρατίθενται τα δεδομένα του πίνακα 6-1 υπό διαγραμματική μορφή για την καλύτερη δυνατή ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Στα σχήματα 6-3 και 6-4 παριστάνεται η απομείωση της μέσης τραχύτητας R_a και της peak-to-valley τραχύτητας R_t αντίστοιχα καθώς προχωράμε στα διάφορα στάδια της διαδικασίας στίλβωσης. Στο διάγραμμα 6-5 παριστάνεται ο τρόπος με τον οποίο μειώνεται το βάρος του δοκιμίου που γυαλίζουμε ενώ προχωράμε στα διάφορα

στάδια της διαδικασίας. Στα διαγράμματα τραχύτητας, όλα τα σημεία είναι εφικτό να προσεγγιστούν από ένα πολυώνυμο (ή εναλλακτικά από εκθετική συνάρτηση). Ωστόσο, παρατηρούμε ότι, αν προσπαθήσουμε να προσεγγίσουμε όλα τα σημεία του διαγράμματος 6-5 με την ίδια πολυωνυμική, εκθετική, ή οποιασδήποτε άλλης μορφής συνάρτηση, δεν οδηγούμαστε σε ομαλό αποτέλεσμα. Για αυτό το λόγο και η μεταβολή βάρους κατά την εκχόνδριση απεικονίζεται με γραμμική μεταβολή, ενώ τα υπόλοιπα σημεία (γυάλισμα μέσω διαμανταλοιφών) προσεγγίζονται με πολυώνυμο δευτέρου βαθμού.

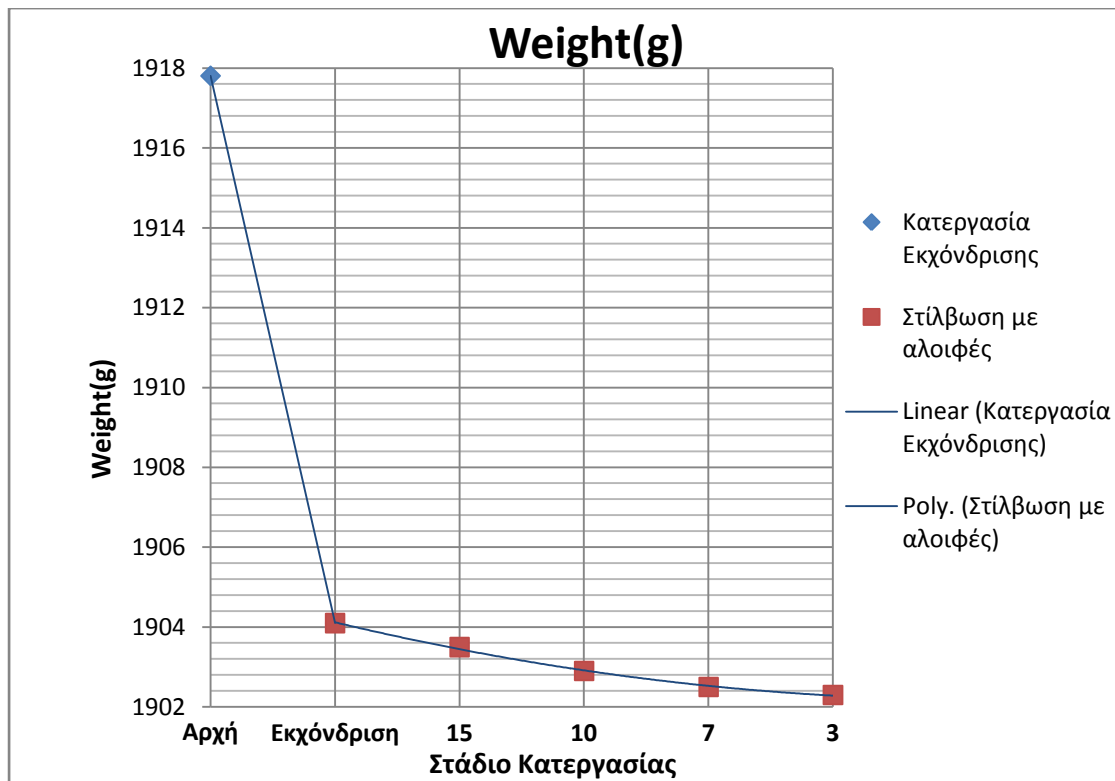


Σχήμα 6-3. Μέση τραχύτητα μετά τα διάφορα στάδια της στίλβωσης.

Αυτή η παρατήρηση είναι πολύ σημαντική, καθώς αποδεικνύει το ότι η εκχόνδριση και το γυάλισμα με διαμανταλοιφές αποτελούν δύο διαφορετικά είδη κατεργασίας που "συγχωνεύονται" κάτω από ένα γενικότερο πλάνο εργασιών, που αποτελεί τη στίλβωση μίας επιφάνειας. Συγκεκριμένα, η εκχόνδριση είναι "στεγνή" κατεργασία αποβολής σχετικά μεγάλης ποσότητας υλικού. Αντίθετα, το γυάλισμα με διαμανταλοιφές γίνεται με χρήση λιπαντικού υγρού και χαρακτηρίζεται περισσότερο ως κατεργασία επιφανειακής συμπύκνωσης μορίων παρά ως κατεργασία αποβολής υλικού. Επίσης, η εκχόνδριση είναι αυτή η διαδικασία που καθορίζει τη διαστασιακή ακρίβεια του δοκιμίου, ενώ η στίλβωση με διαμανταλοιφές έχει ελάχιστη επίδραση στη διαστασιακή ακρίβεια, ωστόσο καθορίζει σχεδόν εξ' ολοκλήρου την μορφή της τελικής επιφάνειας (τελικό επίπεδο τραχύτητας).



Σχήμα 6-4. Peak-to-Valley τραχύτητα μετά τα διάφορα στάδια της στίλβωσης.



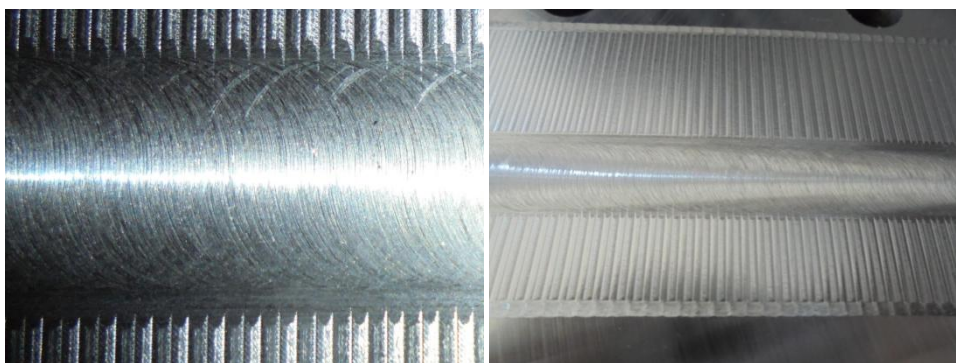
Σχήμα 6-5. Βάρος σπιδρωθέντος δοκιμίου μετά τα διάφορα στάδια της στίλβωσης.

Παρότι η εκχόνδριση και το γυάλισμα με διαμανταλοιφές είναι διαφορετικά είδη κατεργασιών, επιτυγχάνουν αξιοσημείωτα ομοιόμορφη συμπεριφορά στην απομείωση της τραχύτητας του σπιλβωθέντος δοκιμίου. Αυτό είναι ενδεικτικό της σωστής μετάβασης από το στάδιο της εκχόνδρισης στο στάδιο του "lapping".

Ας σημειωθεί ότι αρχική τραχύτητα $R_t \sim 35$ μm είναι ενδεικτική της ποιότητας επιφανείας που προκύπτει από φρεζάρισμα σε κέντρο κατεργασιών με σφαιρικό κονδύλι, δηλαδή της κατεργασίας που μας ενδιαφέρει ως βάση για τον G-code μας.

6.4 Αποτελέσματα και παρατηρήσεις αυτοματοποιημένων πειραμάτων.

Στις αυτοματοποιημένες δοκιμές, αρχικά επιλέχθηκαν τέσσερις κατάλληλοι ελαστικοί σύνδεσμοι για τη βάση, ώστε να έχουν αρκετό μήκος (ίδιο μεταξύ τους) και ελαστικότητα της τάξεως που επιθυμούμε για κατάλληλο έλεγχο του επιπέδου της ασκούμενης δύναμης. Στη συνέχεια, προσδέθηκε η κάτω άκρη του καλωδίου της ντίζας του grinder στη βάση, ενώ η βάση συνδέθηκε στο κέντρο κατεργασιών HAAS με κατάλληλη κεφαλή συσπασμένου σφιγκτήρα. Αρχικό στάδιο είναι η εκχόνδριση, άρα δέσαμε το διαμαντένιο δακτύλιο μέσω του mandrel στη βάση και δεν χρησιμοποιήσαμε λιπαντικό υγρό. Η απαιτούμενη δύναμη για το στάδιο της εκχόνδρισης αντιστοιχεί σε 600-800 g. Αρχικά, με έναν ανεξίτηλο μαρκαδόρο σημαδέψαμε το σημείο στο οποίο ισορροπεί η βάση όταν είναι ελεύθερη (χωρίς επαφή του δακτυλίου σε επιφάνεια), υπό της επίδραση μόνο του βάρους της και των δυνάμεων ελαστικότητας των συνδέσμων. Στη συνέχεια πιάσαμε το δακτύλιο επί του ηλεκτρονικού ζυγού και κατεβάσαμε τη βάση χαμηλώνοντας τον άξονα z του κέντρου μέχρι να πάρουμε ένδειξη 600 g, οπότε και σημαδέψαμε εκ νέου με το μαρκαδόρο. Δέσαμε το δοκίμιο στη μέγγενη και ρυθμίσαμε το grinder στην σκάλα 4. Κατόπιν δώσαμε στροφές κατεβάζοντας το εργαλείο και ακουμπώντας το επί της επιφάνειας μέχρι να φτάσουμε στην ένδειξη των 600 g. Με τη λειτουργία "Hand Jog" κινηθήκαμε με προσεγγιστικά σταθερή πρόωση κατά μήκος του άξονα x, επανερχόμενοι μετά από κάθε πάσο στο σημείο πρώτης επαφής. Μετά από 2-3 πάσα σηκώσαμε την κεφαλή, σβήσαμε το grinder και παρατηρήσαμε τη σκόνη σιδήρου επί του δοκιμίου, ενώ οι αυλακώσεις εξομαλύνονταν. Καθαρίσαμε με οινόπνευμα δοκίμιο και δακτύλιο, και τροχίσαμε λίγο το δακτύλιο με σμυριδόπανο P120. Στα επόμενα 3-4 πάσα κατεβάσαμε λίγο ακόμα την κεφαλή, εφαρμόζοντας ελεγχόμενα αυξανόμενη δύναμη, μέχρι που οι αυλακώσεις εξαφανίστηκαν εντελώς και παρέμειναν μόνο οι ελαφρές χαραγές του διαμαντένιου δακτυλίου, ικανοποιώντας τη συνθήκη οπτικού ελέγχου για μετάβαση σε επόμενο στάδιο που διατυπώθηκε παραπάνω, στην παράγραφο 6.2.



Εικόνα 6-4. Επιφάνεια επίπεδου δοκιμίου με αυλακώσεις μετά την εκχόνδριση.

Στην εικόνα 6-4 παρατηρούμε την ομοιομορφία των χαραγών που αφήνει ο διαμαντένιος δακτύλιος, σε συνδυασμό με την άψογη επιτευχθείσα διαστασιακή ακρίβεια. Το πρώτο, καθώς όλες οι χαραγές ακολουθούν το ίδιο κυκλικό pattern (μοτίβο) και έχουν το ίδιο βάθος. Το δεύτερο, καθώς, αν εστιάσουμε στο σημείο που οι αυλακώσεις εξαφανίζονται, θα διαπιστώσουμε ότι το βάθος της δημιουργηθείσας εκχονδρισμένης περιοχής δεν έχει υπερβεί το βάθος κοιλάδας των αυλακώσεων (θα συνιστούσε "υπεραφαίρεση" υλικού), χωρίς παράλληλα να έχει αφήσει κάθετες γραμμές σαν υπολείμματα αυτών (θα συνιστούσε ελλειπή αφαίρεση υλικού).

Μία ακόμα σημαντική παρατήρηση αναφέρεται στο "τρέμουλο" που αναμέναμε σαν αποτέλεσμα διεύθυνσης γραμμών στην επιφάνεια κοπής του δακτυλίου, ή εκτεταμένου συρσίματός τους στην γυαλιζόμενη επιφάνεια. Αυτό εμφανίστηκε μεν κατά την αυτοματοποιημένη δοκιμή, ωστόσο μόνο ως ταλάντωση του καλωδίου της ντίζας και ηχητικά. Εξαφανίστηκε δε αμέσως, χωρίς επανεμφάνισή του όταν ο δακτύλιος διήλθε εκ νέου από το ίδιο σημείο του δοκιμίου σε επόμενο πάσο. Συμπεραίνουμε ότι η έλλειψη στιβαρότητας συγκράτησης του εργαλείου από το ανθρώπινο χέρι κατά τη χειροκίνητη στίλβωση μεγιστοποιεί το συγκεκριμένο πρόβλημα, το οποίο σχεδόν εξαφανίζεται χάρη στην στιβαρότητα και ακρίβεια κίνησης της μηχανής. Βέβαια, συνιστάται επιμελής καθαρισμός και τρόχισμα του δακτυλίου όπως έχει περιγραφεί για περαιτέρω ελαχιστοποίηση της ταλάντωσης, ωστόσο αυτή δεν αποτελεί παράγοντα που θα μας αναγκάσει να διακόψουμε το πάσο για να πραγματοποιήσουμε τον καθαρισμό και το τρόχισμα.

Τέλος, η ομοιομορφία και διαστασιακή ακρίβεια που επιτυγχάνουμε γίνεται αντιληπτή αν παρατηρήσουμε τις (τέλεια οριζόντιες) γραμμές φωτός που ανακλώνται στην επιφάνεια της εικόνας 6-4, σε αντιπαράβολή με το παραμορφωμένο είδωλο της εικόνας 6-3. Επίσης, η ομοιομορφία και τελειότητα της αυτοματοποιημένης εκχόνδρισης σε σύγκριση με τη χειροκίνητη γίνεται εμφανής αν συγκρίνουμε την

εικόνα 6-4 (αριστερά) με την εικόνα 6-2 (αριστερά) όπου φαίνονται περιοχές διαφορετικής φωτεινότητας (ανομοιομορφίες).

Έτσι, ενώ μετά τη δημιουργία αυλακώσεων είχαμε ομοιόμορφη μέση τραχύτητα $R_a = 8.2 \mu m$ και peak-to-valley τραχύτητα $R_t = 43 \mu m$, μετά την εκχόνδριση οι τιμές αυτές μειώθηκαν σε $R_a = 3 \mu m$ και $R_t = 24 \mu m$. Η απομείωση των μεγεθών είναι αντίστοιχη με αυτή της χειροκίνητης εκχόνδρισης, ωστόσο η διαφορά έγκειται στην ομοιομορφία, καθώς σε όποιο σημείο της εκχονδρισμένης επιφάνειας και αν μετρούσαμε μετά την αυτοματοποιημένη εκχόνδριση, η διαφορά ήταν αμελητέα (μικρότερη των $0.5 \mu m$), ενώ στη χειροκίνητη έφτανε και τα $2.5 \mu m$ (αντίστοιχη συμπεριφορά απομείωσης μέσης τιμής, με πολύ μεγαλύτερη διακύμανση). Όταν δε μειώσαμε την πρόωση και κάναμε ένα ακόμα πάσο, η peak-to-valley μειώθηκε σε 11 με 15 μm και η μέση τραχύτητα σε $1.8 \mu m$, με πρόωση 130 mm/min (κρίνεται προσεγγιστικά ως ιδανική πρόωση για εκχόνδριση, ωστόσο απαιτείται διεξαγωγή σειράς πειραμάτων κατά Taguchi). Συμπεραίνουμε ότι, ανεξάρτητα του αρχικού επιπέδου τραχύτητας αυλακώσεων, ο διαμαντένιος δακτύλιος δύναται να φτάσει την επιφάνεια σε επίπεδα peak-to-valley 10-15 μm και μέσης 1.8-2.5 μm , εάν εφαρμοστεί πρόωση περί της κριθείσας ως “ιδανικής”.

Όπως παρατηρείται στην εικόνα 6-4, το ευθύγραμμο μονοπάτι που ακολουθείται στο πείραμα επιλέχθηκε να είναι κάθετο στις αυλακώσεις που δημιούργησε το σφαιρικό κονδύλι. Η επιλογή ενός τέτοιου μονοπατιού επιταχύνει την εκχόνδριση, διότι η κίνηση του δακτυλίου ευνοεί την “καταστροφή” των αυλακώσεων, καθώς η σύγκρουση των μικροκόκκων διαμαντιού του δακτυλίου με τα όρη γίνεται τόσο μέσω της πρόωσης, όσο και της περιστροφικής κίνησης του δακτυλίου. Αντίθετα, αν ακολουθούσαμε τη φορά των αυλακώσεων, τότε, με ευθύγραμμο μονοπάτι, η μόνη κίνηση που θα ευνοούσε την “καταστροφή” των αυλακώσεων θα ήταν η περιστροφική που προσδίδεται από το grinder.

Ωστόσο, μετά το στάδιο της εκχόνδρισης ακολουθεί το γυάλισμα με χρήση διαμανταλοιφών μορφοποιημένων σε μία πάστα χάρη στη χρήση του λιπαντικού διαλύματος γλυκόλης (ή γλυκερίνης) και νερού. Όταν το ευθύγραμμο μονοπάτι είναι κάθετο στις αυλακώσεις, τότε η κίνηση του δακτυλίου είναι κάθετη και στις κοιλάδες, οι οποίες πλέον λειτουργούν ως “οδοί διαφυγής” της συγκεκριμένης πάστας, καθώς η φυγόκεντρος δύναμη που της ασκείται από την περιστροφή του δακτυλίου απωθεί την πάστα προς τα τοιχώματα του μονοπατιού. Η πάστα τελικά διαφεύγει εύκολα μέσω των κοιλάδων και απαιτείται ανανέωση της διαμανταλοιφής και του λιπαντικού διαλύματος. Αυτό οδηγεί σε αύξηση του χρόνου στίλβωσης, καθώς απαιτούνται πολλά πάσα και προσεκτική επιλογή πρόωσης, στροφών και κάθετης δύναμης για

την ελαχιστοποίηση των φυγόκεντρων δυνάμεων, ώστε να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα.



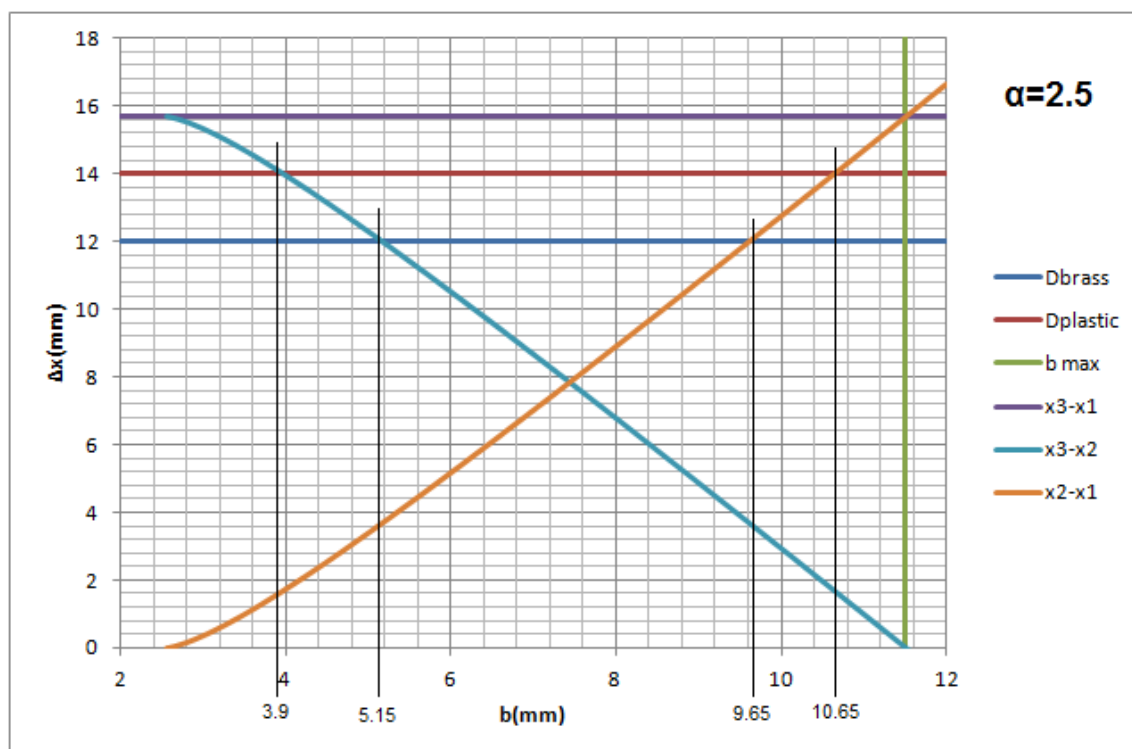
Εικόνα 6-5. Πειραματική διάταξη αυτοματοποιημένης στίλβωσης (2^η βάση, εκχόνδριση με διαμαντένιο δακτύλιο).

Το μοντέλο που προτείνεται σε αυτή την εργασία αναπτύχθηκε ώστε να αξιοποιείται το tool path που χρησιμοποιείται από τη φρέζα CNC για να δημιουργηθεί ένα καλούπι με χρήση κονδυλίων. Συνεπώς, σε πραγματική εφαρμογή, το μονοπάτι γυαλίσματος θα ακολουθούσε τη φορά των αυλακώσεων και δεν θα ήταν κάθετο σε αυτές, οπότε θα αποφεύγαμε το πρόβλημα διαφυγής της διαμαντόπαστας λόγω φυγόκεντρων δυνάμεων. Η χρήση αυτού του tool path ως guide line για την

δημιουργία τροχοειδούς μοτίβου ως τελικού μονοπατιού στιλβωτικού εργαλείου θα δημιουργούσε την απαιτούμενη κάθετη προς τις αυλακώσεις κίνηση για να επιταχύνει την εκχόνδριση και τη στίλβωση. Συνεπώς, στο μοντέλο μας, η εκχόνδριση θα γίνεται αφενός μέσω της περιστροφικής κίνησης που προσδίδει στο δακτύλιο το grinder και αφετέρου μέσω της κάθετης προς τις αυλακώσεις συνιστώσα κίνησης που προσδίδει το trochoid pattern του μονοπατιού γυαλίσματος.

Στη συνέχεια έπρεπε να επιλέξουμε την τροχοειδή που θα χρησιμοποιηθεί για το αυτοματοποιημένο πείραμα. Από τα σχήματα 3-11, 3-12 και 3-13 κρίνουμε ότι η τιμή της παραμέτρου $\alpha=2.5$ μας προσφέρει αρκετά ικανοποιητικό εύρος ως προς τις αποδεκτές τιμές της παραμέτρου b τόσο για brass-diamond, όσο και για plastic polishing ring. Πλοτάρουμε τις σχέσεις (3-28α) έως (3-28γ) για $\alpha=2.5$ σε διάγραμμα με οριζόντιο άξονα το b και κατακόρυφο το x , ώστε να εντοπίσουμε με ακρίβεια την περιοχή που επαληθεύονται οι συνθήκες των σχέσεων (3-18), (3-19) και (3-20).

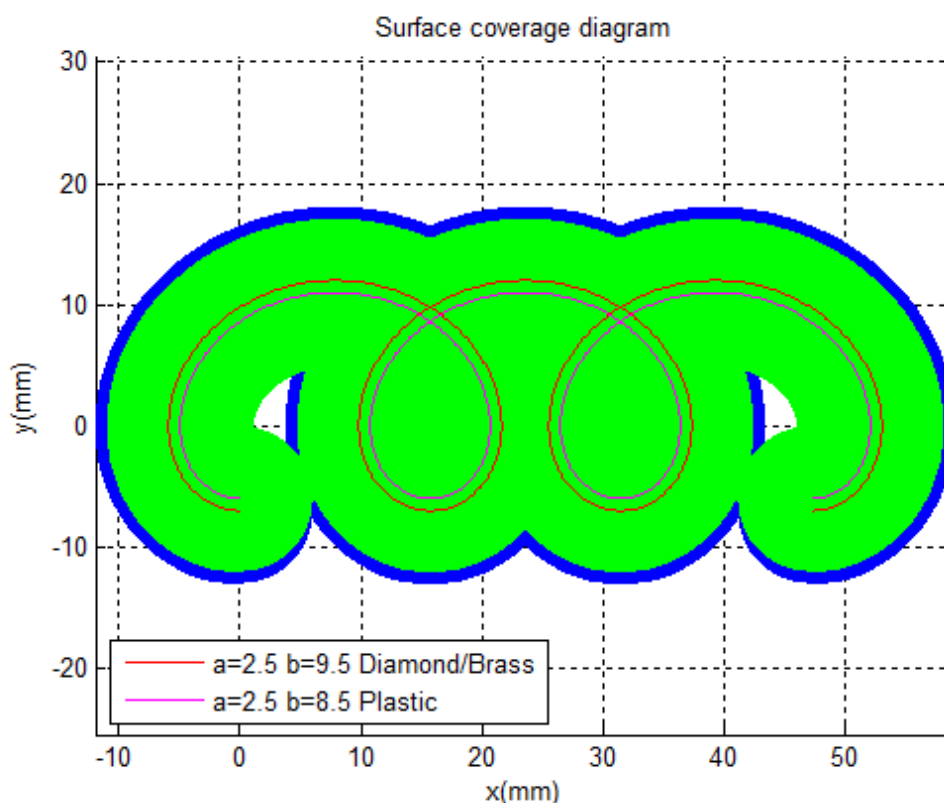
Οι συνθήκες (3-20α) και (3-20β) ικανοποιούνται για κάθε τιμή του b , καθώς η οριζόντια ευθεία $(x_3 - x_1)$ βρίσκεται πάνω και από τις δύο οριζόντιες $D_{Brass/Diamond}$ και $D_{Plastic}$.



Σχήμα 6-6. Προσδιορισμός περιοχής αποδεκτών b για τροχοειδή καμπύλη παραμέτρου $\alpha=2.5$.

Βάσει των συνθηκών (3-18) και (3-19), για να είναι μία τιμή του b αποδεκτή για τον μπρούντζινο ή τον διαμαντένιο δακτύλιο, πρέπει οι καμπύλες $(x_3 - x_2)$ και $(x_2 - x_1)$ να βρίσκονται κάτω της οριζόντιας ευθείας $D_{Brass/Diamond}$ για τη συγκεκριμένη τιμή του b . Αντίστοιχα, για να είναι κάποιο b αποδεκτό για τον πλαστικό δακτύλιο, πρέπει και οι δύο αυτές καμπύλες να είναι κάτω της οριζόντιας ευθείας $D_{Plastic}$ για τη συγκεκριμένη τιμή του b . Από το σχήμα 6-6 προκύπτει ότι, για πλαστικό δακτύλιο απαιτείται $3.9 \leq b \leq 10.65$ ενώ για διαμαντένιο και μπρούντζινο δακτύλιο, η περιοχή αποδεκτών τιμών είναι η $5.15 \leq b \leq 9.65$.

Επιλέγουμε για την εκχόνδριση με το διαμαντένιο δακτύλιο και τη στίλβωση με μπρούντζινους δακτυλίους $b=9.5$. Επειδή ωστόσο ο πλαστικός δακτύλιος έχει μεγαλύτερη διάμετρο, και αν επιλεγθεί το ίδιο b , θα υπάρχουν περιοχές στις οποίες δεν θα πατάει καλά στην εκχονδρισμένη περιοχή, καθώς το άκρο του θα ανεβαίνει στις παραμένουσες αυλακώσεις, επιλέγουμε μικρότερο b για τη στίλβωση με πλαστικούς δακτυλίους. Επιλέγεται για τη στίλβωση με πλαστικό δακτύλιο $b=8.5$, διατηρώντας σταθερή την τιμή της παραμέτρου $a=2.5$.



Σχήμα 6-7. Υπέρθεση εκχόνδρισης (μπλε) και στίλβωσης με πλαστικό δακτύλιο (πράσινο).

Στο σχήμα 6-7 η μπλε περιοχή απεικονίζει την εκχονδρισμένη περιοχή, δηλαδή αυτή που καλύπτεται με διαμαντένιο (ή μπρούντζινο) δακτύλιο. Η πράσινη

απεικονίζει την περιοχή που καλύπτεται κατά τη στίλβωση με πλαστικό δακτύλιο. Παρατηρούμε ότι η εκχονδρισμένη περιοχή είναι μεγαλύτερη της στιλβωθείσας, πράγμα εμφανές λόγω της μπλε ζώνης της εικόνας. Αυτό είναι άλλωστε επιθυμητό, ώστε να αποφευχθούν φαινόμενα αστάθειας του πλαστικού δακτυλίου ή μη επαρκούς επαφής, πράγμα που θα επηρέαζε αρνητικά το αποτέλεσμα της στίλβωσης.

Παρατηρήθηκε ότι το μοτίβο κάλυψης επιφανείας επηρεάζει καταλυτικά τη βέλτιστη τιμή της πρόωσης, καθώς, για εκχόνδριση σε ευθεία γραμμή, το ιδανικό είναι περίπου 130 mm/min, τιμή που θεωρείται υπερβολικά μικρή και οδηγεί σε ανεπιθύμητες ανομοιομορφίες στην περίπτωση που χρησιμοποιείται τροχοειδές μοτίβο. Συμπεραίνουμε ότι απαιτούνται λεπτομερείς σειρές πειραμάτων για τον προσδιορισμό της βέλτιστης πρόωσης και του συνδυασμού παραμέτρων τροχοειδούς για τη βέλτιστη ποιότητα στίλβωσης, καθώς ακόμα και μικροδιαφορές είναι δυνατό να οδηγήσουν σε αποτυχημένη απόπειρα στίλβωσης.

Παράλληλα, απαιτείται επέκταση της μεθόδου που συστήνεται στην συγκεκριμένη εργασία με εισαγωγή μεθόδου ακριβούς μέτρησης και ελέγχου της δύναμης, καθώς η δυνατότητα διατήρησης σταθερού επιπέδου κάθετης δύναμης κατά τη διάρκεια του γυαλίσματος, στις τιμές που προσδιορίστηκαν στις προηγούμενες παραγράφους είναι καταλυτικής σημασίας για την επιτυχία της διαδικασίας.

7 Συμπεράσματα και μελλοντική έρευνα

7.1 Συμπεράσματα.

Σε αυτό το τμήμα της εργασίας παρουσιάζονται τα βασικότερα συμπεράσματα, καθώς και μία σύνοψη των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν σε κάθε κεφάλαιο της εργασίας.

Στην εργασία αρχικά εκτέθηκαν βασικά στοιχεία θεωρίας σχετικά με τη στίλβωση, τις κατηγορίες στις οποίες αυτή διαμερίζεται, τα εργαλεία που υπάρχουν για την εκάστοτε υποκατηγορία γυαλίσματος καθώς και βασικά στοιχεία μεθοδολογίας πειραμάτων και γυαλίσματος δοκιμών. Ωστόσο, όλα ήταν σε πολύ πρώιμο στάδιο και έπρεπε να αναπτυχθούν καλύτερα για να δομηθεί μία αυτοματοποιημένη, σε όσο το δυνατό μεγαλύτερο βαθμό, μέθοδος στίλβωσης.

Κατόπιν, έγινε εκτενής μαθηματική ανάλυση της έννοιας της τροχοειδούς καμπύλης, η οποία και ορίστηκε πλήρως με χρήση δύο παραμέτρων, των a και b , και μίας οδηγού καμπύλης. Αρχικά, ο ορισμός έγινε θεωρώντας σαν οδηγό καμπύλη τον άξονα Ox , και στη συνέχεια διατυπώθηκαν δύο μοντέλα για την χάραξη τροχοειδούς καμπύλης με χρήση οποιασδήποτε συνάρτησης του επιπέδου Oxy ως οδηγού καμπύλης. Το πρώτο μοντέλο αναφέρεται σε μικρές κλίσεις και αποκλίνει αρκετά όσο η οδηγός καμπύλη γίνεται πιο κάθετη, ενώ το δεύτερο μοντέλο είναι απόλυτα ακριβές, είναι ωστόσο αρκετά πιο χρονοβόρα, καθώς απαιτεί τρέξιμο κώδικα, που παρατίθεται στο παράρτημα Α.1. Ας σημειωθεί ότι και τα δύο μοντέλα με ελάχιστες προσαρμογές θα είναι εφικτό να χρησιμοποιήσουν οποιαδήποτε καμπύλη του επιπέδου σαν οδηγό καμπύλη, ακόμα και αν δεν πρόκειται για συνάρτηση (αν δηλαδή σε κάθε τιμή του x αντιστοιχίζονται παραπάνω από μία τιμές του y). Επίσης, αναλύθηκαν και διατυπώθηκαν με τη χρήση της τροχοειδούς οι γεωμετρικοί περιορισμοί για πλήρη και ομοιόμορφη κάλυψη επίπεδης επιφάνειας από στιλβωτικό δακτύλιο, και χρησιμοποιήθηκαν για την επιλογή κατάλληλων τιμών παραμέτρων a και b στα πειράματα. Εκτίθενται σχέσεις και διαγράμματα που δείχνουν αποδεκτούς και μη αποδεκτούς συνδυασμούς παραμέτρων λόγω καταπάτησης διαφορετικών συνθηκών για την πλήρη κατανόηση της μεθοδολογίας.

Στη συνέχεια, με δεδομένο ότι το κέντρο κατεργασιών δεν μπορεί να παρέχει όλο το εύρος ταχυτήτων περιστροφής που απαιτεί η στίλβωση ως διαδικασία, κατασκευάστηκαν δύο βάσεις πρόσδεσης της άκρης του grinder στο κέντρο κατεργασιών HAAS του Εργαστηρίου Κατεργασιών του ΕΜΠ, καθεμία από τις οποίες προσφέρει διαφορετικές δυνατότητες και συνιστάται για στίλβωση με διαφορετικά

εργαλεία γυαλίσματος. Η πρώτη χρησιμοποιείται με αποστάτες μεταξύ των δύο τάκων αν θέλουμε να είναι τελείως άκαμπτη, ώστε να χρησιμοποιηθεί με δισκάκια στίλβωσης από σμιριδόπανο ή γυαλόχαρτο, ή με σχετικά σκληρά ελατήρια θλίψεως ώστε να έχει μικρή μεν, υπαρκτή δε υποχωρητικότητα και να χρησιμοποιηθεί με πέτρες γυαλίσματος. Η δεύτερη βάση ενσωματώνει τη χρήση γραμμικών ρουλεμάν και ελαστικών συνδέσμων τοποθετημένων κατάλληλα ώστε να αποσυσπειρώνονται με την παραμικρή μεταβολή δύναμης που ασκείται στο κάτω άκρο του grinder (επί του εργαλείου) και είναι ιδανική για ακριβέστατη εποπτεία της ασκούμενης δύναμης σε στίλβωση με διαμανταλοιφές και χρήση στιλβωτικών δακτυλίων, συνοδευόμενη βέβαια με κατάλληλο ηλεκτρονικό ζυγό ή δυναμόμετρο για ακριβή μέτρηση της δύναμης. Σημειώνεται βέβαια ότι, ενώ είναι δυνατή η μέτρηση της δύναμης, δε δημιουργήθηκε σύστημα ελέγχου για διατήρησή της σε σταθερό επίπεδο, πράγμα που θα απαιτούσε αλληλεπίδραση δυναμόμετρου και κέντρου κατεργασιών με μεσολάβηση κατάλληλου ελεγκτή PID. Στην εργασία και στο CD-ROM παρατίθενται τα κατασκευαστικά σχέδια των δύο βάσεων και φωτογραφίες αυτών, ενώ αναφέρονται αναλυτικά τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα καθεμίας εξ αυτών και οι περιπτώσεις στις οποίες ενδείκνυται η χρήση έκαστης από αυτές για πληρότητα της μελέτης.

Εν συνεχεία, μελετήθηκαν και προσδιορίστηκαν οι γεωμετρικοί περιορισμοί που εισάγονται από τη συναρμογή mandrel και δακτυλίων στίλβωσης ως προς τη μέγιστη γωνία στροφής του δακτυλίου, ενώ αναπτύχθηκε ένα μοντέλο ανάλυσης της επιφάνειας προς στίλβωση που βασίζεται στη διαφοροποίηση αυτής προς αποκόμιση διδιάστατων προφίλ επιφανείας και στον εντοπισμό των ισοδύναμων σημείων επαφής του δακτυλίου σε αυτό το προφίλ καθώς το εργαλείο "σαρώνει" την επιφάνεια κατά τη διάρκεια της στίλβωσης. Αυτό είναι το αναγκαίο βήμα για έλεγχο σχετικά με υπέρβαση της μέγιστης γωνίας στροφής δακτυλίου σε κάθε περιοχή της επιφάνειας, άρα καθορίζουμε άμεσα τις υποπεριοχές εκείνες του καλουπιού στις οποίες ο δακτύλιος δεν έχει πρόσβαση σε κέντρο κατεργασιών τριών αξόνων, αλλά απαιτείται είτε άλλο εργαλείο, είτε στροφή του πλατώ σε κέντρο τεσσάρων ή και πέντε αξόνων. Παράλληλα, γίνονται παρατηρήσεις επί αυτού του μοντέλου και ορίζεται με παραμετρικό και μη τρόπο η έννοια της ακτίνας καμπυλότητας, σαν μέσο ελέγχου καταλληλότητας του δακτυλίου, αλλά και είδους κάλυψης της προς στίλβωση επιφάνειας (σχήμα 5-9). Τέλος, εκτίθεται ο τρόπος με τον οποίο μοντελοποιούμε τη δημιουργία αρχικής τραχύτητας υπό μορφή αυλακώσεων από φρεζάρισμα με σφαιρικό κονδύλι, για αρχικοποίηση των πειραμάτων στίλβωσης. Η παραγόμενη επιφάνεια είναι ενδεικτική των καλουπιών που δημιουργούνται με φρεζάρισμα από κονδύλι, άρα ανταποκρίνεται πλήρως στο θέμα της συγκεκριμένης μελέτης.

Τέλος, έγιναν δύο είδη πειραμάτων, χειροκίνητα και αυτοματοποιημένα με τη μέθοδο που περιγράφεται στην αντίστοιχη παράγραφο. Μετρήθηκαν μεγέθη όπως η αρχική και τελική τραχύτητα των δοκιμίων καθώς και η μεταβολή βάρους των δοκιμίων μεταξύ των διαφόρων σταδίων της στίλβωσης και έγιναν παρατηρήσεις σχετικά με το είδος κατεργασίας κάθε σταδίου και με τα βήματα που απαιτούνται να γίνουν για την πλήρη αυτοματοποίηση της στίλβωσης με στιλβωτικούς δακτυλίους. Χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια με αυλακώσεις δημιουργημένες με μέθοδο που περιγράφεται πλήρως στην παράγραφο 5.2 αλλά και πομπέ με ατάκτως τραχιά επιφάνεια προς στίλβωση δημιουργημένη από ηλεκτροδιάβρωση (EDM). Γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων και εντοπίζονται λεπτομέρειες που μας οδηγούν στην αναγνώριση λαθών, ενώ διατυπώνεται λεπτομερέστατη μεθοδολογία χειροκίνητης και αυτοματοποιημένης στίλβωσης προς απόκτηση του βέλτιστου δυνατού αποτελέσματος.

7.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Στη συγκεκριμένη εργασία πραγματοποιείται μία πρώτη απόπειρα προσέγγιση της περίπλοκης διαδικασίας της στίλβωσης. Εισάγονται μαθηματικά και γεωμετρικά μοντέλα περιγραφής και καθορισμού του tool path και δίνονται συνθήκες καθορισμού αποδεκτού συνδυασμού παραμέτρων τροχοειδούς για πλήρη και ομοιόμορφη κάλυψη επίπεδης επιφάνειας.

Επόμενες μελέτες θα ήταν θετικό να εστιάσουν στον ακριβή προσδιορισμό του ιδανικού συνδυασμού παραμέτρων τροχοειδούς για βελτιστοποίηση της ταχύτητας και της ποιότητας στίλβωσης με παραμέτρους όπως η ταχύτητα περιστροφής, η πρόωση και η πίεση επί της προς στίλβωση επιφάνειας. Κατόπιν, θα δινόταν η δυνατότητα προσαρμογής του μοντέλου που προτάθηκε στη συγκεκριμένη εργασία σε μη επίπεδη επιφάνεια, δίνοντας έμφαση σε κυρτές, κοίλες και περιοχές σημείων καμπής. Τέτοιου είδους μελέτες θα ήταν δυνατό να μελετήσουν και την μορφή της καλυπτόμενης επιφάνειας μέσω δακτυλίου στίλβωσης, χρησιμοποιώντας πιθανότατα την πρωτεύουσα και δευτερεύουσα ακτίνα καμπυλότητας και κάποια παραμετροποίηση της επιφάνειας. Με αυτόν τον τρόπο θα ήταν εφικτή η προσαρμογή των περιορισμών των σχέσεων (3-18) έως (3-20) ώστε να είναι εφαρμόσιμοι σε τρισδιάστατη επιφάνεια.

Σε επίπεδο ορισμού τροχιάς μία ιδέα που προτείνεται είναι να προσαρμοστεί ο κώδικας του Precise Model (Παράρτημα Α.1) με κατάλληλο τρόπο, ώστε να μπορεί να ακολουθεί οδηγό καμπύλη που δεν εκφράζεται από συνάρτηση, αλλά από

οποιαδήποτε συνεχώς παραγωγίσιμη γραμμή του επιπέδου (δηλαδή καμπύλη χωρίς κορυφές, με τη δυνατότητα για μία τετμημένη να υπάρχουν πάνω από μία τεταγμένες). Πιο συγκεκριμένα, με αυτόν τον τρόπο θα μας δινόταν η δυνατότητα να χρησιμοποιήσουμε σαν οδηγό καμπύλη κάποιο 2D Hilbert curve pattern με καμπυλωμένα άκρα, και να χρησιμοποιήσουμε αυτήν (συγκεκριμένα την προβολή της), αφού "περάσουμε" πάνω της κάποια τροχοειδή καμπύλη για να καλύψουμε την προς στίλβωση τρισδιάστατη επιφάνεια. Στη συνέχεια, αντικείμενο μελέτης θα μπορούσε να είναι η επιλογή της κατάλληλης Hilbert curve ως "guide curve" σε συνδυασμό με τροχοειδή ρυθμιζόμενων παραμέτρων για την επίτευξη καλύτερης ποιότητας και ταχύτητας στίλβωσης, συναρτήσει των παραγόντων που προαναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο.

Επιπρόσθετα, είναι δυνατή η χρήση της πρώτης βάσης που κατασκευάστηκε, είτε με αποστάτη (πλήρης ακαμψία βάσης), είτε με κάποιο ελατήριο (κάποιος βαθμός ενδοτικότητας βάσης) για να μελετηθεί η συμπεριφορά διαφορετικών εργαλείων στίλβωσης, όπως τα δισκάκια με σμυριδόπανο και οι διάφορων γεωμετριών πέτρες (κατ' αντιστοιχία με τη χρήση αποστάτη ή ελατηρίου, για λόγους που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 4.4). Θα ήταν ιδιαίτερα ενδιαφέρον να γίνει μελέτη της διαδικασίας που προηγείται της στίλβωσης (εκχόνδριση) και στην οποία χρησιμοποιούνται γυαλιστικές πέτρες με διάφορα μεγέθη κόκκου και η εξέταση των επιθυμητών levels εφαρμοζόμενης δύναμης για την ιδανική διαστασιακή ακρίβεια ανάλογα με το υλικό, το μέγεθος κόκκου και την γεωμετρία της επιφάνειας.

Τέλος, κάποια μελλοντική εργασία θα μπορούσε να εστιάσει στην προσαρμογή του κώδικα του 2D Model (Παράρτημα Α.2) ώστε να υπολογίζει την απαιτούμενη πίεση που πρέπει να ασκείται σε κάθε σημείο της επιφάνειας μέσω του στιλβωτικού δακτυλίου. Σε συνδυασμό με μελέτες προσδιορισμού μορφής καλυπτόμενης επιφάνειας από δακτύλιο ("effective contact area", όπως ονομάστηκε στην παράγραφο 5.6), μία τέτοια εργασία θα μπορούσε με χρήση αισθητήρα δύναμης και ελεγκτή PID να χρησιμοποιήσει ανάδραση και να κρατάει συνεχώς την πίεση σε επιθυμητό επίπεδο, ώστε να μην χαθεί η πολυπόθητη διαστασιακή ακρίβεια κατά την εκχόνδριση, αυτοματοποιώντας πλήρως την χρονοβόρα αυτή διαδικασία.

Συνοπτικά, οι μελλοντικές έρευνες είναι δυνατό να διαμεριστούν σε τρία πεδία. Πρώτο είναι το γεωμετρικό, δηλαδή μελέτες σχετικά με βελτιστοποίηση του tool path και τον τέλειο συνδυασμό μεταξύ τροχοειδούς και G-code δημιουργίας καλουπιού μέσω φρεζαρίσματος. Δεύτερο είναι το πεδίο επιλογής του κατάλληλου εργαλείου ανάλογα με το είδος της επιφάνειας και ο διαμερισμός της επιφάνειας του καλουπιού σε περιοχές ανάλογα με το εργαλείο που πρέπει να χρησιμοποιηθεί για στίλβωση του καθενός. Τρίτον, ως προς τους στιλβωτικούς δακτυλίου, είναι δυνατό

κατά τις φάσεις της στίλβωσης να δημιουργηθούν μέθοδοι εξέτασης του πότε δημιουργείται ταλαντωτική συμπεριφορά λόγω γρεζιού και να αυτοματοποιηθεί η διαδικασία τροχίσματος διαμαντένιου δακτυλίου και καθαρισμού επιφάνειας ώστε να γίνεται πλήρως αυτόματα τόσο ο εντοπισμός, όσο και η επίλυση του προβλήματος.

Βιβλιογραφία

- [1] Y. Mizugaki, M. Sakamoto (Kyushu Institute of Technology), K. Kamijo (Kyushu Kyoritu University), "Development of a Metal-Mold Polishing Robot System with Contact Pressure Control Using CAD/CAM Data", January 15,1990.
- [2] K. Saito (Hokkaido University), T. Miyoshi (Osaka University), T. Sasaki (Ikegami Mold Engineering Co., Ltd./Japan), "Automation of Polishing Process for a Cavity Surface on Dies and Molds by Using an Expert System", January 14,1993.
- [3] Ji Zhao, K. Kaito, T. Kondo, H. Narahara, S. Igarashi, T. Sasaki, Lei Zhang, "A New Method of Automatic Polishing on Curved Aluminium Alloy Surfaces at Constant Pressure", *Int. J. Mach. Tools Manufact. Vol. 35. No. 12. pp. 1683-1692*, 1995.
- [4] Hon-yuen Tam, Osmond Chi-hang Lui, Alberet C.K. Mok, "Robotic polishing of free-form surfaces using scanning paths", *Journal of Materials Processing Technology 95 (1999) 191-200*, May 1998.
- [5] A. Ravikiran (Mem. ASME Department of Electrical Engineering, National University of Singapore, Singapore 119260), "Wear Quantification", 2000.
- [6] M.C. Lee, S.J. Go, M.H. Lee, C.S. Jun, D.S. Kim, K.D. Cha, J.H. Ahn, "A robust trajectory tracking control of a polishing robot system based on CAM data", *Robotics and Computer Integrated Manufacturing 17 (2001) 177-183*, 2001.
- [7] J.H. Ahn, M.C. Lee, H.D. Jeong, S.R. Kim, K.K. Cho, "Intelligently automated polishing for high quality surface formation of sculptured die", *Journal of Materials Processing Technology 130–131 (2002) 339–344*, 2002.
- [8] J. P. Huissoon, F. Ismail, A. Jafari and S. Bedi, "Automated Polishing of Die Steel Surfaces", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2002) 19:285–290*, 2002.
- [9] Shih-Chieh Lin, Meng-Long Wu, "A study of the effects of polishing parameters on material removal rate and non-uniformity", *International Journal of Machine Tools & Manufacture 42 (2002) 99–103*, May 2001.
- [10] C.H. Liu, C.-C.A. Chen, Jian-Sheng Huang, "The polishing of molds and dies using a compliance tool holder mechanism", *Journal of Materials Processing Technology 166 (2005) 230–236*, August 2004.

- [11] Fengfeng Xi, David Zhou, "Modeling surface roughness in the stone polishing process", *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 45 (2005) 365–372, September 2004.
- [12] J.J. Márquez, J.M. Pérez, J. Rios, A. Vizán, "Process modeling for robotic polishing", *Journal of Materials Processing Technology* 159 (2005) 69–82, January 2004.
- [13] Avery Roswell, Fengfeng (Jeff) Xi, Guangjun Liu, "Modelling and analysis of contact stress for automated polishing", *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 46 (2006) 424–435, May 2005.
- [14] Beom-Sahng Ryuh, Sang Min Park, Gordon R. Pennock, "An automatic tool changer and integrated software for a robotic die polishing station", *Mechanism and Machine Theory* 41 (2006) 415–432, June 2005.
- [15] Fusaomi Nagata, Tetsuo Hase, Zenku Haga, Masaaki Omoto, Keigo Watanabe, "CAD/CAM-based position/force controller for a mold polishing robot", *Mechatronics* 17 (2007) 207–216, January 2007.
- [16] Xiaojun Wu, Yoshihiro Kita, Kiku Iko, "New polishing technology of free form surface by GC", *Journal of Materials Processing Technology* 187–188 (2007) 81–84, 2007.
- [17] Fusaomi Nagata, Yukihiro Kusumoto, Yoshihiro Fujimoto, Keigo Watanabe, "Robotic sanding system for new designed furniture with free-formed surface", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 23 (2007) 371–379, April 2006.
- [18] Liang Liao, Fengfeng (Jeff) Xi, Kefu Liu, "Modeling and control of automated polishing/deburring process using a dual-purpose compliant toolhead", *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 48 (2008) 1454–1463, 2008.
- [19] Markus Schinhaerl, Gordon Smith, Richard Stamp, Rolf Rascher, Lyndon Smith, Elmar Pitschke, Peter Sperber, Andreas Geiss, "Mathematical modelling of influence functions in computer-controlled polishing: Part II", *Applied Mathematical Modelling* 32 (2008) 2907–2924, October 2007.
- [20] Fang-Jung Shiou, Chih-Cheng Hsu, "Surface finishing of hardened and tempered stainless tool steel using sequential ball grinding, ball burnishing and ball polishing processes on a machining centre", *Journal of Materials Processing Technology* 205 (2008) 249–258, 2008.
- [21] Fang-Jung Shiou, Hong-Siang Ciou, "Ultra-precision surface finish of the hardened stainless mold steel using vibration-assisted ball polishing process",

- International Journal of Machine Tools & Manufacture* 48 (2008) 721–732, January 2008.
- [22] Matthieu Rauch, Emmanuel Duc, Jean-Yves Hascoet, "Improving trochoidal tool paths generation and implementation using process constraints modelling", *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 49 (2009) 375–383, 2009.
- [23] F. Klocke, O. Dambon, U. Schneider, R. Zunke, D. Waechter, "Computer-based monitoring of the polishing processes using LabView", *Journal of Materials Processing Technology* 209 (2009) 6039–6047, 2009.
- [24] S.S. Makhanov, "Space-filling curves in adaptive curvilinear coordinates for computer numerically controlled five-axis machining", *Mathematics and Computers in Simulation* 79 (2009) 2385–2402, February 2009.
- [25] Xavier Pessoles, Christophe Tournier, "Automatic polishing process of plastic injection molds on a 5-axis milling center", *Journal of Materials Processing Technology* 209 (2009) 3665–3673, 2009.
- [26] M. J. Tsai, J. F. Huang, W. L. Kao, "Robotic polishing of precision molds with uniform material removal control", *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 49 (2009) 885–895, 2009.
- [27] Guilian Wang, Yiqiang Wang, Zhixing Xu, "Modeling and analysis of the material removal depth for stone polishing", *Journal of Materials Processing Technology* 209 (2009) 2453–2463, 2009.
- [28] B.H. Wu, J.-J. Junz Wang, "A neuro-fuzzy approach to generating mold/die polishing sequences", *Journal of Materials Processing Technology* 209 (2009) 3241–3250, 2009.
- [29] Hon-yuen Tam, Haobo Cheng, "An investigation of the effects of the tool path on the removal of material in polishing", *Journal of Materials Processing Technology* 210 (2010) 807–818, 2010.
- [30] Julien Chaves-Jacob, Jean-Marc Linares, Jean-Michel Sprauel, "Improving tool wear and surface covering in polishing via toolpath optimization", *Journal of Materials Processing Technology* 213 (2013) 1661– 1668, 2013.
- [31] Uddeholms AB, "Polishing of Mould Steel", *Edition 6, 05.2013*, Classified according to EU Directive 1999/45/EC, 2013.
- [32] Κ.Χ. Γιαννάκογλου, Ι. Αναγνωστόπουλος, Γ. Μπεργελές, "Αριθμητική Ανάλυση για Μηχανικούς", ΕΜΠ, 2003, 3^η έκδοση.
- [33] https://www.olympusims.com/en/knowledge/metrology/roughness/2d_parameter/.

Παράρτημα Α

Α.1 Κώδικας Precise Model τροχοειδούς.

```
#include <stdio.h>
#include <math.h>
#define N 6280
int main()
{
    float xguide[N],yguide[N],yguide_der[N];
    float s[N];
    float theta_deg[N],theta_rad[N];
    float xc[N],yc[N],xcdot[N],ycdot[N];
    float xtemp,ytemp,xtemp2,ytemp2;
    float x_tr[N],y_tr[N],x_trdot[N],y_trdot[N];
    float distance1,distance2;
    float D[N]; /* stands for Diakrinousa */
    int i;
    /* trochoid parametres, a is circle radius */
    float a,b;
    printf("%s\n","Enter trochoidal parametre, a=");
    scanf("%f",&a);
    printf("%s\n","Enter trochoidal parametre, b=");
    scanf("%f",&b);
    /* creating guide curve */
    xguide[0]=0;
    yguide[0]=cos(xguide[0]); /* !!!! change to alter f(x) guide curve */
    yguide_der[0]=-sin(xguide[0]);/* !!!! change to alter f(x) guide curve */
    /* opening necessary .txt files */
        FILE *ad;
        ad=fopen("guide.txt","w");
        FILE *ad1;
        ad1=fopen("circle_centre_1.txt","w");
        FILE *ad2;
        ad2=fopen("circle_centre_2.txt","w");
        FILE *ad3;
        ad3=fopen("trochoid_1.txt","w");
        FILE *ad4;
        ad4=fopen("trochoid_2.txt","w");
    for(i=1;i<=(N-1);i++)
    {
        xguide[i]=xguide[i-1]+0.001;
        yguide[i]=cos(xguide[i]); /* !!!! change to alter f(x) guide curve */
        yguide_der[i]=-sin(xguide[i]); /* !!!! change to alter f(x) guide curve */
    }
    for(i=0;i<=(N-1);i++)
    {
        fprintf(ad,"%f\t%f\n",xguide[i],yguide[i]);
    }

    /* calculating guide curve arclength */
```

```

s[0]=0;
for(i=1;i<=(N-1);i++)
{
s[i]=s[i-1]+sqrt(pow((xguide[i]-xguide[i-1]),2)+pow((yguide[i]-yguide[i-1]),2));
}
/* calculating angle of circle's rotation, based on arclength */
for(i=0;i<=(N-1);i++)
{
/* theta_deg[i]=(180*s[i])/(M_PI*a); */
theta_rad[i]=s[i]/a;
}
/* calculating circle centre position */
/* initialization. top-bottom trochoid definition */
if(yguide_der[0]==0){ /* check for zero inclination on starting point */
xc[0]=xguide[0];
xcdot[0]=xguide[0];
yc[0]=yguide[0]-a;
ycdot[0]=yguide[0]+a;
}
else
{
xc[0]=xguide[0]+a*yguide_der[0]/sqrt(1+pow(yguide_der[0],2));
xcdot[0]=xguide[0]-a*yguide_der[0]/sqrt(1+pow(yguide_der[0],2));
yc[0]=yguide[0]+(xguide[0]-xc[0])/yguide_der[0];
ycdot[0]=yguide[0]+(xguide[0]-xcdot[0])/yguide_der[0];
}
for(i=1;i<=(N-2);i++)
{
if(yguide_der[i]==0){ /* check for zero inclination on internal points */
xc[i]=xguide[i];
xcdot[i]=xguide[i];
yc[i]=yguide[i]-a;
ycdot[i]=yguide[i]+a;
}
else
{
xtemp=xguide[i]+a*yguide_der[i]/sqrt(1+pow(yguide_der[i],2));
ytemp=yguide[i]+(xguide[i]-xtemp)/yguide_der[i];
xtemp2=xguide[i]-a*yguide_der[i]/sqrt(1+pow(yguide_der[i],2));
ytemp2=yguide[i]+(xguide[i]-xtemp2)/yguide_der[i];
}
distance1=sqrt(pow((xtemp-xc[i-1]),2)+pow((ytemp-yc[i-1]),2));
distance2=sqrt(pow((xtemp2-xc[i-1]),2)+pow((ytemp2-yc[i-1]),2));
if(distance1<distance2)
{
xc[i]=xtemp;
yc[i]=ytemp;
xcdot[i]=xtemp2;
ycdot[i]=ytemp2;
}
else

```

```

    {
        xc[i]=xtemp2;
        yc[i]=ytemp2;
        xcdot[i]=xtemp;
        ycdot[i]=ytemp;
    }
}
for(i=0;i<=(N-2);i++)
{
    fprintf(ad1,"%f\t%f\n",xc[i],yc[i]);
    fprintf(ad2,"%f\t%f\n",xcdot[i],ycdot[i]);
}
/* calculating the two trochoidal curves */
for(i=0;i<=(N-2);i++)
{
    /* comments in next 4 lines declare just a swap in initializing of */
    /* the "glued" vector of b length */
    x_tr[i]=xc[i]-b*sin(theta_rad[i]); /* change to + */
    y_tr[i]=yc[i]+b*cos(theta_rad[i]); /* change to - */
    x_trdot[i]=xcdot[i]-b*sin(theta_rad[i]); /*change to + */
    y_trdot[i]=ycdot[i]-b*cos(theta_rad[i]); /* change to + */
}
for(i=0;i<=(N-2);i++)
{
    fprintf(ad3,"%f\t%f\n",x_tr[i],y_tr[i]);
    fprintf(ad4,"%f\t%f\n",x_trdot[i],y_trdot[i]);
}
/* closing files */
fclose(ad);
fclose(ad1);
fclose(ad2);
fclose(ad3);
fclose(ad4);
return(0);
}

```

A.2 Κώδικας 2D Model.

```
#include <stdio.h>
#include <math.h>
#define N 1000

/* surface profile z=f(x) */
float f(float x)
{
    float solution;
    solution=sqrt(x); /* pow(x,2); or exp(x); */
    return solution;
}
/* ----- */

/* surface profile inclination (derivative) dz/dx=f'(x) */
float fder(float x)
{
    float solutionder;
    solutionder=1/(2*sqrt(x)); /* 2*x; or exp(x); */
    return solutionder;
}
/* ----- */

/* surface profile second derivative for concave-convex check */
float fdoubleder(float x)
{
    float solutiondoubleder;
    solutiondoubleder=-1/(4*sqrt(pow(x,3))); /* 2; or exp(x); */
    return solutiondoubleder;
}
/* ----- */

/* I (first) Newton-Raphson equation */
float F1(float xA,float xB, float xpoint, float zpoint)
{
    float solution1;
    solution1=pow(f(xA),2)-pow(f(xB),2)+pow(xA,2)-pow(xB,2)+2*zpoint*(f(xB)-
f(xA))+2*xpoint*(xB-xA);
    return solution1;
}
/* ----- */

/* II (second) Newton-Raphson equation */
float F2(float xA,float xB, float xpoint, float zpoint,float D)
{
    float solution2;
    solution2=pow((xB-xA),2)+pow((f(xB)-f(xA)),2)-pow(D,2);
    return solution2;
}
/* ----- */
```



```

/* dF1/dxA calculation */
float F1xA(float xA,float xpoint,float zpoint)
{
    float solF1xA;
    solF1xA=2*f(xA)*fder(xA)+2*xA-2*zpoint*fder(xA)-2*xpoint;
    return solF1xA;
}
/* ----- */

/* dF1/dxB calculation */
float F1xB(float xB,float xpoint,float zpoint)
{
    float solF1xB;
    solF1xB=-2*f(xB)*fder(xB)-2*xB+2*zpoint*fder(xB)+2*xpoint;
    return solF1xB;
}
/* ----- */

/* dF2/dxA calculation */
float F2xA(float xA,float xB,float xpoint,float zpoint)
{
    float solF2xA;
    solF2xA=-2*(xB-xA)-2*fder(xA)*(f(xB)-f(xA));
    return solF2xA;
}
/* ----- */

/* dF2/dxB calculation */
float F2xB(float xA,float xB,float xpoint,float zpoint)
{
    float solF2xB;
    solF2xB=2*(xB-xA)+2*fder(xB)*(f(xB)-f(xA));
    return solF2xB;
}
/* ----- */

int main()
{
    int i,imax,ij;
    imax=10000;
    float D,J;
    float xgdoubledot,zgdoubledot;
    float xstep;
    float xgdot,zgdot;
    float xAapprox,xBapprox;
    float DxA,DxB;
    float error=0.001;
    float theta,thetadeg,thetadegmax;
    float xrot,zrot;
    float xrot1,xrot2;

```

```

float RGdot;
float tan8;
float a,b,c,Diakr;
float xg,zg;

FILE *ad;
ad=fopen("test.txt","w");
FILE *ad1;
ad1=fopen("results_of_NR_loop.txt","w");
FILE *ad2;
ad2=fopen("Gdata.txt","w");
FILE *ad3;
ad3=fopen("surface profile.txt","w");

printf("%s\n","Enter initial xG\']="");
scanf("%f",&xgdoubledot);

printf("%s\n","Enter xstep=");
scanf("%f",&xstep);

printf("%s\n","Enter Dring\']="");
scanf("%f",&D);

printf("%s\n","Enter Distance (RG')=");
scanf("%f",&RGdot);

for(ij=0;ij<=N;ij++)
{
zgdoubledot=f(xgdoubledot);

fprintf(ad,"xG\"]= %f\n",xgdoubledot);
fprintf(ad,"zG\"]=f(xG\"]= %f\n",zgdoubledot);
fprintf(ad,"f'(xG\"]= %f\n",fder(xgdoubledot));
fprintf(ad,"f\"(xG\"]= %f\n",fdoubleder(xgdoubledot));
fprintf(ad3,"%f\t%f\n",xgdoubledot,zgdoubledot);

/* initial estimations for xA and xB */
xAapprox=xgdoubledot-(D/2)*cos(atan(fder(xgdoubledot)));
xBapprox=xgdoubledot+(D/2)*cos(atan(fder(xgdoubledot)));

fprintf(ad1,"surface point G\"(%f,%f)\n",xgdoubledot,zgdoubledot);
fprintf(ad1,"xA\t xB\t DxA\t DxB\t f(xA)\t f(xB)\t J\n");

/* Newton-Raphson routine for A and B points calculation */
for(i=0;i<imax;i++)
{
J=
F1xA(xAapprox,xgdoubledot,zgdoubledot)*F2xB(xAapprox,xBapprox,xgdoubledot,zgdoubled
ot)-
F2xA(xAapprox,xBapprox,xgdoubledot,zgdoubledot)*F1xB(xBapprox,xgdoubledot,zgdoubled
ot);

```

```

DxA=(F1(xAapprox,xBapprox,xgdoubledot,zgdoubledot)*F2xB(xAapprox,xBapprox,xgdoubledot,zgdoubledot)-
F2(xAapprox,xBapprox,xgdoubledot,zgdoubledot,D)*F1xB(xBapprox,xgdoubledot,zgdoubledot))/J;
    xAapprox=xAapprox-DxA;

DxB=(F2(xAapprox,xBapprox,xgdoubledot,zgdoubledot,D)*F1xA(xAapprox,xgdoubledot,zgdoubledot)-
F1(xAapprox,xBapprox,xgdoubledot,zgdoubledot)*F2xA(xAapprox,xBapprox,xgdoubledot,zgdoubledot))/J;
    xBapprox=xBapprox-DxB;
    if((fabs(DxA)<error)&&(fabs(DxB)<error)){
        i=imax;
        goto PRINTING;
    }
    PRINTING:fprintf(ad1,"%f %f %f %f %f %f
%f\n",xAapprox,xBapprox,DxA,DxB,f(xAapprox),f(xBapprox),J);
    }

    fprintf(ad1,"*****\n");

/* ----- */

/* G' point and rotation angle calculation */
    xgdot=(xAapprox+xBapprox)/2;
    zgdot=(f(xAapprox)+f(xBapprox))/2;
    tan8=(f(xBapprox)-f(xAapprox))/(xBapprox-xAapprox);
    theta=atan(tan8);
    thetadeg=(180/M_PI)*atan(tan8);
    fprintf(ad,"xG'= %f\n",xgdot);
    fprintf(ad,"zG'= %f\n",zgdot);
    fprintf(ad,"theta(degrees)= %f\n",thetadeg);
    thetadegmax=15.72;
    if(fabs(thetadeg)>thetadegmax)
    {
        fprintf(ad,"Tilt angle is larger than the crucial value of %f degrees\n",thetadegmax);
    }

/* ----- */

/* R point calculation */
    a=1+pow((1/tan8),2); /* always a>0 */
    b=-2*xgdot+(2/tan8)*zgdot-(2/pow(tan8,2))*xgdoubledot-(2/tan8)*zgdoubledot;
    c=-2*zgdot*zgdoubledot-
(2/tan8)*zgdot*xgdoubledot+pow((xgdoubledot/tan8),2)+pow(zgdoubledot,2)+(2/tan8)*xgdoubledot*zgdoubledot+pow(xgdot,2)+pow(zgdot,2)-pow(RGdot,2);
    Diakr=pow(b,2)-4*a*c;
    xrot1=(-b+sqrt(Diakr))/(2*a); /* xrot1>xrot2, since always a>0 */
    xrot2=(-b-sqrt(Diakr))/(2*a);
    if(theta>0)
    {
        xrot=xrot2;

```

```

    }
    else
    {
        xrot=xrot1;
    }
    zrot=zgdoubledot+(1/tan8)*(xgdoubledot-xrot);
    fprintf(ad,"xR= %f\n",xrot);
    fprintf(ad,"zR= %f\n",zrot);
/* ----- */

/* G point calculation */
    xg=xrot+(xgdot-xrot)*cos(-theta)+(zgdot-zrot)*(-sin(-theta)); /* xG=xR (alternative
formula-checked) */
    zg=zrot+(xgdot-xrot)*sin(-theta)+(zgdot-zrot)*cos(-theta); /* zG=zR-(RG') (alternative
formula-checked) */
    fprintf(ad,"xG= %f\n",xg);
    fprintf(ad,"zG= %f\n",zg);

    fprintf(ad,"***** (next point) *****\n");
    fprintf(ad2,"%f\t%f\n",xg,zg);
    xgdoubledot+=xstep;
}

fclose(ad);
fclose(ad1);
fclose(ad2);
fclose(ad3);
return(0);
}

```

Παράρτημα Β

Β.1 Ενδεικτικός G-code δημιουργίας αρχικής τραχύτητας peak-to-valley 21μm (βήμα 0.9mm και ακτίνα Ball-end mill 10mm).

```
%  
T2 M06 ;  
G90 G54 ;  
G00 X0 Y0 Z150. ;  
G00 Z5. S600 M03 ;  
M08 ;  
G01 Z-0.2 F120. ;  
G01 Y40. ;  
X0.9 ;  
Y0 ;  
X1.8 ;  
Y40. ;  
X2.7 ;  
Y0 ;  
X3.6 ;  
Y40. ;  
X4.5 ;  
Y0 ;  
X5.4 ;  
Y40. ;  
X6.3 ;  
Y0 ;  
X7.2 ;  
Y40. ;  
.....  
.....  
.....  
X121.5 ;  
Y0 ;  
X122.4 ;  
Y40. ;  
M09 ;  
G01 Z5. ;  
G00 Z150. ;  
M30 ;  
%
```

B.2 Ενδεικτικός G-code που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα στίλβωσης επίπεδης επιφάνειας με καμπύλη τροχοειδούς μοτίβου ($\alpha=2$ και $b=6$).

```
%  
T2 M06 ;  
G90 G54 ;  
G00 X0 Y-4. Z150. M19;  
G00 Z5. ;  
G01 Z0 F100. ;  
G01 X-0.07 Y-3.999 ;  
X-0.14 Y-3.996 ;  
X-0.209 Y-3.992 ;  
X-0.279 Y-3.985 ;  
X-0.348 Y-3.977 ;  
X-0.418 Y-3.967 ;  
X-0.487 Y-3.955 ;  
X-0.556 Y-3.942 ;  
X-0.624 Y-3.926 ;  
X-0.693 Y-3.909 ;  
X-0.761 Y-3.89 ;  
X-0.829 Y-3.869 ;  
X-0.896 Y-3.846 ;  
X-0.963 Y-3.822 ;  
X-1.029 Y-3.796 ;  
X-1.095 Y-3.768 ;  
X-1.161 Y-3.738 ;  
X-1.226 Y-3.706 ;  
X-1.29 Y-3.673 ;  
.....  
.....  
.....  
X38.392 Y-3.909 ;  
X38.324 Y-3.926 ;  
X38.255 Y-3.942 ;  
X38.186 Y-3.955 ;  
X38.117 Y-3.967 ;  
X38.048 Y-3.977 ;  
X37.978 Y-3.985 ;  
X37.908 Y-3.992 ;  
X37.839 Y-3.996 ;  
X37.769 Y-3.999 ;  
X37.699 Y-4. ;  
G01 Z5. ;  
G00 Z150. ;  
M30 ;  
%
```

Παράρτημα Γ

Βοηθητικές σχέσεις μεθόδου Newton-Raphson για την επίλυση μη γραμμικών συστημάτων (2 σχέσεις-2 άγνωστοι).

Δίνεται σύστημα 2 μη γραμμικών εξισώσεων με 2 αγνώστους,

$$\begin{cases} f(x, y) = 0 \\ g(x, y) = 0 \end{cases} \quad (\Gamma-1)$$

Με χρήση αναπτυγμάτων κατά Taylor, προκύπτουν οι αναγωγικοί τύποι

$$x^{(n+1)} = x^{(n)} - \frac{f \cdot g_y - g \cdot f_y}{J(f, g)} \quad (\Gamma-2\alpha)$$

$$y^{(n+1)} = y^{(n)} - \frac{g \cdot f_x - f \cdot g_x}{J(f, g)} \quad (\Gamma-2\beta)$$

Στις παραπάνω σχέσεις $(x^{(n)}, y^{(n)})$ είναι η νιοστή προσέγγιση στη ρίζα του συστήματος και f_x, f_y, g_x, g_y είναι οι μερικές παράγωγοι των συναρτήσεων f και g ως προς x και y αντίστοιχα, υπολογισμένες στη θέση $(x^{(n)}, y^{(n)})$. Με $J(f, g)$ συμβολίζεται η Ιακωβιανή ορίζουσα των συναρτήσεων f και g , επίσης υπολογισμένη στη θέση $(x^{(n)}, y^{(n)})$. Δηλαδή

$$J(f, g) = f_x \cdot g_y - g_x \cdot f_y \quad (\Gamma-3)$$

Μόνη προϋπόθεση για να συγκλίνει η μέθοδος είναι οι συναρτήσεις f και g και οι παράγωγοί τους να είναι συνεχείς συναρτήσεις και η Ιακωβιανή διάφορη του μηδενός. Με αυτές τις προϋποθέσεις να τηρούνται και με δεδομένο ότι γίνεται επιτυχής πρώτη εκτίμηση της ρίζας του συστήματος, αποδεικνύεται ότι η μέθοδος Newton-Raphson έχει τετραγωνική σύγκλιση και οδηγεί με ασφάλεια στην εύρεση της ρίζας του συστήματος, λόγος για τον οποίο επιλέχθηκε αυτή η μέθοδος στον κώδικα του 2D Model, για τον προσδιορισμό των σημείων A και B.[32].

Παράρτημα Δ

Στο παράρτημα αυτό παρουσιάζονται datasheets με διάφορα τεχνικά χαρακτηριστικά των στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε.

Grinding and Engraving Set with flexible shaft BSG 135-Set Bavaria

Art.-No.: **44.191.70**
bar -code: **4006825446005**
sales unit: **4 pcs**

With this multi grinder and large range of accessories one can drill, rout, grind and brush. Various tools can be inserted on the head set of the tool. Besides the multi grinder is equipped with a flexible shaft. This shaft is particularly suitable for areas which are difficult to reach.

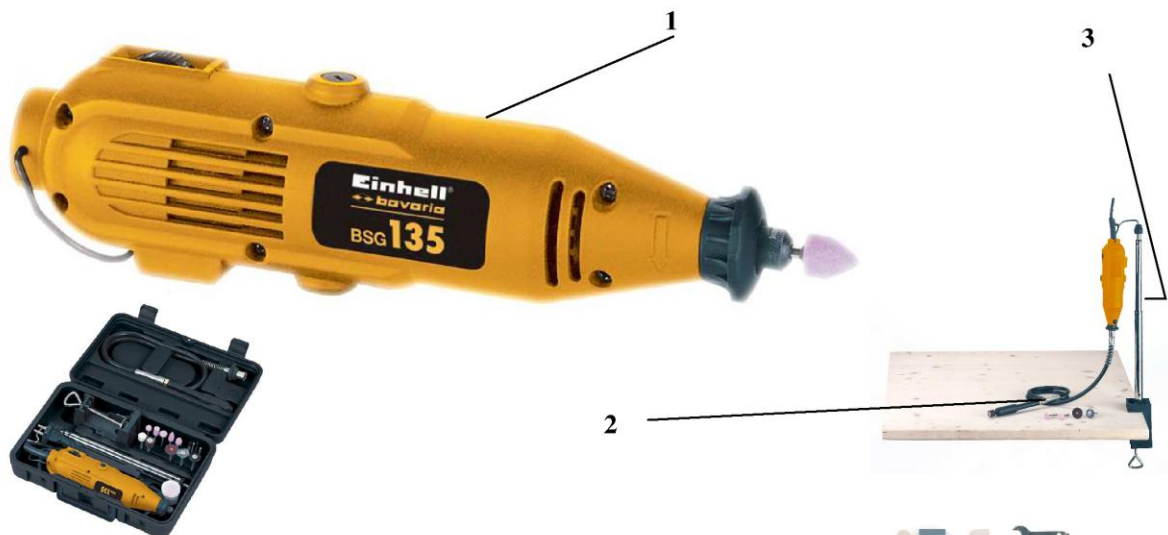
To change tools quickly the drive rod can be locked by pressing a button. The specially hardened collet chucks warrants safe locking of the drill bits. The speed control adapts very well to the various materials.

Ausstattung:

- | | | |
|----------------------------|--|-------------------------------|
| - 1 drive unit (1) | - 1 adapter for | - 1 HSS-drill bit |
| - 1 flexible shaft (2) | - miniature grinding-/ | - 1 grindstone |
| - 1 telescopic tripod (3) | - miniatur cutting discs | - 1 holder for felt polishing |
| - 1 plastic carrying case | - 2 tiny fine grinding stones of special white | discs |
| - 5 point grinding made of | corundum | - 1 engraving pen |
| special corundum | - 8 miniatur cutting discs | - 1 clamping sleeve |
| - 1 routing pin | - 3 felt polishing discs | - 1 key for locking chuck |
| - 1 sanding tool | | |

Technische Daten:

- | | |
|----------------------|-----------------------|
| - mains: | 230 V ~ 50 Hz |
| - power: | 135 Watt |
| - Idle speed n_0 : | 10.000 – 35.000 min-1 |



As special accessory available:

100-parts accessory set in the wood case

Art.-Nr.: **44.195.04**
EAN-Code: **4006825509670**





Moving Metrology into the 21st Century

Surtronic 3+

**Rapid on the shopfloor
Surface Texture Measurement**



S p e c i f i c a t i o n

The Surtronic 3+ System Includes:

- Display and Traverse Unit
- Calibration Standard
- Battery
- Pick-up and Diamond Stylus
- Carrying Case
- Handbook

T e c h n i c a l D a t a

Gauge Range	±150µm (0.006in)	Resolution	0.01µm (0.4µin)
Traverse Length (Max)	25.4mm (1.0in)	Traverse Length (min)	0.25mm (0.01in)
Pick up type	Variable reluctance	Traverse Speed	1mm/sec (0.04in/sec)
Stylus	112/1502: Diamond tip radius 5µm (200µin) 112/1503: Diamond tip radius 10µm (400µin)		
Cut Off Values	0.25, 0.8, 2.5, 8mm (0.01, 0.03, 0.1, 0.3in) (8mm Cut off only available when using Talyprofile or Macro-Maker Software)	Accuracy of Parameters	2% of reading + LSD µm
Parameters	Ra, Rq, Rz (DIN), Ry, Sm, Rt	Power	Battery or Mains (optional)
Optional additional parameters	Pc (in place of Sm), tp% (in place of Rq) - with optional EPROM available on request	Graphical studies	Waviness + Roughness curves, with interactive selection of type of filter and cut-off, Graphical studies of R&W (ISO 12085): roughness and waviness motifs, upper envelope Graphical study of Rk (DIN 4776 and ISO 13565-2 standards) Display of intermediate profiles used to compute Rk, Interactive Abbott Curve, Bearing Ratio Curve of ISO 13565 standard (Rk), Computation profiles of ISO 13565 standard (Rk), Volume of a hole and the associated rejected material Distance, difference in height, slope between two points, Spectral analysis using Fourier transform, Averaged Spectral Density.
Parameters supplied with Data Processing Module	RA, RV, Rp, Rt, Rq, Ry, Rpm, Rz (DIN), RzJIS, Ir, Sm, Rsk, Rku, S, Pc, HSC, Rk, Rpk, Rvk, Mr1, Mr2, A1, A2, Rpk, Rvk, R, Rmax, Ar, Pt, Kr, tp%, Htp, Vo.		
Parameters supplied with Talyprofile Windows	Roughness parameters obtained by filtering: Ra, Rq, Rt, Rp, Rv, Rku, Rsk, RSm, Rz, RΔq, RTp, RHTp, Rlo, Rλq, RPC, RzJIS, R3z. Waviness parameters obtained by filtering: Wa, Wq, Wt, Wp, Wv, Wku, Wsk, WSm, Wz, WzJIS, Wλq, WΔq, WTP, WHTp, WLo, WPC, W3z. Parameters on the raw profile (unfiltered): Pa, Pq, Pt, Pp, Pv, Pku, Psk, PSm, Pz, PΔq, Pλq, PTP, PHTp, PLo, PPC. Parameters obtained by double filtering (DIN 4776): Rk, Rpk, Rvk, MR1, MR2, A1, A2, Rpk, Rvk Parameters obtained by the motifs method ("R&W"): R, AR, Pt, Rx, SR, SAR, Nr, Kr, W, AW, Wte, Wx, SW, SAW, Nw, Kw, Rke, Rpke, Rvke, Trc, HTrc.		
Overall Dimensions	130 x 80 x 65mm (5.1 x 3.3 x 2.5in)	Weight	450g (1lb)
Data Processing Module	185 x 140 x 50mm (7.5 x 5.5 x 2in)		