



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
Τομέας Τεχνολογίας των Κατεργασιών
Διπλωματική Εργασία

Παραμετρικός Σχεδιασμός Τροχιάς Κοπτικών Εργαλείων Για Την Κατασκευή Οδοντωτών Τροχών Ευθείας Οδόντωσης Σε Κέντρα Κατεργασιών CNC Τεσσάρων Αξόνων

Φοιτητής: Αθανάσιος Γ. Γιαννάκης
Επιβλ. Καθηγητής: Γεώργιος Χ. Βοσνιάκος

Αθήνα, Μάρτιος 2010

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	1
ΠΡΟΛΟΓΟΣ	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ	5
1.1 Εισαγωγή	5
1.2 Μέθοδοι κατασκευής οδοντωτών τροχών	5
1.2.1 Κοπή σε φρέζα με χρήση εργαλείου μορφής (Gear Milling)	5
1.2.2 Κοπή με οδοντωτό κανόνα (rack generation)	6
1.2.3 Κοπή τροχών με τη μέθοδο Fellows (gear shaper)	6
1.2.4 Κοπή με εργαλείο τύπου Hob (Hobbing)	7
1.2.5 Κοπή οδοντώσεων με αφαίρεση υλικού (Broaching)	8
1.2.6 Χύτευση τροχών υπό πίεση (Die casting)	8
1.2.7 Έλαση – διέλαση οδοντωτών τροχών (Extruding)	8
1.2.8 Κονομεταλλουργία (Sintering)	9
1.2.9 Εκβολή πλαστικού (Injection molding)	9
1.3 Μέθοδοι αποπεράτωσης οδοντωτών τροχών	9
1.3.1 Λείανση (Grinding - Honning)	9
1.3.2 Lapping	10
1.3.3 Απόξεση (Shaving)	10
1.4 Συμπεράσματα	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	11
2.1 Εισαγωγή	11
2.2 Κατεργασία των γλυπτών επιφανειών των σπειροειδών κωνικών τροχών μέσω φρεζαρίσματος CNC	11
2.3 Μοντελοποίηση μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή των οδοντωτών τροχών που γεννώνται με χρήση κοπτικού κανόνα	13
2.4 Συμπεράσματα	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ	15
3.1 Εισαγωγή	15
3.2 Βασική γεωμετρία επιφάνειας εργασίας δοντιού	15
3.2.1 Εξειλιγμένη καμπύλη	15
3.2.2 Χαρακτηριστικά μεγέθη οδοντώσεων	16
3.2.3 Βοηθητικά μεγέθη οδοντώσεων	19
3.3 Γεωμετρία τροχοειδούς	20
3.3.1 Κατασκευαστικά μεγέθη του οδοντωτού κανόνα και οι επιπτώσεις τους στα χαρακτηριστικά του γεννώμενου δοντιού	20
3.3.2 Μεθοδολογία εύρεσης των σημείων της καμπύλης του τροχοειδούς	23
3.4 Εναρμόνιση σε ένα κύριο σύστημα συντεταγμένων, των σχετικών συστημάτων του τροχοειδούς και της εξειλιγμένης	24

3.5 Συμπεράσματα	26
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΚΟΠΗΣ ΤΟΥ ΟΔΟΝΤΩΤΟΥ ΤΡΟΧΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΤΕΤΑΡΤΟΥ ΑΞΟΝΑ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΩΝ	27
4.1 Εισαγωγή	27
4.2 Αξονες συντεταγμένων στις εργαλειομηχανές	27
4.3 Κοπή οδοντωτού τροχού σε κέντρο κατεργασιών τεσσάρων αξόνων	28
4.3.1 Πλεονεκτήματα της κοπής με χρήση τεσσάρων αξόνων	29
4.3.2 Στρατηγικές κοπής με χρήση περιστροφικής τράπεζας	31
4.4 Συμπεράσματα	35
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΚΟΠΗΣ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ ΣΕ ΚΕΝΤΡΟ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ ΤΕΣΣΑΡΩΝ ΑΞΟΝΩΝ	37
5.1 Εισαγωγή	37
5.2 Ρουτίνα υπολογισμού της γεωμετρίας της κατατομής του δοντιού (gewmetria.m)	37
5.2.1 Δομή της ρουτίνας gewmetria.m	37
5.2.2 Αναλυτική παρουσίαση αλγόριθμου υπολογισμού των σημείων της εξειλιγμένης	40
5.2.3 Αναλυτική παρουσίαση αλγόριθμου υπολογισμού των σημείων του τροχοειδούς	41
5.2.4 Αναλυτική παρουσίαση των αλγόριθμων: α) εύρεσης του σημείου τομής των καμπυλών εξειλιγμένης και τροχοειδούς, β) υπολογισμού των σημείων της τελικής κατατομής και γ) υπολογισμού των διαμέτρων των κονδυλιών	43
5.3 Ρουτίνα δημιουργίας και εξαγωγής του κώδικα g-code του σταδίου του εκχονδρίσματος (ekxondrisma.m)	48
5.3.1 Δομή της ρουτίνας ekxondrisma.m	48
5.3.2 Αναλυτική παρουσίαση του αλγορίθμου εύρεσης των κατάλληλων υψών κοπής για καθένα από τα επίπεδα εκχονδρίσματος	49
5.3.3 Αναλυτική παρουσίαση του αλγορίθμου δημιουργίας του αρχείου κειμένου (roughgcode.txt) με τον κώδικα g-code για την εκτέλεση της κοπής εκχονδρίσματος	55
5.4 Ρουτίνα δημιουργίας και εξαγωγής του κώδικα g-code του σταδίου αποπεράτωσης (apoperatwsh.m)	57
5.4.1 Δομή της ρουτίνας apoperatwsh.m	57
5.4.2 Αναλυτική παρουσίαση του αλγορίθμου εύρεσης των συντεταγμένων των εκάστοτε θέσεων κονδυλιού – τεμαχίου κατά την αποπεράτωση	59
5.4.3 Αναλυτική παρουσίαση του αλγορίθμου δημιουργίας του αρχείου κειμένου (finishgcode.txt) με τον κώδικα g-code για την εκτέλεση της κοπής αποπεράτωσης	61
5.5 Συμπεράσματα	63
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ ΠΟΥ ΕΛΑΒΑΝ ΧΩΡΑ ΣΤΑ ΠΛΑΙΣΙΑ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	64
6.1 Εισαγωγή	64
6.2 Κατεργασία πλάκας τσوك	64
6.3 Κατεργασία οδοντωτού τροχού	66
6.3.1 Προεργασία της κοπής	67
6.3.2 Κοπή εκχονδρίσματος και σχολιασμός του αποτελέσματος	69

6.3.3 Κοπή αποπεράτωσης και σχολιασμός του αποτελέσματος	70
6.3.4 Συμπεράσματα	72
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ	74
7.1 Εισαγωγή	74
7.2 Μέτρηση διαστάσεων κατατομής και παρατηρήσεις	74
7.2.1 Μεθοδολογία μέτρησης και παρουσίαση αποτελεσμάτων	74
7.2.2 Παρατηρήσεις	76
7.3 Προτάσεις βελτίωσης της εφαρμογής	77
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	80
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	81
Π.1 Πίνακας 1 Τυποποιημένες Τιμές Module Σε (Mm)	81
Κωδ.1 Κώδικας ρουτίνας gewmetria.m	82
Κωδ.1.1 Εισαγωγή δεδομένων και υπολογισμός γεωμετρικών σταθερών	82
Κωδ.1.2 Εύρεση σημείων εξειλιγμένης	83
Κωδ.1.3 Εύρεση σημείων τροχοειδούς	84
Κωδ.1.4 Εύρεση σημείου τομής εξειλιγμένης και τροχοειδούς	85
Κωδ.1.5 Δημιουργία και αποθήκευση πίνακα συντεταγμένων κατατομής	86
Κωδ.1.6 Υπολογισμός διαμέτρων κονδυλίων	86
Κωδ.2 Κώδικας ρουτίνας ekxondrisma.m	88
Κωδ.2.1 Εισαγωγή δεδομένων και υπολογισμός γεωμετρικών σταθερών	88
Κωδ.2.2 Εύρεση του κατώτατου Z που θα φτάσει το εργαλείο	90
Κωδ.2.3 Εύρεση των σημείων που επιτυγχάνουν τα κριτήρια για το πάχος του εναπομένοντος υλικού	90
Κωδ.2.4 Δημιουργία και εγγραφή του g-code στο αρχείο κειμένου roughing.txt	92
Κωδ.3 Κώδικας ρουτίνας aroperatwsh.m	94
Κωδ.3.1 Εισαγωγή δεδομένων και υπολογισμός γεωμετρικών σταθερών	94
Κωδ.3.2 Προσδιορισμός συντεταγμένων εργαλείου και γωνία στροφής του τροχού για κοπή κάθε σημείου	96
Κωδ.3.3 Δημιουργία κοινόχρηστων -για όλα τα διάκενα- πινάκων με συντεταγμένες κοπής	96
Κωδ.3.4 Δημιουργία και εγγραφή του g-code στο αρχείο κειμένου finishgcode.m	97
Σ. 1 Σχέδιο της ενδιάμεσης πλάκας μεταξύ τσوك και τράπεζας	98
Φωτογραφίες δημιουργίας πλάκας τσوك	99
φωτ.6.1 φωτ.6.2	99
φωτ.6.3 φωτ.6.4	99
φωτ.6.5 φωτ.6.6	99
φωτ.6.7 φωτ.6.8	100
φωτ.6.9 φωτ.6.10	100
φωτ.6.11 φωτ.6.12	100
φωτ.6.13 φωτ.6.14	101
φωτ.6.15 φωτ.6.16	101
φωτ.6.17	101

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η δίψα για γνώση είναι το κύριο κίνητρο για τον πνευματικό και όχι μόνο, μόχθο των ανθρώπων. Η επιστημονική έρευνα αποτελεί μια από τις ποικίλες οδούς προς τη γνώση εν γένη, και επιστέγασμα της επιστημονικής έρευνας δεν είναι άλλο, από τη φυσική ή νοητική υλοποίηση ή ακόμη την απόδειξη της υπόστασης, του αντικείμενου της έρευνας. Απώτερος στόχος της εκπόνησης μιας διπλωματικής εργασίας είναι η απόκτηση γνώσης. Όταν στα πλαίσια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας συμπεριληφθεί και η υλοποίηση του αντικείμενου έρευνας τότε το όλο εγχείρημα χαρακτηρίζεται από μια σχετικά δύσκολη προς επίτευξη κατάσταση, αυτήν της πληρότητας.

Θεωρώ πως μέσα από την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας κατάφερα να αγγίξω την προαναφερθείσα κατάσταση της πληρότητας και η αίσθηση που αποκόμισα τη στιγμή εκείνη, αποτέλεσε την σε ολόκληρο ανταμοιβή μου για το μόχθο που κατέβαλα. Πέραν όμως από την προσωπική ικανοποίηση θέλω να πιστεύω πως με την εργασία μου αυτή αφήνω στη σχολή αλλά και σε οποιονδήποτε ενδιαφερόμενο ένα σχετικά απλό στη χρήση και αξιόπιστο εργαλείο δημιουργίας οδοντωτών τροχών ευθείας οδόντωσης.

Πρέπει όμως να σημειωθεί πως ένα πολύ μεγάλο μέρος των επιτευγμάτων της εργασίας αυτής δεν θα είχε υπόσταση χωρίς τη βοήθεια συγκεκριμένων ανθρώπων. Ανθρώπων υπεύθυνων και ευσυνειδητων που δεν δίστασαν να προσφέρουν τον προσωπικό τους χρόνο και την εργασία τους, προκειμένου να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις μου όπως και της εργασίας άμεσα και έγκαιρα. Η αναφορά των ονομάτων τους και του έργου τους αποτελεί το ελάχιστο ευχαριστώ προς το πρόσωπό τους.

Θα ήθελα λοιπόν, να ευχαριστήσω ιδιαίτερα: τον αναπληρωτή καθηγητή κύριο Γεώργιο Χ. Βοσνιάκο για την ιδέα του αντικείμενου της διπλωματικής, τη διαρκή υποστήριξη σε όλους ανεξαιρέτως τους τομείς και το εξαιρετικό κλίμα επικοινωνίας τον χειριστή εργαλειομηχανών κύριο Νικόλαο Μελισσά γιατί ενέσκηψε με ζήλο πάνω σε οποιαδήποτε τεχνική υλοποίηση του ζητήθηκε, με εντυπωσιακά αποτελέσματα τους υποψήφιους διδάκτορες: κύριο Πανώριο Μπενάρδο για την εκπαίδευση, την καθοδήγηση και την υποστήριξη που παρείχε, τους κυρίους Ξενοφώντα Γωγουβίτη, Νικόλαο Κοντολάτη και Τίτο Γιαννακάκη για τη μεγάλη βοήθεια και την προσωπική τους ενασχόληση πριν και κατά τη διενέργεια της κοπής στο κέντρο κατεργασιών και τον κύριο Γεώργιο Μίχα για την βοήθειά του στο κατασκευαστικό κομμάτι.

Υπομονετικοί και αταλάντευτοι υποστηρικτές σε όλες τις προσπάθειες μου για απόκτηση γνώσης και παιδείας εντός του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου, που ολοκληρώνονται με την διπλωματική αυτή εργασία, υπήρξαν οι γονείς και ο αδερφός μου τους οποίους και ευχαριστώ μέσα από τα βάθη της καρδιάς μου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ

1.1 Εισαγωγή

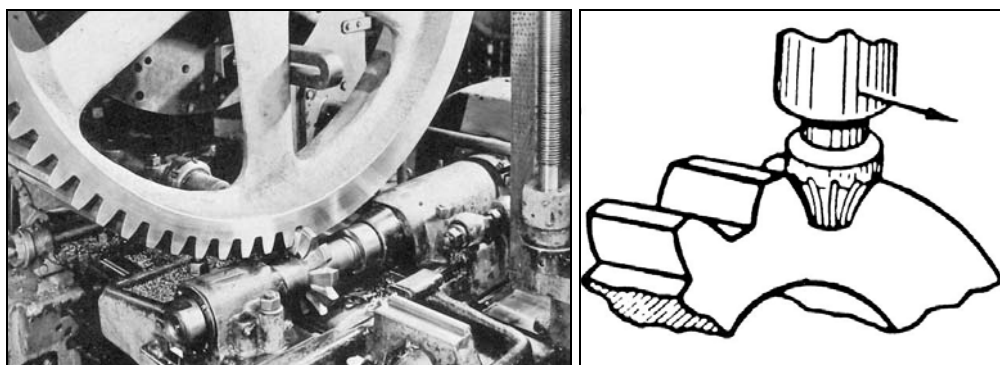
Προτού εξετασθεί το κυρίως αντικείμενο της δημιουργίας και κοπής του οδοντωτού τροχού με ευθείς οδόντες με χρήση κέντρου κατεργασιών και συμβατικών κονδυλίων γενικής χρήσης, κρίνεται σκόπιμη μια συνοπτική παρουσίαση των πιο διαδεδομένων μεθόδων παραγωγής οδοντωτών τροχών. Με αυτό τον τρόπο θα γίνουν ευκολότερα αντιληπτά τα όποια πλεονεκτήματα ή μειονεκτήματα της προτεινόμενης μεθόδου ενώ και ο αναγνώστης θα βοηθηθεί στο να συλλάβει κάποιες έννοιες και ορολογία που θα χρησιμοποιηθεί περαιτέρω.

Οι μέθοδοι κοπής χωρίζονται σε αυτές που αφορούν την κυρίως κοπή του τροχού και σε αυτές που επιτυγχάνουν την αποπεράτωση (finishing) των κατεργασμένων επιφανειών. Ανάλογα με τη χρήση (ταχύτητα λειτουργίας, συνθήκες φορτίου, αθόρυβη λειτουργία κ.α.) για την οποία προορίζεται ο τροχός επιλέγεται -το εάν θα υποστεί και ποια θα είναι αυτή- κατεργασία αποπεράτωσης. Η αναφορά στις κατεργασίες αποπεράτωσης κρίνεται απαραίτητη αφού η αποδιδόμενη επιφάνεια είναι κεφαλαιώδους σημασίας τόσο για τη λειτουργία όσο και για τη μακροζωία του τροχού. Αυτός είναι και ο λόγος που η αποπεράτωση αποτέλεσε εξαρχής επιδιωκόμενο χαρακτηριστικό της προτεινόμενης μεθόδου κατεργασίας.

1.2 Μέθοδοι κατασκευής οδοντωτών τροχών

1.2.1 Κοπή σε φρέζα με χρήση εργαλείου μορφής (Gear Milling)

Κατά την συγκεκριμένη κοπή είναι απαραίτητη η κατασκευή ενός κοπτικού εργαλείου το οποίο να είναι ικανό να αφαιρέσει από ένα κύλινδρο το διάκενο ανάμεσα σε δύο δόντια του τροχού. Καθώς περιστρέφεται και κόβει υλικό από την περιφέρεια του κυλίνδρου, μετακινείται ταυτόχρονα αξονικά σε όλο το πλάτος του. Αφού ένα διάκενο έχει κοπεί, ο τροχός περιστρέφεται στην κατάλληλη θέση και κόβεται το επόμενο διάκενο. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρις ότου να έχουν κοπεί όλα τα διάκενα του τροχού. Μια τέτοια κοπή φαίνεται στο σχήμα 1.1 όπως επίσης και οι δύο δυνατές διαμορφώσεις του εργαλείου κοπής.

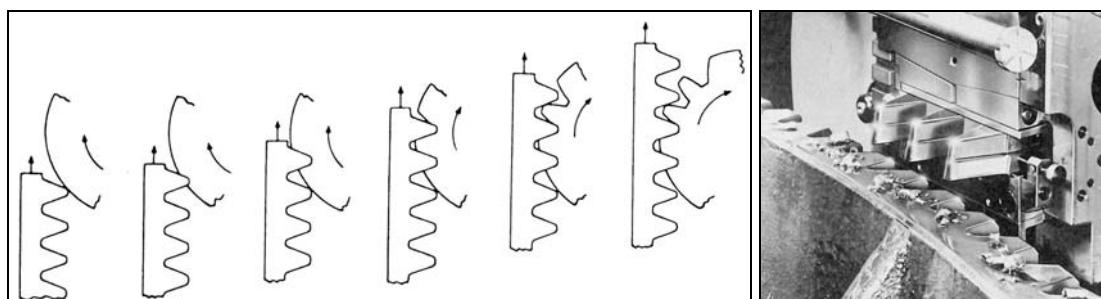


Σχήμα 1.1
Κοπές με εργαλείο μορφής σε φρέζα

Το κύριο μειονέκτημα της μεθόδου είναι πως κάθε ξεχωριστό εργαλείο κοπής δύναται να κόψει με ακρίβεια ένα τροχό συγκεκριμένου αριθμού δοντιών και με καθορισμένο module. Με άλλα λόγια ένα ξεχωριστό εργαλείο πρέπει να χρησιμοποιηθεί όχι μόνο για κάθε διαφορετικό μέγεθος module αλλά και για κάθε ξεχωριστό αριθμό οδόντων [1].

1.2.2 Κοπή με οδοντωτό κανόνα (rack generation)

Το υλικό κατασκευής του οδοντωτού κανόνα είναι βαμμένος χάλυβας και στις ακμές του έχουν δοθεί ιδιότητες κοπτικού εργαλείου. Ο κανόνας παλινδρομεί σε κατεύθυνση παράλληλη με τον άξονα του τροχού. Μετά από κάθε αφαίρεση υλικού, ο τροχός περιστρέφεται λίγο και συγχρόνως δίνεται στον κανόνα μια ταχύτητα. Το μεταξύ των δοντιών του τροχού υλικό αφαιρείται και κατατομές οδόντων δι' εξειλιγμένης παράγονται. Επειδή ο κανόνας είναι ένας οδοντωτός τροχός με άπειρη ακτίνα, μπορεί να συνεργασθεί με όλους τους τροχούς μιας οικογένειας τροχών. Μόνο ένας κανόνας απαιτείται για κάθε module ο οποίος κατασκευάζει οδοντωτούς τροχούς οποιοδήποτε αριθμού δοντιών. Η μορφή του οδοντωτού κανόνα παρουσιάζεται στο σχήμα 1.2.



Σχήμα 1.2
Κοπές με οδοντωτό κανόνα

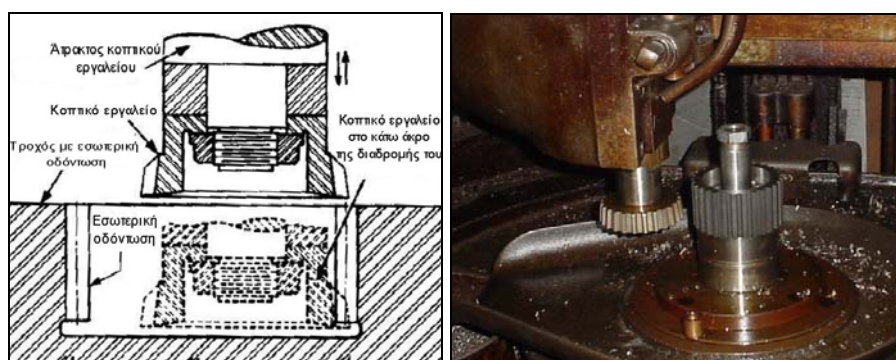
Σαν μειονεκτήματα της μεθόδου αυτής αναφέρονται η μικρή ταχύτητα κατασκευής τροχών και η ανακρίβεια που δημιουργείται λόγω της επανατοποθέτησης του κανόνα, η οποία είναι αναγκαία επειδή ο κανόνας έχει μικρό αριθμό οδόντων και επειδή ο καθένας παράγει ένα διάκενο, πράγμα που σημαίνει ότι για να κοπεί ένας μεγάλος τροχός θα πρέπει ο κανόνας να επανατοποθετηθεί πολλές φορές [2].

1.2.3 Κοπή τροχών με τη μέθοδο Fellows (gear shaper)

Πρόκειται για μια μέθοδο πολύ παρεμφερή με την κοπή με χρήση οδοντωτού κανόνα. Η κυριότερη διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι το κοπτικό εργαλείο έχει τη μορφή ενός συνεργαζόμενου με τον υπό κοπή τροχού [1]. Καθώς το εργαλείο Fellows παλινδρομεί στη διεύθυνση του άξονα του τροχού, περιστρέφεται ταυτόχρονα ενώ μετά από κάθε πλήρη περιστροφή του υπό κοπή τροχού οι άξονες περιστροφής εργαλείου και τροχού μετακινούνται ακτινικά αυξάνοντας έτσι το βάθος της επόμενης κοπής.

Το βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι πως πρόκειται για μια πραγματική διαδικασία γένεσης αφού δεν απαιτείται επανατοποθέτηση του εργαλείου κατά την διαδικασία κοπής. Επιπλέον η μέθοδος μας επιτρέπει τη δημιουργία εσωτερικών

οδοντώσεων όπως φαίνεται και στο συνοδευτικό σχήμα 1.3. Το κύριο μειονέκτημα της μεθόδου είναι πως κάθε διάκενο κόβεται από συγκεκριμένο δόντι του εργαλείου και επομένως εάν κάποιο από αυτά έχει ελάττωμα, αυτό μεταφέρεται αυτούσιο στην κατατομή του υπό κοπή τροχού.



Σχήμα 1.3

Κοπή εσωτερικής και εξωτερικής οδόντωσης με τη μέθοδο Fellows

1.2.4 Κοπή με εργαλείο τύπου Hob (Hobbing)

Ο κοπτήρας Hob έχει τη μορφή είτε επάλληλων κανόνων προσδεμένων στην εξωτερική περιφέρεια κυλίνδρου είτε τη μορφή ατέρμονα κοχλία αποτελούμενου από κοπτικά δόντια (βλ. Σχήμα 1.4). Η συγχρονισμένη ταυτόχρονη περιστροφή κοπτήρα και υπό γένεση τροχού αφαιρεί του υλικό του διακένου ανάμεσα στα δόντια όπως και με τον οδοντωτό κανόνα. Κατά τη διάρκεια της κατεργασίας ο κοπτήρας μετατοπίζεται σταδιακά προς τη διεύθυνση του άξονα του τροχού και καθ' όλο το πλάτος του τροχού με αποτέλεσμα την κοπή δοντιών πλήρους πλάτους.

Το βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι δεν απαιτείται επανατοποθέτηση κοπτικού εργαλείου, όπως γίνεται με τον κανόνα. Επίσης, επειδή κάθε διάκενο οδόντων δημιουργείται από πολλούς οδόντες του Hob, η επίδραση τυχόν υπάρχοντος σφάλματος σε ένα οδόντα του κοπτικού επί της κατατομής των παραγόμενων οδόντων εξομαλύνεται από τη διαδικασία της κοπής από τα υπόλοιπα δόντια του κοπτήρα [2]. Η διαδικασία κοπής Hobbing αποτελεί σήμερα τον πιο διαδεδομένο και έναν από τους ταχύτερους τρόπους κατασκευής οδοντωτών τροχών.

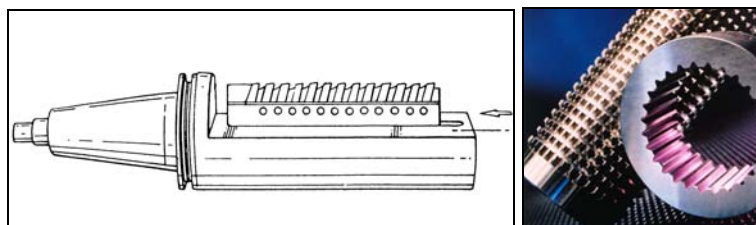


Σχήμα 1.4

Κοπτήρες Hob και διαδικασία κοπής [3]

1.2.5 Κοπή οδοντώσεων με αφαίρεση υλικού (Broaching)

Σε αυτή τη μέθοδο ένα ειδικό γλύφano με κοπτήρες εν σειρά που έχουν το σχήμα του διακένου ανάμεσα στα δόντια, σύρεται επί της επιφάνειας του υπό δημιουργία τροχού (σχήμα 1.5). η μέθοδος αυτή συνήθως χρησιμοποιείται στη δημιουργία εσωτερικών οδοντώσεων όπου όλα τα δόντια υφίστανται ταυτόχρονη κατεργασία. Επόμενο είναι η συγκεκριμένη μέθοδος να εξασφαλίζει μεγάλη ταχύτητα κατεργασίας και άρα τη δυνατότητα για μαζική παραγωγή.



Σχήμα 1.5
Γλύφano broaching και κατεργασμένος τροχός

Οι ακόλουθες μέθοδοι παραγωγής επιτυγχάνουν τη δημιουργία οδοντωτών τροχών με μικρό κόστος και σε μεγάλες ποσότητες.

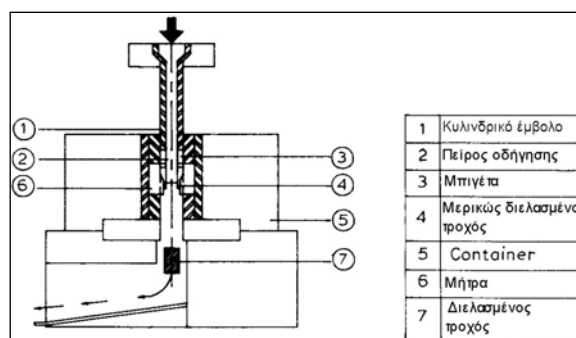
1.2.6 Χύτευση τροχών υπό πίεση (Die casting)

Οι οδοντωτοί τροχοί χυτεύονται υπό πίεση σε κατάλληλα διαμορφωμένες μήτρες. Όπως ισχύει για όλες τις χυτεύσεις, οι μεταβολές του οδοντωτού τροχού λόγω συστολών και η ακρίβεια κατασκευής του καλουπιού επηρεάζουν την ποιότητα του τελικού προϊόντος η οποία προκύπτει σχετικά χαμηλή. Για τη βελτίωση της ποιότητας απαιτούνται διεργασίες αποπεράτωσης όπως αυτές που παρουσιάζονται στη συνέχεια του κεφαλαίου. Αυτό έχει σαν άμεση συνέπεια την αύξηση του κόστους παραγωγής και αποτελεί το λόγο που η μέθοδος προτιμάται για την παραγωγή μεγάλου αριθμού οδοντωτών τροχών σχετικώς χαμηλής ποιότητας.

1.2.7 Έλαση – διέλαση οδοντωτών τροχών (Extruding)

Κατά την ψυχρή έλαση το μέταλλο εφελκύεται μέσα από διαφορετικού μεγέθους μήτρες και το τελικό προϊόν είναι ένας οδοντωτός τροχός πολύ μεγάλου πλάτους, από τον οποίο κόβονται πολλοί μικρότερου πλάτους αλλά ιδίου module και αριθμού δοντιών τροχοί.

Κατά τη διέλαση το θερμό μέταλλο ωθείται με χρήση πρέσας να διέλθει από την μήτρα η οποία του προσδίδει το σχήμα του οδοντωτού τροχού (βλ. σχήμα 1.6). Αυτού του είδους οι τροχοί επιτυγχάνουν μεγάλη διαστατική ακρίβεια και πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες. Η μέθοδος ενδείκνυται για την κοπή τροχών με πολύ μικρές διαστάσεις.



Σχήμα 1.6
Διέλαση οδοντωτών τροχών

1.2.8 Κονεομεταλλουργία (Sintering)

Σε αυτή την περίπτωση μεταλλική πούδρα τοποθετείται σε κατάλληλο καλούπι που έχει το σχήμα του οδοντωτού τροχού και συμπιέζεται από πρέσα. Κατόπιν, το πεπιεσμένο τεμάχιο οδηγείται σε κλίβανο όπου θερμαινόμενο αποκτά την επιθυμητή αντοχή. Η ακρίβεια της κατασκευής είναι καλή αλλά το υψηλό κόστος των εγκατεστημένων μηχανών δεν επιτρέπει παραγωγή μικρής κλίμακας.

1.2.9 Εκβολή πλαστικού (Injection molding)

Θερμό πλαστικό εγχύεται υπό πίεση σε καλούπια κατασκευασμένα λαμβάνοντας υπόψη η επίδραση συστολής – διαστολής του υλικού. Επειδή τα πλαστικά έχουν πολύ μεγαλύτερο θερμικό συντελεστή από τον αντίστοιχο του χάλυβα, είναι προφανές πως πρέπει να έχουν προβλεφθεί μεγάλες χάρες κατατομών για την ομαλή συνεργασία των τροχών τόσο στη μέγιστη όσο και την ελάχιστη θερμοκρασία λειτουργίας [2]. Βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η ποιοτική αποδιδόμενη επιφάνεια που δεν χρειάζεται διαδικασία αποπεράτωσης.

1.3 Μέθοδοι αποπεράτωσης οδοντωτών τροχών

1.3.1 Λείανση (Grinding - Honning)

Η λείανση είναι διαδικασία που προσομοιάζει στην κλασική συνώνυμη κατεργασία με τη διαφορά ότι χρησιμοποιεί ειδικά εργαλεία που προορίζονται για την κατεργασία οδοντωτών τροχών (βλ. σχήμα 1.7). Η διαδικασία του grinding εκτελείται μετά τη σκλήρυνση του τροχού με χρήση ειδικών λειαντικών τροχών οι οποίοι περιστρέφονται εντός του διακένου των δοντιών λειαινώντας τις κατατομές. Κατά τη διάρκεια της κατεργασίας ο άξονας περιστροφής του λειαντικού τροχού εκτελεί και μια επαναλαμβανόμενη γωνιακή κίνηση πάνω σε επίπεδο παράλληλο προς τον άξονα του τεμαχίου. Οι δίσκοι αποτελούνται από λειαντικούς κόκκους και συνδετικό υλικό. Συχνά έχουν τη μορφή οδοντωτού τροχού ή ατέρμονα κοχλία οπότε έχουμε και συνεργασία εργαλείου τεμαχίου και μιλάμε για συνεχή λείανση. Στην περίπτωση των απλών δίσκων η κατεργασία λαμβάνει χώρα σε τμήμα της κατατομής και θεωρείται ασυνεχής. Η ανοχή για περαιτέρω κατεργασία που απομένει είναι της τάξης των 10-15 μm [4].

Επόμενο στάδιο της παραπάνω κατεργασίας και υπεύθυνο για την απόδοση ακόμη καλύτερων επιφανειών είναι το Honning το οποίο γίνεται αποκλειστικά με συνεργαζόμενους τροχούς και με τον ίδιο τρόπο με μόνη διαφορά την κατεύθυνση της κατεργασίας η οποία είναι διαφορετική.



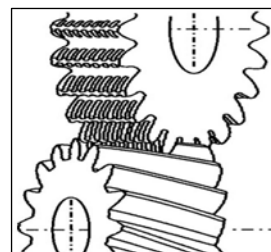
Σχήμα 1.7
Εργαλεία λείανσης και φορά κοπής για το Honning.

1.3.2 Lapping

Η αφαίρεση πολύ μικρών σωματιδίων μετάλλου που βρίσκονται στην επιφάνεια του οδόντος μετά τη θερμική του κατεργασία γίνεται με έναν από τους δύο ακόλουθους τρόπους: είτε χρησιμοποιώντας κοπτικό εργαλείο για lapping (μετωπικοί τροχοί) είτε θέτοντας σε περιστροφή δύο συνεργαζόμενους τροχούς (ελικοειδής, κωνικούς ή με ασύμβατους άξονες) οι οποίοι ψεκάζονται ταυτόχρονα με λειαντική σκόνη για lapping. Και στις δύο περιπτώσεις η λειαντική ουσία επιτυγχάνει την αφαίρεση μετάλλου με βάση την ταχύτητα ολισθήσεως. Η ταχύτητα αυτή λαμβάνει μια μέγιστη τιμή στην περιοχή ποδός του ενός τροχού, ελαττώνεται μέχρι την τιμή μηδέν στον κύκλο κυλίσεως και στη συνέχεια αυξάνει μέχρι μια άλλη μέγιστη τιμή στην κεφαλή του δοντιού. Από αυτή τη διαφορά στην ταχύτητα γίνεται εμφανής και στις αποδιδόμενες επιφάνειες ενώ στην περιοχή του σημείου ολισθήσεως απαιτείται συμπληρωματική λείανση [2].

1.3.3 Απόξεση (Shaving)

Είναι η διαδικασία αφαίρεσης τριχοειδών υπολειμμάτων μετάλλου από τις επιφάνειες της κατατομής και λαμβάνει χώρα πριν τη σκλήρυνση του τροχού. Το κοπτικό εργαλείο (βλ. σχήμα 1.8) έχει τη μορφή οδοντωτού τροχού οι κατατομές του οποίου διαθέτουν εγκοπές που λειτουργούν σαν αιχμές κοπτικού εργαλείου και οι οποίες ουσιαστικά “ξύνουν” την επιφάνεια των κατατομών.



Σχήμα 1.8
Εργαλείο shaving

1.4 Συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο έγινε μια περιληπτική περιγραφή των μεθόδων παραγωγής οδοντωτών τροχών. Αυτό που αξίζει να παρατηρηθεί είναι πως: οι κυριότερες μέθοδοι (hobbing, Fellows κ.α.), που παράγουν και το μεγαλύτερο μέρος των οδοντωτών τροχών, βασίζονται στην αρχή λειτουργίας τους στην κοπή με οδοντωτό κανόνα. Αυτά τα είδη κοπής εκμεταλλεύονται τη γεωμετρία των κοπτικών εργαλείων σε συνδυασμό με την κινηματική που χαρακτηρίζει την κοπή για να δημιουργήσουν τις επιθυμητές επιφάνειες. Με αυτό τον τρόπο “δύσκολες” γεωμετρίες παράγονται με σχετικά απλό και αποτελεσματικό τρόπο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

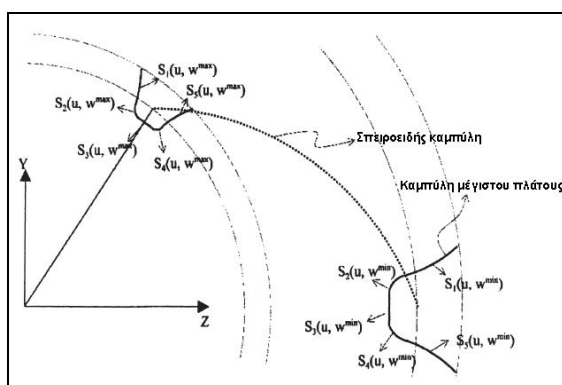
2.1 Εισαγωγή

Στην προσπάθεια να βρεθούν όσο το δυνατόν περισσότερες πληροφορίες σχετικές με την κατεργασία οδοντωτών τροχών σε κέντρα κατεργασιών, έγινε επισταμένη έρευνα τόσο στο διαδίκτυο, όσο και στην βιβλιοθήκη της σχολής. Τα αποτελέσματα της έρευνας αυτής αν και λιγοστά σαν πλήθος, υπήρξαν αρκετά διαφωτιστικά αφού κατέδειξαν τις δυσκολίες του εγχειρήματος καθώς επίσης και τα σημεία στα οποία έπρεπε να δοθεί επιπρόσθετη προσοχή έτσι ώστε να αποφευχθεί η λήψη αποφάσεων που μπορούσαν να οδηγήσουν στη δημιουργία αλγορίθμων που να μην απέδιδαν τα ζητούμενα.

Σε αυτό το σημείο θα παρουσιαστούν συνοπτικά οι δύο δημοσιεύσεις που προσέφεραν τις περισσότερες πληροφορίες έτσι ώστε να γίνει η ορθότερη προσέγγιση στο πρόβλημα. Η πρώτη [5] αφορά στη γέννηση γεωμετρίας καθώς επίσης και g-code για την κοπή κωνικών τροχών με σπειροειδή οδόντωση σε κέντρο κατεργασιών. Η δεύτερη [10] αναφέρεται στην μοντελοποίηση με χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή των μετωπικών οδοντωτών τροχών που γεννώνται με χρήση κοπτικού κανόνα.

2.2 Κατεργασία των γλυπτών επιφανειών των σπειροειδών κωνικών τροχών μέσω φρεζαρίσματος CNC

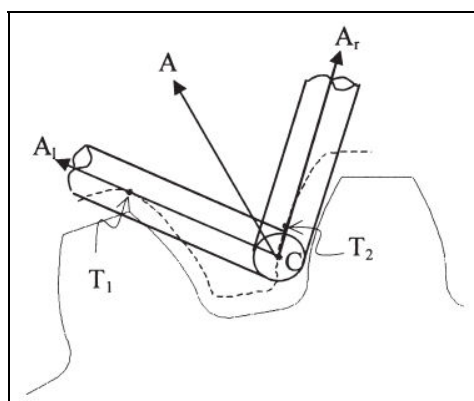
Η συγκεκριμένη έρευνα έλαβε χώρα στο National Research Laboratory for STEP-NC Technology, του School of Mechanical and Industrial Engineering της Νοτίου Κορέας. Σε αυτή τη δημοσίευση οι S.H. Suh, W.S. Jih, H.D. Hong και D.H. Chung παρουσιάζουν το πως προσπάθησαν να βιομηχανοποιήσουν την παραγωγή σπειροειδών κωνικών τροχών με τη χρήση CNC μηχανής φρεζαρίσματος βασισμένοι στη μέθοδο κατεργασίας γλυπτών επιφανειών. Στα πλαίσια αυτού του στόχου, διερευνήθηκε η μοντελοποίηση των επιφανειών του τροχού και ο αλγόριθμος υπολογισμού της διαδρομής του κοπτικού εργαλείου. Το μοντέλο της επιφάνειας δέχεται σαν είσοδο τις παραμέτρους οδοντώσεως του τροχού και εξάγει το δι-παραμετρικό επιφανειακό μοντέλο. Με αυτό τον όρο εννοείται το μοντέλο που ανάλογα με τη θέση w επί της σπειροειδούς καμπύλης (Σχ. 2.1) αποδίδει την κατατομή η ανάμεσα σε δύο οδόντες.



Σχήμα 2.1
Δι-παραμετρική παρουσίαση της γεωμετρίας του σπειροειδούς κωνικού οδοντωτού τροχού.

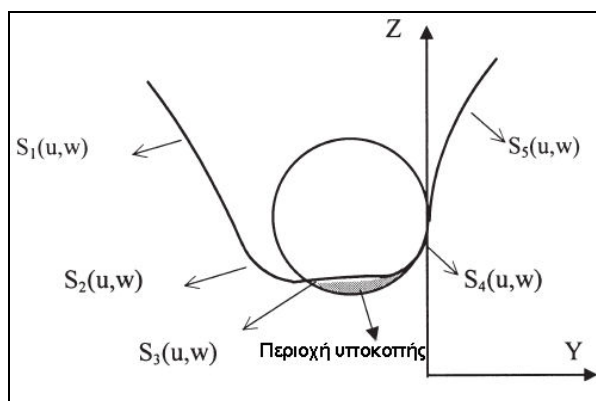
Με αυτό τον τρόπο μπορούν να εξαχθούν οι τροχιές του εργαλείου απευθείας από το μοντέλο υπολογισμού της επιφάνειας. Για την εξαγωγή των τροχιών του εργαλείου, το οποίο με εξαίρεση το ξεχόνδρισμα επιλέγεται να είναι σφαιρικό κονδύλι, πρώτα ευρίσκονται οι δυνατές θέσεις που αυτό μπορεί να λάβει έτσι ώστε να αποφευχθούν οι συγκρούσεις (Σχ. 2.2). Κατόπιν για κάθε τμήμα (S_1, S_2, S_3, S_4 και S_5) της κατατομής u στη θέση w (Σχ. 2.1) εξάγεται ο κώδικας ξεχονδρίματος, ημιφινιρίσματος και φινιρίσματος λαμβάνοντας υπόψιν την επιδιωκόμενη γεωμετρική ακρίβεια και την ποιότητα της επιφάνειας σε συνάρτηση με την επιλογή του εργαλείου.

Μέσω του αλγορίθμου τροχιάς εργαλείου η επιφάνεια της εξειλιγμένης υφίσταται ακριβή κατεργασία χωρίς να υπάρχει κίνδυνος εμπλοκής με το εργαλείο είτε ο έλεγχος γίνεται ταυτόχρονα και στους τέσσερις άξονες (4-axis control), είτε σε τετραξονική μηχανή με δυνατότητα ταυτόχρονου ελέγχου μόνο των τριών από τους τέσσερις (3/4-axis control). Στην προσπάθεια για μείωση της υπολογιστικής πολυπλοκότητας και εκμεταλλευόμενοι τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του τροχού οι δημιουργοί του λογισμικού έκαναν την παραδοχή πως η εξειλιγμένη κάθε οδόντα ενώνεται με τον κύκλο ποδός μέσω ενός απλού φιλέτου σταθερής ακτίνας ίσης με την ακτίνα του τελικού εργαλείου φινιρίσματος. Αυτό οδηγεί στη δημιουργία υποκοπών (Σχ. 2.3) οι οποίες όμως δεν θεωρούνται σημαντικές, αφού η λανθασμένη γεωμετρία που προκύπτει δεν επηρεάζει τη λειτουργία του τροχού δεδομένου ότι οι επιφάνειες που συνεργάζονται είναι αυτές της εξειλιγμένης και εκεί επιτυγχάνεται ακρίβεια.



Σχήμα 2.2

Οριακές θέσεις του εργαλείου σε σχέση με την κατατομή του τροχού.



Σχήμα 2.3

Προκύπτουσα υποκοπή λόγω της χρήσης σφαιρικού εργαλείου

Η εγκυρότητα του μοντέλου επιφανειών επαληθεύτηκε με την κοπή ζεύγους οδοντωτών τροχών και τη μέτρησή τους με τη χρήση μηχανής μέτρησης συντεταγμένων του εργαστηρίου. Επίσης το ζεύγος ελέγχθηκε με τη χρήση μηχανής συνεργασίας οδοντωτών τροχών και παρουσίασε ομαλή και αθόρυβη κίνηση. Δεδομένου του γεωμετρικού μοντέλου η συγκεκριμένη μέθοδος μπορεί να παράγει κώδικα για την κοπή όλων των τύπων και μεγεθών κωνικών σπειροειδών οδοντωτών τροχών. Έτσι, μπορεί να βρει εφαρμογή στην κοπή εξαιρετικά μεγάλων τροχών οι οποίοι δεν δύνανται να κοπούν στις εξειδικευμένες – για τους συγκεκριμένους τροχούς – μηχανές κατεργασίας και κοπής.

2.3 Μοντελοποίηση μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή των οδοντωτών τροχών που γεννώνται με χρήση κοπτικού κανόνα

Στη δημοσίευση αυτή των Bai Hefeng, Michael Savage και Raymond James Knorr του πανεπιστημίου του Akron της πολιτείας του Οχάιο περιγράφεται μια υπορουτίνα σε περιβάλλον Fortran IV. Η υπορουτίνα αυτή παράγει τη γραφική απεικόνιση ενός ή αρκετών δοντιών κάποιου τμήματος ή ολόκληρου του τροχού, βασισμένη στις παραμέτρους της μορφής του κανόνα που χρησιμοποιείται στην κοπή εξωτερικών μετωπικών οδοντώσεων.

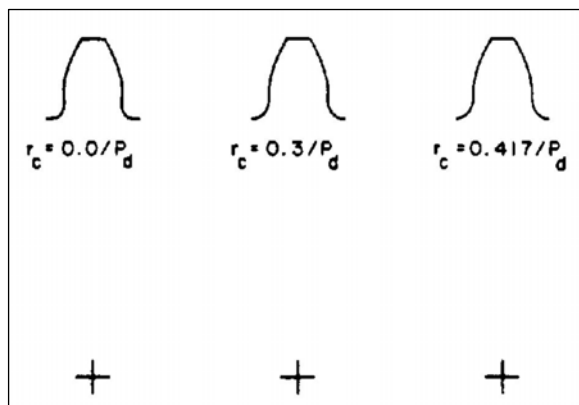
Για τη γέννηση της γεωμετρίας που χαρακτηρίζει το δόντι έχει χρησιμοποιηθεί σαν βασική αρχή το αξίωμα πως η κοινή κάθετος στην επιφάνεια του κανόνα και του δοντιού του τροχού πρέπει να διέρχεται από την τροχιά των επαφών κατά την κίνηση του ζεύγους κανόνα – τροχού. Όλες οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τον κύκλο ποδός, το τροχοειδές, την εξειλιγμένη και την επιφάνεια του κύκλου κεφαλής, πηγάζουν από αυτή τη συνθήκη.

Η περιγραφή του δοντιού βασίζεται στο diametral pitch ($=25,4/\text{module}$), τη γωνία εξειλιγμένης, την ακτίνα καμπυλότητας στην ακμή του δοντιού του κανόνα, τον αριθμό των δοντιών και την ακτίνα του κύκλου κεφαλής και του κύκλου ποδός. Επίσης στην υπορουτίνα περιλαμβάνονται και οι πιθανές μετατοπίσεις του εργαλείου κοπής. Όλα αυτά τα στοιχεία αποτελούν και τις παραμέτρους εισόδου της υπορουτίνας. Σε περίπτωση που το δόντι δεν μπορεί να κατασκευαστεί εμφανίζονται τα κατάλληλα μηνύματα προς το χρήστη υποδεικνύοντάς του τους λόγους για την αδυναμία κατασκευής αυτή.

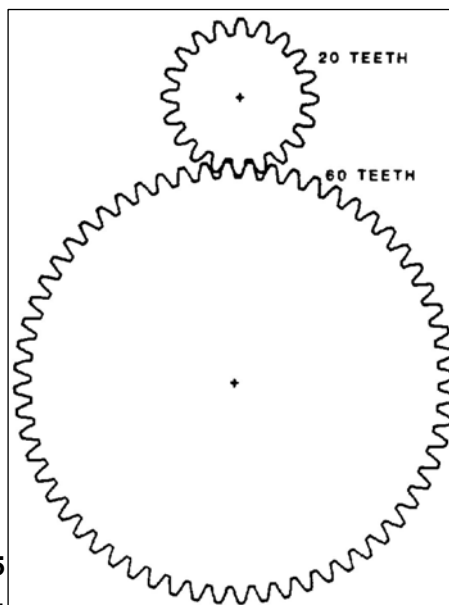
Εξηγείται το γενικότερο θεωρητικό πλαίσιο που διέπει τη σχεδίαση οδοντωτών τροχών που κόβονται με τη χρήση οδοντωτού κοπτικού κανόνα. Ακολούθως, διατυπώνονται οι εξισώσεις δημιουργίας της εξειλιγμένης καμπύλης σε μητρική μορφή και τεκμηριώνεται η μεταφορά τους έτσι ώστε να ανταποκρίνονται σε κοινό σύστημα συντεταγμένων με τα υπόλοιπα στοιχεία που απαρτίζουν το δόντι. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι τρεις κύριες διαμορφώσεις που δύναται να έχει το δόντι του κανόνα και πως αυτές επηρεάζουν τη γεννώμενη γεωμετρία.

Εύλογη συνέχεια για το προηγούμενο θέμα είναι η διατύπωση, και πάλι σε μητρική μορφή, των εξισώσεων που γεννούν τη γεωμετρία του τροχοειδούς. Και πάλι, ορίζονται οι μετατοπίσεις για τη σωστή ταύτιση της καμπύλης του τροχοειδούς με αυτήν της εξειλιγμένης. Οι εξισώσεις κύκλου που αναφέρονται στους κύκλους ποδός και κεφαλής είναι το επόμενο κομμάτι που αναλύεται. Η δημοσίευση κλείνει με τη μεθοδολογία που ακολουθείται στην απεικόνιση μετατοπισμένων οδοντώσεων και τις παραμέτρους που τις διέπουν.

Τα σχήματα 2.4 και 2.5 αποτελούν εξαγόμενες απεικονίσεις της εφαρμογής και υποστηρίζεται πως αποτελούν σημαντικό βοήθημα για το μηχανικό, που επιθυμεί να δει τις επιπτώσεις που θα έχουν στη δημιουργούμενη οδόντωση οι πιθανές αλλαγές που θέτει για το σχήμα του κοπτικού κανόνα. Επισημαίνεται επίσης πως η υπορουτίνα έχει τη δυνατότητα δημιουργίας και απεικόνισης -στο ίδιο σχήμα- ζεύγους τροχών σε συνεργασία εάν εκτελεστεί δύο διαδοχικές φορές.

**Σχήμα 2.4**

Διαμορφώσεις δοντιού για διαφορετικές ακτίνες καμπυλότητας ακμής κανόνα.

**Σχήμα 2.5**

Ζεύγος συνεργαζόμενων τροχών.

2.4 Συμπεράσματα

Το μικρό πλήθος της υπάρχουσας αρθρογραφίας και βιβλιογραφίας πάνω στο αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτέλεσε τόσο αποθαρρυντικό όσο και ενθαρρυντικό παράγοντα για τη συνέχισή της. Αποθαρρυντικό γιατί ουσιαστικά όλο το γνωστικό κομμάτι θα έπρεπε να δημιουργηθεί χωρίς σημαντική εξωτερική βοήθεια και ενθαρρυντικό γιατί επιβεβαίωνε την πρωτοτυπία και αποκλειστικότητα που θα πρέπει να χαρακτηρίζει μια εργασία αυτού του τύπου.

Οι δύο δημοσιεύσεις που παρουσιάστηκαν ήρθαν ουσιαστικά να επιβεβαιώσουν επιλογές που είχαν γίνει κατά την αρχική κατάστρωση των αλγορίθμων γέννησης της γεωμετρίας. Το είδος των εισόδων της εφαρμογής και οι εξισώσεις γέννησης γεωμετρίας από τις εισόδους αυτές ήταν μερικές από τις επιλογές που επιβεβαιώθηκαν. Επίσης, μέσα από μια διαδικασία κριτικής σκέψης αποφασίστηκαν τα σημεία στα οποία θα έπρεπε να γίνουν παρεκκλίσεις προκειμένου να επιτευχθούν οι αρχικοί στόχοι που τέθηκαν για την εργασία. Η διατήρηση της γεωμετρίας του τροχοειδούς, και όχι η απλοποίησή του, και η μη ενσωμάτωση δυνατότητας δημιουργίας μετατοπισμένων οδοντώσεων είναι μερικές από αυτές τις παρεκκλίσεις.

Ένα ακόμη θετικό στοιχείο της έρευνας που έγινε πάνω στις μεθόδους κατασκευής οδοντωτών τροχών, ήταν η απόκτηση γενικότερων γνώσεων πάνω στους οδοντωτούς τροχούς όπως επίσης και στα τεκταινόμενα γύρω από τη βελτίωση της απόδοσής τους. Οι προτεινόμενες από διάφορους ερευνητές δυνατές διαμορφώσεις του τροχοειδούς, έτσι ώστε να ενισχύεται η αντοχή των δοντιών έτρεψαν την πορεία δημιουργίας των ρουτινών κοπής προς την ανεξαρτητοποίησή τους από τις αναλυτικές εξισώσεις που παράγουν τη γεωμετρία του τροχοειδούς. Με αυτό τον τρόπο προσπαθήθηκε να επιτραπούν δυνατότητες αναβάθμισης των ρουτινών έτσι ώστε να μπορούν να ενσωματώσουν διαφοροποιημένα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά στο μέλλον.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ

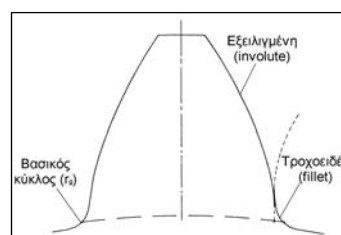
3.1 Εισαγωγή

Προκειμένου να γίνουν κατανοητά τα όσα περιλαμβάνει η ανάλυση του αλγορίθμου που θα ακολουθήσει στο επόμενο κεφάλαιο κρίνεται απαραίτητη η παρουσίαση εκείνων των μεγεθών που απαιτούνται για την πλήρη περιγραφή μιας οδοντώσεως. Δεδομένων: τόσο της κινηματικής ανάλυσης που αφορά τη λειτουργία των οδοντωτών χωρίς την ύπαρξη ολίσθησης μεταξύ των επιφανειών της κατατομής, όσο και των μεθόδων παραγωγής οδοντωτών τροχών όπως αυτές καταγράφηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο, η γεωμετρία που χαρακτηρίζει μια οδόντωση (όχι απαραίτητα μετωπική) είναι πλήρως και σαφώς καθορισμένη.

Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει μια παρουσίαση των μεγεθών και των τρόπων υπολογισμού τους, που χαρακτηρίζουν μια μετωπική οδόντωση και τα οποία είναι απαραίτητα για την εξαγωγή –από την εφαρμογή– της γεωμετρίας που περιγράφει κάθε φορά το ζητούμενο τροχό. Η κινηματική ανάλυση της λειτουργίας των οδοντώσεων, που τεκμηριώνει αυτά τα μεγέθη, θεωρείται γνωστή και δεν θα παρουσιασθεί παρά μόνο όπου κριθεί απαραίτητο.

3.2 Βασική γεωμετρία επιφάνειας εργασίας δοντιού

Όπως φαίνεται και από το σχήμα 3.1 η κατατομή του κάθε δοντιού αποτελείται από δύο κύριες καμπύλες οι οποίες αν επεκταθούν κατά την κάθετη στο σχήμα έννοια δημιουργούν δύο επιφάνειες. Την επιφάνεια εργασίας που ακολουθεί το σχήμα της εξειλιγμένης (involute) και την επιφάνεια του τροχοειδούς (fillet) που δημιουργείται από τον κοπτικό κανόνα ή το ανάλογο εργαλείο κοπής λόγω της μεταξύ τους σχετικής κίνησης.



Σχήμα 3.1
Κατατομή οδόντα

3.2.1 Εξειλιγμένη καμπύλη

Η τροχιά που διαγράφει ένα σημείο ευθείας γραμμής κυλιόμενης χωρίς ολίσθηση πάνω στην περιφέρεια ενός κύκλου είναι η εξειλιγμένη καμπύλη. Ο κύκλος πάνω στον οποίο κυλιέται ονομάζεται βασικός και αποτελεί την αφετηρία της καμπύλης ενώ η ακτίνα του r_g προσδιορίζεται έμμεσα από τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του τροχού όπως θα αναλυθεί παρακάτω. Στο σχήμα 3.2 η ευθεία $G\chi$ κυλιέται επί του βασικού κύκλου (O, r_g) και το σημείο G διαγράφει την εξειλιγμένη GB ενώ ταυτοχρόνως το σημείο A διαγράφει την εξειλιγμένη AN . Προφανώς ισχύουν τα:

$$\overline{AN} = \overline{GB} \text{ και } \overline{GA} = \overline{BN} = \widehat{GN} \quad (3.1)$$

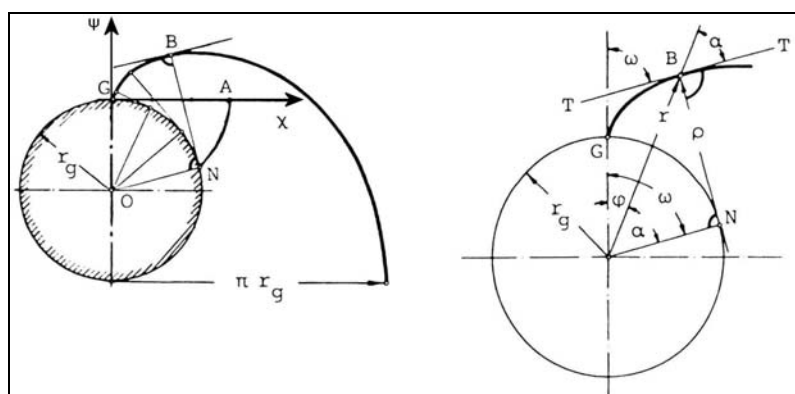
Η BN αποτελεί την ακτίνα καμπυλότητας της εξειλιγμένης στη θέση B .

Από το σχήμα 3.2 αν θεωρήσουμε τις γωνίες φ και α σε ακτίνια (rad) προκύπτει ότι:

$$\widehat{GN} = (\varphi + \alpha) \cdot r_g \text{ και } \overline{BN} = r_g \cdot \tan(\alpha) \quad (3.2)$$

Από τις (3.1) και (3.2) προκύπτει ότι $\varphi = \tan(a) - a$ και η προκύπτουσα συνάρτηση $\varphi(a)$ ονομάζεται συνάρτηση της εξειλιγμένης, ορίζεται μονοσήμαντα από τη γωνία a και συμβολίζεται ως $inv(a)$. Η θέση του σημείου B μπορεί να ορισθεί και με πολικές συντεταγμένες ρ και $r = \frac{r_g}{\cos(a)}$ ενώ η ακτίνα καμπυλότητας στην εξειλιγμένη στη θέση B είναι $\rho = r_g \cdot \tan(a)$. Όταν το σημείο B βρεθεί πάνω στον αρχικό κύκλο (στην περιφέρεια του οποίου τα δύο συνεργαζόμενα στοιχεία που συνιστούν την οδόντωση εμφανίζουν ίση περιφερειακή ταχύτητα) τότε $r = r_0$ και $a = a_0$ [2]. Η a_0 είναι η γωνία εξειλιγμένης που χαρακτηρίζει μια ολόκληρη την οικογένεια οδοντώσεων και οι συνήθεις τιμές που λαμβάνει είναι 20° , 14.5° και 25° . Εύκολα από τις προαναφερθείσες σχέσεις με τα δεδομένα του αρχικού κύκλου $r = r_0$ και $a = a_0$ μπορεί εύκολα να υπολογιστεί η ακτίνα του βασικού κύκλου r_g ως εξής:

$$r_g (mm) = r_0 \cdot \cos(a_0) \quad (3.3)$$



Σχήμα 3.2
Η εξειλιγμένη καμπύλη και χαρακτηριστικά μεγέθη της.

Η συνάρτηση της εξειλιγμένης μπορεί να γραφεί παραμετρικά για τις δύο συντεταγμένες του καρτεσιανού επιπέδου GΨ και GX συναρτήσει της γωνίας ω του σχήματος 3.2 ως εξής:

$$\chi(\omega) = r_g \cdot [\sin(\omega) - \omega \cdot \cos(\omega)] \quad (3.4)$$

$$\psi(\omega) = r_g \cdot [\cos(\omega) - 1 + \omega \cdot \sin(\omega)] \quad (3.5)$$

Όπου: $\omega = a + \varphi$ σε ακτίνια, ο άξονας $\chi' \chi$ ταυτίζεται με ευθεία G χ και ο $\psi' \psi$ με την κατακόρυφη αξονική γραμμή του σχήματος 3.2.

3.2.2 Χαρακτηριστικά μεγέθη οδοντώσεων

Όταν δύο μετωπικοί τροχοί (ή ένας τροχός και ένας οδοντωτός κανόνας) συνεργάζονται, το σημείο (για λόγους απλοποίησης έχουμε θεωρήσει πως οι τροχοί έχουν μηδενικό πάχος) επαφής τους είναι κάθε χρονική στιγμή μοναδικό. Καθώς το δόντι του ενός τροχού εισχωρεί εντός του διακένου ανάμεσα σε δύο δόντια του άλλου, το σημείο επαφής του ενός δοντιού με το άλλο μετακινείται επί των κατατομών τους απομακρυνόμενο από το κέντρο του ενός τροχού και προσεγγίζοντας το κέντρο του άλλου (απομακρυνόμενο ή προσεγγίζοντας την επίπεδη επιφάνεια του κανόνα αντίστοιχα).

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως για δύο οδοντωτούς τροχούς (ή για ένα τροχό και έναν κανόνα) που συνεργάζονται υπάρχει ένα σημείο πάνω στην κατατομή των δοντιών και των δύο γνωστό και ως το σημείο κυλίσεως όπου η περιφερειακή ταχύτητα και των δύο τροχών (ή η περιφερειακή ταχύτητα του τροχού και η μεταφορική ταχύτητα του κανόνα) γίνονται ίσες. Ο κύκλος που διέρχεται από το σημείο αυτό ονομάζεται αρχικός ή ονομαστικός κύκλος. Ο αρχικός κύκλος έχει διάμετρο που συμβολίζεται με d_0 και ακτίνα που συμβολίζεται με r_0 και αποτελεί ένα από τα θεμελιώδη μεγέθη μιας οδόντωσης αφού με βάση αυτόν προκύπτουν όλες οι υπόλοιπες διάμετροι που χαρακτηρίζουν τη γεωμετρία μιας οδόντωσης.

Εάν n είναι ο αριθμός των δοντιών ενός τροχού, το βήμα ή η περιφερειακή απόσταση ανάμεσα σε δύο διαδοχικά δόντια πάνω στην περιφέρεια του αρχικού κύκλου θα είναι:

$$t_0(mm) = \frac{2 \cdot \pi \cdot r_0}{n} \quad (3.6)$$

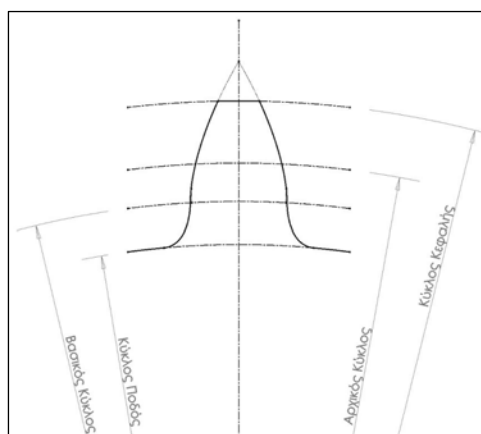
Η ποσότητα:

$$m(mm) = \frac{t_0}{\pi} \quad (3.7)$$

Ονομάζεται μέτρο της οδοντώσεως ή module, είναι γεωμετρικό μέγεθος και λαμβάνει τυποποιημένες τιμές που δίνονται στον πίνακα 1 του παραρτήματος. Το module αποτελεί μαζί με τον αριθμό δοντιών n τα δύο μεγέθη που μπορούν να καθορίσουν τα υπόλοιπα γεωμετρικά μεγέθη μιας οδοντώσεως. Αυτός είναι και ο λόγος που χρησιμοποιούνται στην πράξη από τους κατασκευαστές για την παραγωγή οδοντωτών τροχών. Εύκολα αν κάποιος διαθέτει το m και τον αριθμό n του επιθυμητού προς κατασκευή οδοντωτού τροχού από τις (3.5) και (3.6) μπορεί να υπολογίσει την αρχική ακτίνα ως εξής:

$$r_0(mm) = \frac{(m \cdot n)}{2} \quad (3.8)$$

Για λόγους αντοχής, τα δόντια έχει επιλεγεί να μην έχουν σαν κορυφή την ακμή τη σχηματιζόμενη από τις δύο συμμετρικές καμπύλες εξειλιγμένης εκατέρωθεν του άξονα συμμετρίας του δοντιού (βλ. σχήμα 3.3). Αυτό που συμβαίνει στην πράξη είναι κατά τη διαδικασία της κοπής του τροχού, το κοπτικό εργαλείο να κόβει ένα τόξο αντί να επιτρέπει τη δημιουργία ακμής. Το τόξο αυτό ανήκει στην περιφέρεια του επονομαζόμενου κύκλου κεφαλής, ο οποίος έχει ακτίνα κεφαλής που για τις τυποποιημένες οδοντώσεις είναι:



Σχήμα 3.3

Διαμόρφωση κεφαλής στο δόντι και χαρακτηριστικά μεγέθη.

$$r_k(mm) = r_0 + m \quad (3.9)$$

Το τόξο που δημιουργείται κατά την κοπή ενός τροχού από τον κανόνα στον πυθμένα της κοιλότητας ανάμεσα σε δύο δόντια ανήκει στην περιφέρεια ενός κύκλου

που ονομάζεται κύκλος ποδός. Όταν συνεργάζονται δύο οδοντωτοί τροχοί, προκειμένου η συνεργασία των δοντιών να γίνεται χωρίς τον κίνδυνο ανεπιθύμητων επαφών των κεφαλών των δοντιών του ενός τροχού με τον κύκλο ποδός του άλλου επιβάλλεται η ύπαρξη μιας ακτινικής χάρης C_r μεταξύ του δυνητικού και του πραγματικού κύκλου ποδός (βλ. σχήμα 3.4). Η ακτινική χάρη καθορίζεται συνήθως ως ποσοστό του module και παίρνει τιμές στο εύρος 0.25% - 0.3%. Σύμφωνα με αυτό τον ορισμό η τιμή για την ακτίνα ποδός θα προκύψει από τη σχέση:

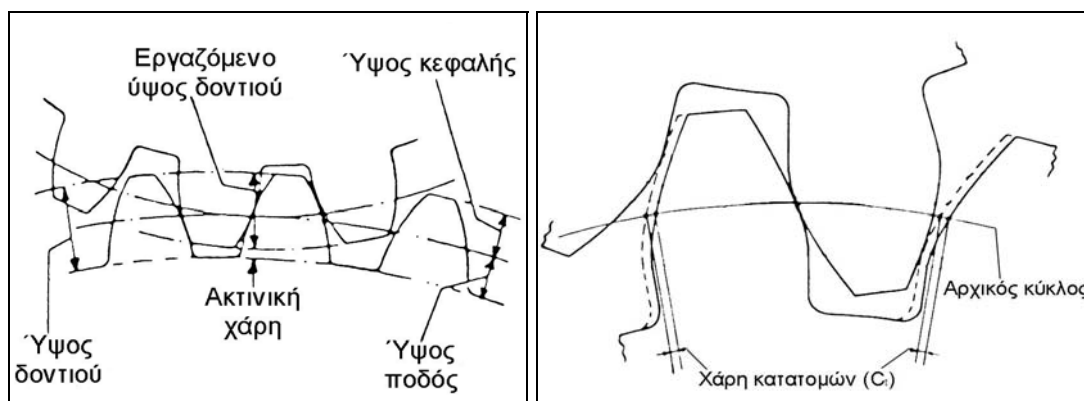
$$r_f(mm) = r_o - (1 + C_r) \cdot m \quad (3.10)$$

Επομένως, σύμφωνα με τα όσα ορίστηκαν παραπάνω το συνολικό ύψος του δοντιού επί του άξονα συμμετρίας του είναι ίσο με $(2 + C_r) \cdot m$ ενώ το προβλεπόμενο ύψος εργασίας εκτείνεται 1 module πάνω και κάτω από τον αρχικό κύκλο δηλαδή είναι ίσο με $2 \cdot m$ (βλ. σχήμα 3.4).

Κατ' αναλογία με την ακτινική χάρη ορίζεται και η χάρη των κατατομών C_t η οποία καθορίζεται ως ποσοστό του πάχους του δοντιού S_0 στην περιφέρεια του αρχικού κύκλου εάν αυτό αντιστοιχούσε στο μισό του βήματος του τροχού (καθώς το άλλο μισό θα αποτελούσε το διάκενο ανάμεσα στα δόντια). Η προκύπτουσα τιμή αφαιρείται από το ήμισυ του βήματος και έτσι προκύπτει το πάχος του δοντιού πάνω στον αρχικό κύκλο. Οι τιμές που παίρνει η χάρη κατατομών κυμαίνονται από 0% - 0.05% και σύμφωνα με όσα περιγράφηκαν η σχέση που δίνει το πάχος του δοντιού στον αρχικό κύκλο είναι η ακόλουθη:

$$s_0(mm) = 0.5 \cdot (1 - C_t) \cdot t_0 \quad (3.11)$$

Η χάρη των κατατομών επιβάλλεται από την ανάγκη για σωστή συνεργασία των τροχών της οδόντωσης. Δεν πρέπει όμως να παραβλέπεται το γεγονός ότι οι τροχοί αυτοί αποτελούν προϊόντα κατεργασίας και ως τέτοια δεν είναι διαστατικά τέλει ενώ και η απόσταση των αξόνων περιστροφής τους μπορεί να μην είναι η προβλεπόμενη λόγω κακοτεχνίας.



Σχήμα 3.4

Τα χαρακτηριστικά ύψη του δοντιού, η ακτινική χάρη και η χάρη των κατατομών

Μετά τον υπολογισμό και του πάχους του δοντιού στον αρχικό κύκλο εύκολα προκύπτει πως το διάκενο l_0 ανάμεσα σε δύο διαδοχικά δόντια θα είναι η διαφορά αυτού του πάχους από το βήμα της οδόντωσης. Θα είναι δηλαδή:

$$l_0(mm) = t_0 - s_0 \quad (3.12)$$

3.2.3 Βοηθητικά μεγέθη οδοντώσεων

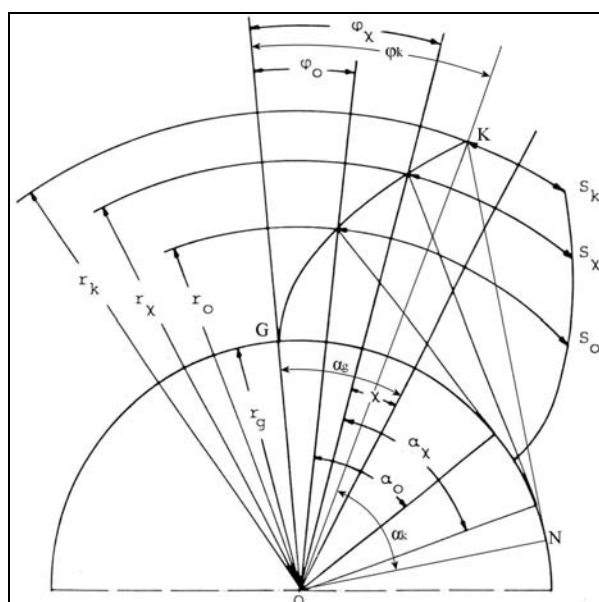
Σε αυτό το σημείο και για λόγους κατανόησης των σχέσεων που χρησιμοποιούνται από την εφαρμογή για τη δημιουργία τόσο της κατατομής, στο κομμάτι που αφορά τη γεωμετρία, όσο και του κώδικα κοπής (G – code) κομμάτι της αποπεράτωσης. Γνωρίζοντας το πάχος του δοντιού στον αρχικό κύκλο μπορεί κανείς να υπολογίσει το πάχος του δοντιού σε οποιαδήποτε άλλη ακτίνα r_x με τον ακόλουθο τρόπο: στο σχήμα 3.5 τα τόξα S_0 και S_x εκατέρωθεν του άξονα συμμετρίας του δοντιού είναι τα πάχη του δοντιού στις ακτίνες r_0 και r_x αντίστοιχα. Επομένως με χρήση απλής γεωμετρίας κύκλων προκύπτουν:

$$S_x = 2 \cdot x \cdot r_x \quad (3.13)$$

$$S_0 = 2 \cdot (\varphi_x - \varphi_0 + x) \cdot r_0 \quad (3.14)$$

Και με απαλοιφή του x προκύπτει η σχέση:

$$\frac{S_x}{r_x} = \frac{S_0}{r_0} + 2 \cdot (\varphi_0 - \varphi_x) \quad (3.15)$$



Σχήμα 3.5
Πάχη δοντιού και απαραίτητα για τον υπολογισμό τους μεγέθη.

Όπου:

$$\varphi_0 = \text{inv}(a_0) = \tan(a_0) - a_0 \quad (3.16)$$

$$\varphi_x = \text{inv}(a_x) = \tan(a_x) - a_x \quad (3.17)$$

$$r_g = r_0 \cdot \cos(a_0) = r_x \cdot \cos(a_x) = r_k \cdot \cos(a_k) \quad (3.18)$$

Επομένως, για τον βασικό κύκλο με ακτίνα r_g από τις σχέσεις (3.15), (3.15) και (3.15) για $x = g$ και άρα $\varphi_g = 0$ θα προκύψει η γωνία (βλ. σχήμα 3.5 γωνία α_g) του σημείου εκκίνησης της εξειλιγμένης καμπύλης επί του βασικού κύκλου σε σχέση με τον άξονα συμμετρίας του δοντιού. Η γωνία αυτή είναι:

$$a_g (\text{rad}) = \frac{\frac{S_0}{r_0} + 2 \cdot [\tan(a_0) - a_0]}{2} \quad (3.19)$$

Ακολουθως, θα υπολογισθούν οι γωνίες α_k και φ_k προκειμένου να είναι δυνατή η εύρεση της γωνίας του τόξου \widehat{GN} (βλ. σχήμα 3.5), επί του βασικού κύκλου, πάνω στο οποίο κυλιέται κάθε φορά η ευθεία δημιουργίας της εξελιγμένης μέχρι και την τομή της με τον κύκλο κεφαλής στο σημείο Κ. Από το τρίτο σκέλος της ισότητας (3.18) και επιλύοντας ως προς α_k προκύπτει:

$$a_k(\text{rad}) = \cos^{-1}\left(\frac{r_g}{r_k}\right) \quad (3.20)$$

Ενώ, από τη σχέση (3.17) για $x = k$ προκύπτει η γωνία:

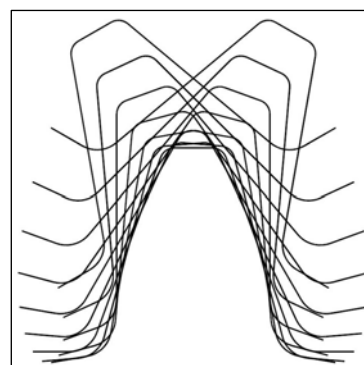
$$\varphi_k(\text{rad}) = \tan(a_k) - a_k \quad (3.21)$$

Έτσι η ζητούμενη γωνία \widehat{GON} (f_k για την εφαρμογή) θα δίνεται από τη σχέση:

$$f_k(\text{rad}) = \varphi_k + a_k \quad (3.22)$$

3.3 Γεωμετρία τροχοειδούς

Το τροχοειδές, όπως προαναφέρθηκε, γεννάται κατά την κοπή με χρήση οδοντωτού κανόνα, ή ανάλογης, μεθόδου από την σχετική κίνηση του κανόνα με το τεμάχιο. Και πιο συγκεκριμένα η περιβάλλουσα των θέσεων (βλ. σχήμα 3.6) που λαμβάνει κατά την κοπή το στρογγυλεμένο (συνήθως) άκρο του κανόνα, αποτελεί το σύνορο ανάμεσα στο υλικό που αφαιρείται και σε αυτό που μένει σχηματοποιώντας το τροχοειδές στη βάση του δοντιού. Οι ευθείες πλευρές του δοντιού του κανόνα μορφοποιούν τις κατατομές εργασίας του δοντιού και η περιβάλλουσα ακολουθεί την εξελιγμένη καμπύλη. Από την επίπεδη περιοχή ανάμεσα σε δύο διαδοχικά δόντια του κανόνα διαμορφώνεται το τόξο του κύκλου κεφαλής του δοντιού του τροχού. Όταν δεν υπάρχουν υποκοπές κατασκευής το τροχοειδές εφάπτεται στην κατατομή εργασίας του δοντιού και οι δύο καμπύλες ενώνονται εφάπτονται στο σημείο τομής τους. Στην περίπτωση ύπαρξης υποκοπών η περιβάλλουσα καμπύλη εμφανίζει σημείο ασυνέχειας [6].

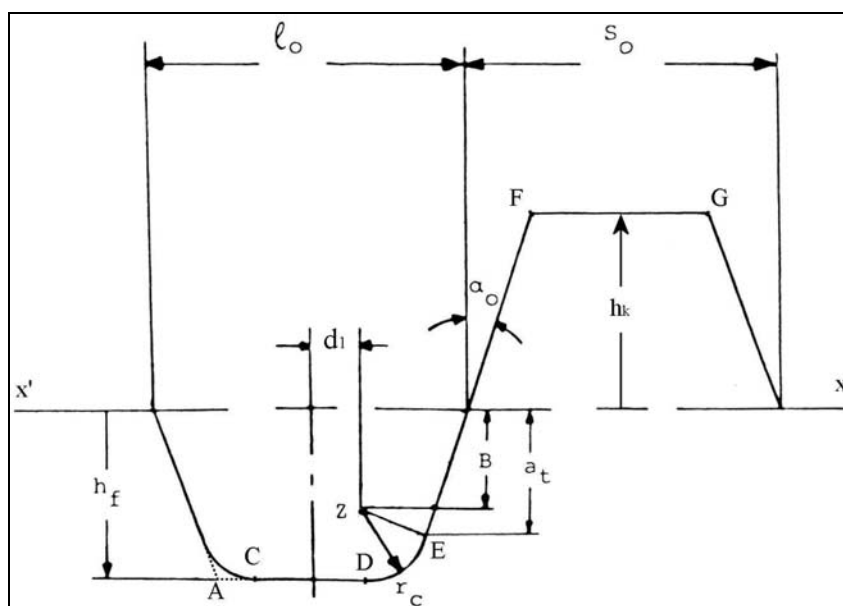


Σχήμα 3.6
Περιβάλλουσα των θέσεων του κοπτικού κανόνα σε σχέση με το εν τη γενέσει δόντι [6].

3.3.1 Κατασκευαστικά μεγέθη του οδοντωτού κανόνα και οι επιπτώσεις τους στα χαρακτηριστικά του γεννώμενου δοντιού

Στην παρούσα μελέτη επιλέχθηκε για την εύρεση της καμπύλης του τροχοειδούς να χρησιμοποιηθεί το μοντέλο της κοπής του τροχού με χρήση οδοντωτού κανόνα καθώς οι εξισώσεις που χαρακτηρίζουν την κινηματική της κοπής είναι οι απλούστερες δυνατές ενώ παράλληλα διατηρείται η συμβατότητα του τροχού που μοντελοποιεί η εφαρμογή με τους υπόλοιπους οδοντωτούς τροχούς. Στη συνέχεια θα παρουσιασθούν τα κύρια κατασκευαστικά μεγέθη που καθορίζουν τη γεωμετρία του κανόνα. Από την γεωμετρία του κανόνα θα περιγραφεί ο τρόπος που αποκτάται η γεωμετρία του παραγόμενου τροχοειδούς.

Ο οδοντωτός κανόνας επειδή προσομοιώνει οδοντωτό τροχό άπειρης ακτίνας έχει το γνώρισμα ότι οι κατατομές εξειλιγμένης καμπύλης (τμήμα E – F σχήμα 3.7) έχουν εκφυλισθεί σε ευθείες. Κατά τη συνεργασία του κανόνα με τον υπό κοπή οδοντωτό τροχό, η απόσταση της ευθείας, (βοηθητική ευθεία χ'χ σχήμα 3.7) που διέρχεται από το σημείο κυλίσεως των δοντιών του κανόνα, από τον κύκλο ποδός του υπό κοπή τροχού επιλέγεται να είναι ίση με το ύψος ποδός (h_f σχήμα 3.7) του τροχού. Κατ' αντιστοιχία η απόσταση της χ'χ από το ευθύ τμήμα FG του κανόνα είναι ίση με το ύψος κεφαλής h_k του δοντιού του τροχού. Επιπλέον, το πάχος δοντιού του κανόνα στο σημείο κυλίσεως θα είναι ίσο με το διάκενο l_0 δύο διαδοχικών δοντιών του τροχού πάνω στον αρχικό κύκλο, ενώ αντίστοιχα το διάκενο των δοντιών του κανόνα θα είναι ίσο με το πάχος s_0 του δοντιού του τροχού πάνω στον αρχικό κύκλο.



Σχήμα 3.7
Γεωμετρικά μεγέθη του οδοντωτού κανόνα

Όταν ο κανόνας δεν παρουσιάζει καμπυλότητα στα άκρα του δοντιού, τότε το τροχοειδές γεννάται αποκλειστικά από την ακμή του δοντιού (θέση A σχήμα 3.7). Όμως τα δόντια των κοπτικών εργαλείων που χρησιμοποιούν τη μέθοδο κυλίσεως έχουν στρογγυλευθεί με ακτίνα καμπυλότητας r_c . Το κέντρο καμπυλότητας Z αυτής της διαμόρφωσης απέχει από το τμήμα CD απόσταση ίση με r_c και άρα:

$$B(mm) = r_0 - r_f - r_c \quad (3.23)$$

Επομένως, όταν $r_c = 0$ το σημείο Z ταυτίζεται με το A. Εάν d_1 είναι η απόσταση του κέντρου Z του κύκλου στρογγυλεύσεως από τον άξονα συμμετρίας του δοντιού του κανόνα (βλ. σχήμα 3.7) τότε με απλή τριγωνομετρία προκύπτει ότι:

$$d_1(mm) = \frac{l_0}{2} - B \cdot \tan(\alpha_0) - \frac{r_0}{\cos(\alpha_0)} \quad (3.24)$$

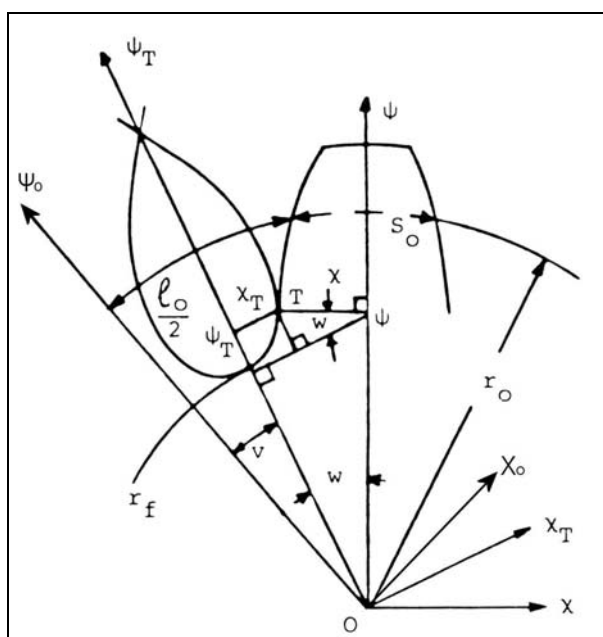
Είναι σαφές ότι όταν $d_1 = 0$ ο άξονας συμμετρίας του διακένου των δοντιών θα συμπίπτει με τον άξονα συμμετρίας του τροχοειδούς [2]. Η σχέση μεταξύ των αξόνων συμμετρίας των: διακένου των δοντιών ($O\Psi_0$), του τροχοειδούς ($O\Psi_T$) και του δοντιού ($O\Psi$) παρουσιάζεται αναλυτικότερα στο σχήμα 3.8. Η γωνία ανάμεσα στον

άξονα συμμετρίας του δοντιού (ΟΨ) και τον άξονα συμμετρίας του διακένου των δοντιών (ΟΨ₀) είναι ίση με το ήμισυ της γωνίας βήματος του τροχού φ_t η οποία προκύπτει εύκολα από τη σχέση:

$$\varphi_t(rad) = \frac{2 \cdot \pi}{n} \quad (3.25)$$

Όταν $r_c > 0$ το σημείο Z ακολουθεί μια καμπύλη τροχοειδούς παρόμοια με αυτή του σχήματος 3.8. Η τελευταία έχει προέλθει από την καμπύλη που διαγράφει το σημείο Z αν αυτή μετατοπισθεί, προς τα έξω, επί του καθέτου διανύσματος, που διέρχεται από το εκάστοτε σημείο της, και για απόσταση ίση με r_c . Αυτό σημαίνει πως ο άξονας συμμετρίας του τροχοειδούς, που παράγεται από το κέντρο στρογγυλεύσεως Z του κανόνα, θα είναι και άξονας συμμετρίας του τροχοειδούς που παράγει το καμπύλο άκρο του κανόνα (DE σχήμα 3.7). Επιπλέον, όταν το δόντι του κανόνα κόψει με το σημείο D του σχήματος 3.7 (εφαπτόμενο με το ευθύ τμήμα του CD στον κύκλο ποδός του τροχού), τότε το σημείο Z θα βρίσκεται πάνω στον άξονα συμμετρίας του τροχοειδούς. Επομένως, η γωνία ανάμεσα στον άξονα συμμετρίας του δοντιού (ΟΨ) και τον άξονα συμμετρίας του τροχοειδούς (ΟΨ_T) θα προκύψει τη δεδομένη στιγμή, (και αφού έχουμε υπολογίσει το d_1 και δεν έχουμε ολίσθηση μεταξύ κανόνα και τροχού) και είναι ίση με:

$$w(rad) = \frac{\varphi_t}{2} - \frac{d_1}{r_0} \quad (3.26)$$



Σχήμα 3.8
Καμπύλη τροχοειδούς και άξονες συμμετρίας δοντιού (ΟΨ), τροχοειδούς (ΟΨ_T) και διακένου (ΟΨ₀) μεταξύ δοντιών [2].

Αφού, ακολούθως κατά τη μεταφορική του κίνηση ο κανόνας διανύει διάστημα ίσο με d_1 έτσι ώστε ο άξονας συμμετρίας του δοντιού του να ταυτιστεί με τον άξονα συμμετρίας του διακένου των δοντιών του τροχού (ΟΨ₀). Η γωνία ανάμεσα στον άξονα συμμετρίας του τροχοειδούς (ΟΨ_T) και του άξονα συμμετρίας του διακένου των δοντιών του τροχού (ΟΨ₀) προκύπτει εύκολα από τη σχέση 3.25 και το σχήμα 3.8 και είναι ίση με:

$$v(rad) = \frac{\varphi_t}{2} - w \quad (3.27)$$

3.3.2 Μεθοδολογία εύρεσης των σημείων της καμπύλης του τροχοειδούς

Όταν $r_c > 0$ για να ευρεθούν τα σημεία της καμπύλης του τροχοειδούς ακολουθείται η εξής διαδικασία:

α) Βρίσκονται πρώτα τα σημεία του τροχοειδούς που διαγράφει το σημείο Z του δοντιού του κανόνα. Το σχήμα 3.9 δείχνει τη δημιουργία του τροχοειδούς του σημείου Z. Η αρχική θέση του σημείου Z είναι η Z_1 ενώ μια μελλοντική θέση του σημείου Z έστω ότι είναι η Z_2 . για να γίνει αυτό ο κανόνας κινήθηκε κατά απόσταση $\vartheta \cdot r_0$ ενώ ο τροχός εστράφη κατά γωνία θ . Στο σύστημα αναφοράς ($X_Z O \Psi_Z$) που περιστρέφεται μαζί με το τροχοειδές οι συντεταγμένες του σημείου Z_2 είναι οι X_Z, Ψ_Z τέτοιες ώστε:

$$X(\vartheta)_Z = r_z \cdot \sin(T - \vartheta) = r_z \cdot [\sin(T) \cdot \cos(\vartheta) - \cos(T) \cdot \sin(\vartheta)] \quad (3.28)$$

$$\Psi(\vartheta)_Z = r_z \cdot \cos(T - \vartheta) = r_z \cdot [\cos(T) \cdot \cos(\vartheta) + \sin(T) \cdot \sin(\vartheta)] \quad (3.29)$$

Όπου:

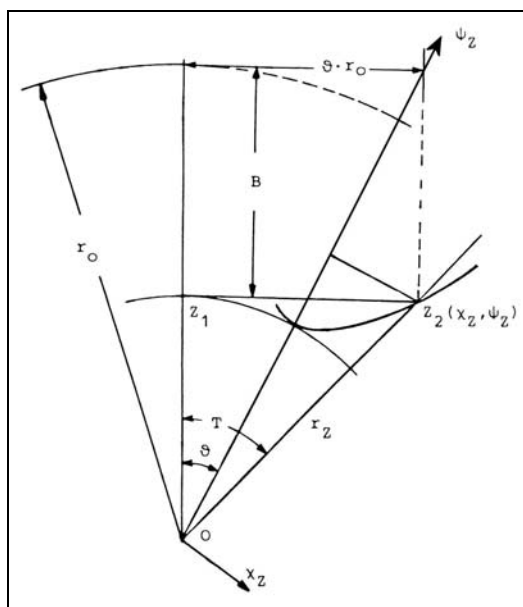
$$\vartheta \cdot r_0 = r_z \cdot \sin(T) \quad (3.30)$$

$$r_0 - B = r_z \cdot \cos(T) \quad (3.31)$$

Μετά από αντικατάσταση των (3.30) και (3.31) στις (3.28) και (3.29) οι συντεταγμένες της θέσης Z_2 του σημείου Z στο τοπικό (περιστρεφόμενο) σύστημα αναφοράς ($X_Z O \Psi_Z$) γίνονται:

$$X(\vartheta)_Z = \vartheta \cdot r_0 \cdot \cos(\vartheta) - (r_0 - B) \cdot \sin(\vartheta) \quad (3.32)$$

$$\Psi(\vartheta)_Z = (r_0 - B) \cdot \cos(\vartheta) + \vartheta \cdot r_0 \cdot \sin(\vartheta) \quad (3.33)$$



Σχήμα 3.9
Δημιουργία γενέτειρας τροχοειδούς από το σημείο Z του κανόνα [2].

β) Υπολογίζεται κατόπιν η κάθετος σε κάθε θέση του τροχοειδούς και επ' αυτής λαμβάνεται μήκος ίσο με την ακτίνα r_c εκτός και αν αυτή είναι μηδέν οπότε αυτό το βήμα της διαδικασίας παραλείπεται. Στο σχήμα 3.10 παρουσιάζεται η εύρεση

της πραγματικής θέσης ενός σημείου T του πραγματικού τροχοειδούς, που προκύπτει από τον κανόνα του σχήματος 3.7. στη θέση Z₂, που υπολογίσθηκε στο προηγούμενο βήμα της διαδικασίας, φέρεται η εφαπτομένη του τροχοειδούς, η οποία τέμνει τον άξονα των Ψ_Z στη θέση O', και σχηματίζει με αυτόν γωνία A. Με χρήση του βοηθητικού σχήματος του σχήματος 3.10 και με βάση τη γεωμετρική ερμηνεία της παραγώγου προκύπτει η ακόλουθη σχέση [2]:

$$\frac{d\Psi_Z}{dX_Z} = \tan(\Gamma) = \frac{1}{\tan(A)} \quad (3.34)$$

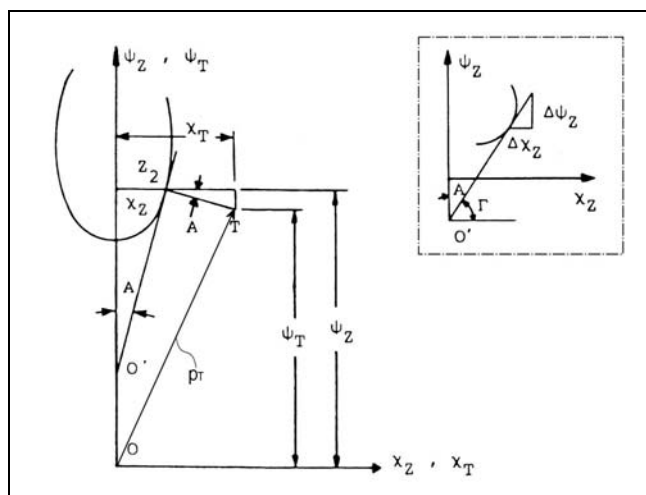
Παραγωγίζοντας τις (3.32) και (3.33) ως προς θ και λόγω της (3.34) θα προκύψει για κάθε θ η:

$$\tan(A) = \frac{\frac{dX_Z}{d\vartheta}}{\frac{d\Psi_Z}{d\vartheta}} = \frac{-\vartheta \cdot r_0 \cdot \sin(\vartheta) + B \cdot \cos(\vartheta)}{B \cdot \sin(\vartheta) + \vartheta \cdot r_0 \cdot \cos(\vartheta)} \quad (3.35)$$

Επίσης, φέρεται και η κάθετος στη θέση Z₂ του τροχοειδούς επί της οποίας λαμβάνεται μήκος Z₂T = r_c, και με αυτόν τον τρόπο προσδιορίζεται το σημείο T που αποτελεί και το πραγματικό σημείο του παραγόμενου τροχοειδούς. Οι συντεταγμένες X_T, Ψ_T στο τοπικό (περιστρεφόμενο) σύστημα αναφοράς (X_TOΨ_T) με χρήση τριγωνομετρίας θα δίνονται από τις σχέσεις:

$$X(\vartheta)_T = X(\vartheta)_Z + r_c \cdot \cos(A) \quad (3.36)$$

$$\Psi(\vartheta)_T = \Psi(\vartheta)_Z + r_c \cdot \sin(A) \quad (3.37)$$



Σχήμα 3.10
Εύρεση της πραγματικής θέσης T του σημείου Z₂ του τροχοειδούς [2].

γ) Επειδή οι ευρεθείσες συντεταγμένες του τροχοειδούς αναφέρονται στο σύστημα συντεταγμένων (X_TOΨ_T) όπου ο OΨ_T αποτελεί τον άξονα συμμετρίας του τροχοειδούς, θα πρέπει να αναφερθούν στο κύριο σύστημα συντεταγμένων (X₀OΨ₀).

3.4 Εναρμόνιση σε ένα κύριο σύστημα συντεταγμένων, των σχετικών συστημάτων του τροχοειδούς και της εξειλιγμένης

Προκειμένου, να υπάρχει ένα σύστημα συντεταγμένων (X₀OΨ₀) (βλ. σχήμα 3.8) κοινό τόσο για το τροχοειδές όσο και για την εξειλιγμένη θα πρέπει το σύστημα

συντεταγμένων ($X_T O \Psi_T$) να περιστραφεί δεξιόστροφα κατά γωνία ν . Αφού τα δύο συστήματα έχουν κοινή αρχή των αξόνων αρκεί η χρήση ενός απλού πίνακα περιστροφής 0R_T έτσι ώστε να λάβουμε τις συντεταγμένες του διανύσματος p_T (O_T) (βλ. σχήμα 3.10) του συστήματος συντεταγμένων ($X_T O \Psi_T$) στο σύστημα συντεταγμένων ($X_0 O \Psi_0$). Οι συντεταγμένες αυτές δίνονται από τη σχέση [7]:

$$p_0 = {}^0R_T \cdot p_T \quad (3.38)$$

Όπου:

$$p(\vartheta)_0 = \begin{bmatrix} X(\vartheta)_0 \\ \Psi(\vartheta)_0 \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

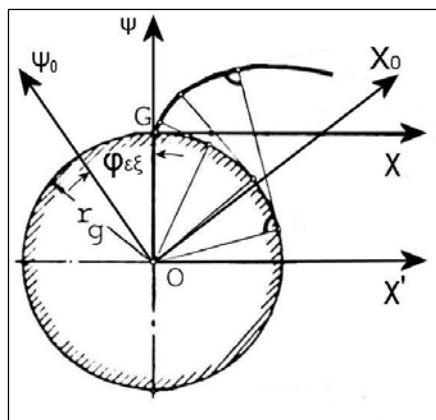
$$p(\vartheta)_T = \begin{bmatrix} X(\vartheta)_T \\ \Psi(\vartheta)_T \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

$${}^0R(\nu)_T = \begin{bmatrix} \cos(\nu) & -\sin(\nu) \\ \sin(\nu) & \cos(\nu) \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

Ο λόγος που επιλέχθηκε ο άξονας συμμετρίας του διακένου των δοντιών ($O\Psi_0$) σαν άξονας συμμετρίας όλης της γεωμετρίας του δοντιού είναι γιατί η εφαρμογή χτίσθηκε χρησιμοποιώντας το συγκεκριμένο άξονα συμμετρίας για λόγους που θα επεξηγηθούν καλύτερα σε επόμενο κεφάλαιο. Εξάλλου, και οι δύο δυνατότητες αποτελούν τις δύο όψεις του ίδιου νομίσματος. Η εξειλιγμένη καμπύλη, με τον τρόπο εξαγωγής της από τις εξισώσεις (3.4), (3.5), έχει σαν αρχή αξόνων του συστήματος που παράγεται το σημείο G του σχήματος 3.11. Προκειμένου η γεννώμενη καμπύλη να αναφέρεται σε συντεταγμένες του κυρίου συστήματος συντεταγμένων ($X_0 O \Psi_0$) με αρχή του κέντρο του σχεδιαζόμενου τροχού O θα πρέπει αρχικά οι συντεταγμένες της εξειλιγμένης να έχουν ως αρχή των αξόνων τους το σημείο O και επομένως να εξάγονται στο ($X' O \Psi$). Αυτό μπορεί να γίνει απλά προσθέτοντας αλγεβρικά στην εξίσωση (3.5) (που εξάγει την τεταγμένη Ψ για κάθε γωνία ω) μήκος ίσο με τη βασική ακτίνα r_g . Επομένως, η (3.5) παίρνει τη μορφή:

$$\psi(\omega) = r_g + r_g \cdot [\cos(\omega) - 1 + \omega \cdot \sin(\omega)] \quad (3.42)$$

Χρησιμοποιώντας τις (3.4) και (3.42) η εξαγόμενη καμπύλη εξειλιγμένης θα έχει σαν σύστημα αναφοράς το ($X' O \Psi$). Το μόνο που μένει έτσι ώστε οι συντεταγμένες των σημείων της εξειλιγμένης καμπύλης να αναφέρονται στο κύριο σύστημα ($X_0 O \Psi_0$), είναι ο πολλαπλασιασμός τους με τον πίνακα περιστροφής (3.41) που χρησιμοποιήθηκε και για το τροχοειδές αλλά για γωνία $\varphi_{\varepsilon\varepsilon} = \widehat{\Psi_0 O \Psi}$. Η $\varphi_{\varepsilon\varepsilon}$ είναι η γωνία που σχηματίζει η αρχή της εξειλιγμένης καμπύλης επί του βασικού κύκλου με τον άξονα συμμετρίας $O\Psi_0$ του διακένου των δοντιών. Η $\varphi_{\varepsilon\varepsilon}$ προκύπτει αν



Σχήμα 3.11

Αρχικό ($XG\Psi$) και τελικό ($X_0 O \Psi_0$) σύστημα συντεταγμένων εξειλιγμένης καμπύλης.

από το ήμισυ της γωνίας βήματος του τροχού (σχέση (3.25)) αφαιρεθεί η γωνία α_g του σημείου εκκίνησης της εξειλιγμένης καμπύλης επί του βασικού κύκλου σε σχέση με τον άξονα συμμετρίας του δοντιού. Είναι δηλαδή:

$$\varphi_{\varepsilon\xi}(\text{rad}) = \frac{\varphi_t}{2} - \alpha_g \quad (3.43)$$

Οι νέες συντεταγμένες της εξειλιγμένης στο κύριο σύστημα συντεταγμένων ($X_0O\Psi_0$) προκύπτουν από τη σχέση:

$$p_0 = {}^0R_{\varepsilon\xi} \cdot p_{\varepsilon\xi} \quad (3.44)$$

Όπου:

$$p(\omega)_0 = \begin{bmatrix} X(\omega)_0 \\ \Psi(\omega)_0 \end{bmatrix} \quad (3.45)$$

$$p(\omega)_{\varepsilon\xi} = \begin{bmatrix} X(\omega)_{\varepsilon\xi} \\ \Psi(\omega)_{\varepsilon\xi} \end{bmatrix} \quad (3.46)$$

$${}^0R(\varphi_{\varepsilon\xi})_{\varepsilon\xi} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi_{\varepsilon\xi}) & -\sin(\varphi_{\varepsilon\xi}) \\ \sin(\varphi_{\varepsilon\xi}) & \cos(\varphi_{\varepsilon\xi}) \end{bmatrix} \quad (3.47)$$

3.5 Συμπεράσματα

Με το πέρας της ανάλυσεως που προηγήθηκε ο αναγνώστης έχει στη διάθεσή του όλο το μαθηματικό – υπολογιστικό υπόβαθρο που απαιτείται για τον υπολογισμό της γεωμετρίας της κατατομής ενός μετωπικού οδοντωτού τροχού. Κατά την επιλογή των σχέσεων που εξάγουν τα διάφορα μεγέθη δόθηκε βάρος στην καταλληλότητα αυτών για χρήση σε εφαρμογή λογισμικού. Για παράδειγμα οι εξισώσεις (3.4) και (3.42) που εξάγουν την εξειλιγμένη προτιμήθηκαν σαν μεθοδολογία από την κλασσική συνάρτηση της εξειλιγμένης η οποία παρότι πιο σύντομη δεν είναι εύκολα αξιοποιήσιμη σε μια εφαρμογή.

Η καταγραφή του τρόπου δημιουργίας του τροχοειδούς έγινε σκόπιμα δεδομένου ότι τα βήματα εξαγωγής του καθόρισαν ως ένα σημείο την μεθοδολογία που ακολουθήθηκε και από την εφαρμογή. Επιπροσθέτως, ο τρόπος που από το κέντρο καμπυλότητας Z του κανόνα βρίσκεται το τελικό σημείο του τροχοειδούς, αν εφαρμοστεί αντίστροφα μπορεί να δώσει τη θέση οποιουδήποτε εργαλείου κοπής. Άρα, η περιγραφή αυτής της μεθόδου εξοικειώνει ακόμη περισσότερο τον αναγνώστη με την προσέγγιση της εφαρμογής στην μέθοδο εξαγωγής αποτελέσματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΚΟΠΗΣ ΤΟΥ ΟΔΟΝΤΩΤΟΥ ΤΡΟΧΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΤΕΤΑΡΤΟΥ ΑΞΟΝΑ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΩΝ

4.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο θα επεξηγηθούν οι έννοιες της CNC κατεργασίας σε τέσσερις άξονες όπως επίσης και το πως η ενσωμάτωση της λειτουργίας της συσκευής του τέταρτου άξονα συνδράμει στην επιτυχέστερη κοπή του οδοντωτού τροχού. Ακόμη, θα παρουσιασθούν συνοπτικά οι σημαντικότερες στρατηγικές κοπής του τροχού που εξετάστηκαν προκειμένου να οδηγηθούμε στην επιλογή αυτών που υλοποιεί η εφαρμογή.

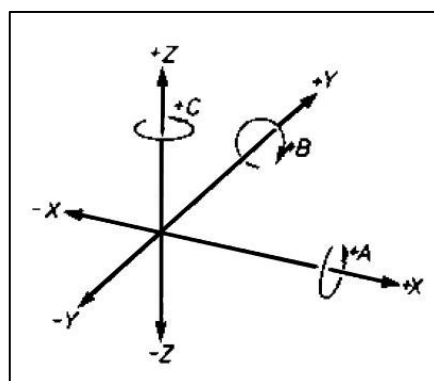
Έχει γίνει προσπάθεια έτσι ώστε το αντικείμενο του κεφαλαίου να προσεγγισθεί όσο πιο σφαιρικά γίνεται. Αυτό επιδιώχθηκε, καθ' όσον πολλές από τις παραμέτρους που παρουσιάζονται σε αυτό το κεφάλαιο χαρακτηρίζουν την κοπή σε εργαλειομηχανή με τέσσερις άξονες. Αυτές οι παράμετροι χρησιμοποιούνται τόσο για την εξαγωγή των δομών της εφαρμογής, όσο και μέσα στους ίδιους τους αλγόριθμους των λειτουργιών της, κάνοντας τη γνώση τους απαραίτητη προϋπόθεση για την κατανόηση της

4.2 Άξονες συντεταγμένων στις εργαλειομηχανές

Η έννοια του άξονα συντεταγμένων στο χώρο των εργαλειομηχανών και ιδίως των CNC κέντρων κατεργασιών και τόνων, είναι ιδιαίτερη και έχει να κάνει με το σαφή καθορισμό τόσο της θέσεως του εργαλείου, όσο και του προσανατολισμού του ως προς το υπό κοπή τεμάχιο. Από αυτή την άποψη οι άξονες των εργαλειομηχανών προσομοιάζουν στους βαθμούς ελευθερίας κίνησης όπως αυτοί ορίζονται από τη ρομποτική. Οι άξονες των συντεταγμένων και ο τρόπος καθορισμού της θετικής κατεύθυνσης κίνησης για εργαλειομηχανές αριθμητικού ελέγχου περιγράφονται στο ISO-841 του 1974.

Ορίζεται δεξιόστροφο καρτεσιανό σύστημα για τους κύριους άξονες X, Y και Z όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 4.1. Οι άξονες περιστροφής συμβολίζονται με A, B και C και είναι επίσης παράλληλοι προς τις κύριες καρτεσιανές κατευθύνσεις. Η θετική φορά περιστροφής για τους άξονες A, B, και C προσδιορίζεται με τον κανόνα του δεξιόστροφου κοχλία κοιτώντας προς τη θετική κατεύθυνση των αξόνων X, Y, Z αντίστοιχα [8]. Ο τρόπος πρόσδεσης του συστήματος συντεταγμένων πάνω στην εργαλειομηχανή διαφέρει ανάλογα με την εργαλειομηχανή αλλά γενικότερα ισχύουν τα ακόλουθα:

α) Ο άξονας Z κείται κατά μήκος της κυρίας ατράκτου και

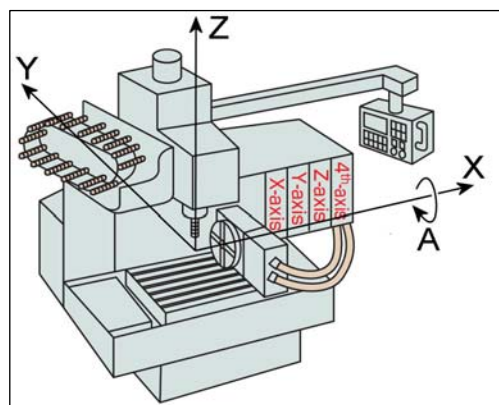


Σχήμα 4.1
Σύστημα κυρίων και περιστροφικών αξόνων εργαλειομηχανών.

β) Ο άξονας X είναι παράλληλος προς την επιφάνεια συγκράτησης και παράλληλος προς την μακρύτερη από τις κινήσεις της μηχανής.

Στο εργαστήριο του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών υπάρχει ένα κέντρο κατεργασιών Okuma MX – 45 VAE το οποίο μπορεί να κατεργαστεί τεμάχια χρησιμοποιώντας τους τρεις κύριους άξονες X, Y, Z. Επιπρόσθετα έχει τη δυνατότητα να ελέγξει και τη λειτουργία μιας περιστροφικής τράπεζας (rotary table) η οποία ουσιαστικά αποτελεί τον τέταρτο άξονα (είτε A, είτε C καθώς ο B καλύπτεται από τις δυνατότητες που παρέχει η λειτουργία κατά τη φορά του A άξονα).

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας έπρεπε να γίνουν όλες οι απαραίτητες ενέργειες για να τοποθετηθεί στο κέντρο κατεργασιών και να λειτουργήσει μια περιστροφική τράπεζα Tsudakoma RN – 150R την οποία είχε στην κατοχή του το εργαστήριο του τομέα. Η τοποθέτηση της περιστροφικής τράπεζας έγινε επί της κύριας τράπεζας, με τον άξονα περιστροφής της να είναι παράλληλος με τον κύριο άξονα X. Η τοπολογία της τοποθέτησης όπως επίσης και οι άξονες συντεταγμένων του κέντρου κατεργασιών -με τις θετικές φορές να επισημαίνονται από τα βέλη- παρουσιάζονται απλοϊκά στο σχήμα 4.2.



Σχήμα 4.2
Οι τέσσερις άξονες του κέντρου κατεργασιών.

Μια ενσωμάτωση λειτουργίας τέταρτου άξονα όπως αυτή που μόλις περιγράφηκε χαρίζει στο κέντρο πολλαπλές δυνατότητες από αυτές που ήδη έχει. Πλέον, οποιαδήποτε κατεργασία γινόταν στο επίπεδο της κύριας τράπεζας μπορεί να γίνει επί της περιφέρειας κυλίνδρου και αν μάλιστα πρόκειται για επαναλαμβανόμενες διαμορφώσεις μπορεί να γίνει με ένα μόνο δέσιμο επί της περιστρεφόμενης τράπεζας. Επίσης, μπορούν να υποστούν κατεργασία αξονοσυμμετρικά κομμάτια (π.χ. πολύσφηνα) ή διαμορφώσεις επί της περιφέρειας κυλίνδρου (π.χ. σφηνόδρομοι, αύλακες κυλινδρικών οδηγήσεων κ.α.). Τέλος, η λειτουργία του τέταρτου άξονα μεταφράζεται στη δυνατότητα προσέγγισης του εργαλείου στο τεμάχιο με οποιαδήποτε κλίση επί του επιπέδου YZ επιθυμεί ο χρήστης και μόνος ουσιαστικός περιορισμός είναι η γεωμετρία του ίδιου του προς κατεργασία τεμαχίου. Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατή η βέλτιστη αξιοποίηση της μορφής του εργαλείου ενώ μπορούν για την ίδια κατεργασία να χρησιμοποιηθούν άλλα εργαλεία που προσφέρουν καλύτερες συνθήκες κοπής.

4.3 Κοπή οδοντωτού τροχού σε κέντρο κατεργασιών τεσσάρων αξόνων

Σε αυτό το σημείο θα παρουσιασθούν μαζί με το κείμενο και κάποιες εικόνες έτσι ώστε να γίνουν εύκολα κατανοητά τα όσα αναλύονται. Για τη δημιουργία τους έχει χρησιμοποιηθεί το πρόγραμμα Computer Aided Manufacturing (CAM) PowerMILL. Στις εικόνες η κοπτική ακμή του εργαλείου έχει χρώμα κίτρινο ενώ οι διαδρομές του κοπτικού εργαλείου είναι οι πράσινες γραμμές. Τα εργαλεία που

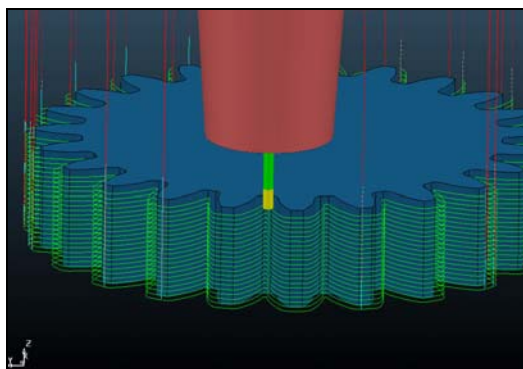
χρησιμοποιούνται έχουν χαρακτηριστικές διαστάσεις που προέρχονται από πραγματικά κονδύλια του εμπορίου.

Σε όλες τις περιπτώσεις το αρχικό ακατέργαστο τεμάχιο θεωρείται πως είναι κύλινδρος με ακτίνα ίση με την ακτίνα κεφαλής του τροχού και ύψος ίσο με το πάχος του υπό κατασκευή οδοντωτού τροχού. Επιπρόσθετα, θεωρείται ότι το ακατέργαστο τεμάχιο συγκρατείται πάνω στην τράπεζα (είτε κύρια είτε περιστρεφόμενη είναι αυτή) μέσω ιδιοσυσκευής που το απομακρύνει από αυτή κατά εύλογη απόσταση. Η τελευταία παραδοχή ανταποκρίνεται πλήρως στην πραγματικότητα, καθώς μια απευθείας συγκράτηση πάνω στην επιφάνεια της τράπεζας δεν θα επέτρεπε την κατεργασία του τροχού σε όλο το πλάτος του.

4.3.1 Πλεονεκτήματα της κοπής με χρήση τεσσάρων αξόνων

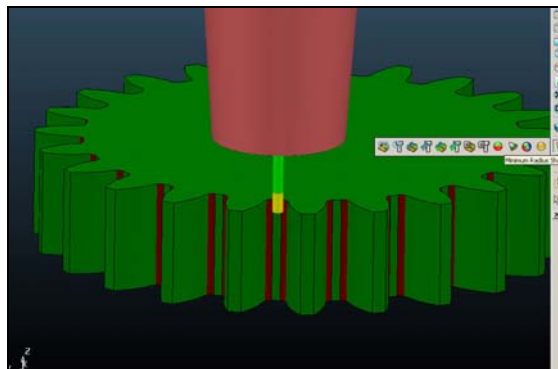
Στο σχήμα 4.3 παρουσιάζεται μια προσομοίωση της κοπής του οδοντωτού τροχού από το κέντρο κατεργασιών όπως αυτή θα γινόταν με τη χρήση τριών αξόνων. Παρατηρούμε ότι η κοπή γίνεται με περιφερειακό φρεζάρισμα σε διαδοχικά πάσα. Σε κάθε πάσο το εργαλείο κατεβαίνει κατά τον άξονα Z ένα προκαθορισμένο διάστημα.

Πρώτη και κύρια παρατήρηση που μπορεί να γίνει είναι πως το διάκενο των δοντιών επιβάλλει τη χρήση (αν όχι στο ξεχόνδρισμα τουλάχιστον στην αποπεράτωση) εργαλείου με αρκετά μικρή διάμετρο. Είναι κοινός τόπος ότι η διάμετρος του εργαλείου είναι καθοριστική για το μήκος του το οποίο δεν μπορεί να ξεπεράσει ένα μέγεθος γιατί οι δυνάμεις κοπής στην άκρη του δημιουργούν ανεπιθύμητες ταλαντώσεις. Επομένως καθίσταται προφανές πως η συγκεκριμένη στρατηγική ενδείκνυται για τροχούς περιορισμένου πλάτους αφού από ένα πλάτος και άνω δεν θα υπάρχουν κονδύλια ικανού μήκους. Με τον ίδιο ακριβώς τρόπο επηρεάζει το πλάτος του τροχού, το μήκος της κοπτικής ακμής μειώνοντας ακόμη περισσότερο το εύρος των εν δυνάμει κατεργαζόμενων τροχών δεδομένου ότι η κοπτική ακμή συνήθως αποτελεί μέρος του συνολικού μήκους.



Σχήμα 4.3

Προσομοίωση κοπής οδοντωτού τροχού σε κέντρο κατεργασιών τριών αξόνων.



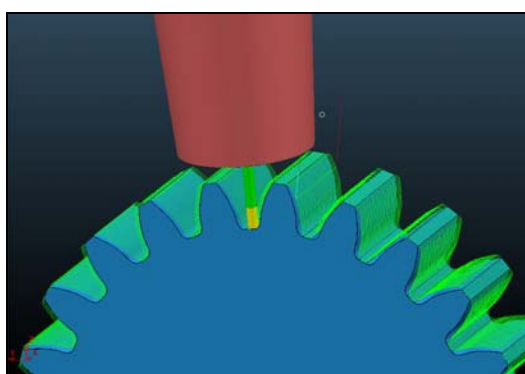
Σχήμα 4.4

Επιφάνειες με καμπυλότητα ακτίνας μικρότερης από την ακτίνα του εργαλείου.

Σαν δεύτερη παρατήρηση, αυτό που πρέπει να επισημανθεί είναι πως ειδικά στην περιοχή του τροχοειδούς η ακτίνα καμπυλότητας της κατατομής είναι σε πολλές περιπτώσεις αρκετά μικρότερη από την ακτίνα του εργαλείου κοπής. Αυτό γίνεται εμφανές στο σήμα 4.4 όπου με κόκκινο χρώμα υπογραμμίζονται εκείνες οι επιφάνειες

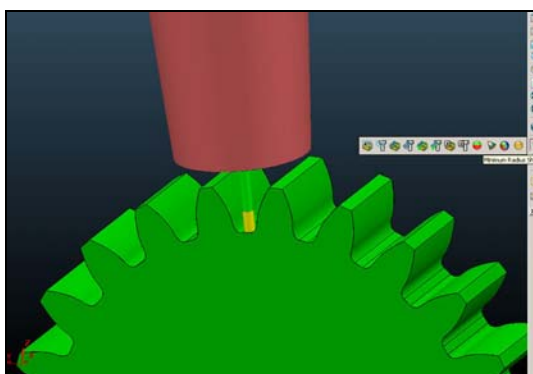
των οποίων η ακτίνα καμπυλότητας είναι μικρότερη από την ακτίνα του εργαλείου και επομένως ή θα υπάρξουν υποκοπές κατά την κατεργασία ή η τελική επιφάνεια δεν θα ανταποκρίνεται στην πραγματική γεωμετρία του τροχού. Το πρόβλημα γίνεται εντονότερο όσο πιο μικρό είναι το module και όσο περισσότερα δόντια έχει ο τροχός δεδομένου ότι οι διάμετροι των εργαλείων έχουν ένα κάτω όριο.

Για την κατεργασία του με χρήση του τέταρτου άξονα, ο οδοντωτός τροχός προσδένεται στην περιστρεφόμενη τράπεζα έτσι ώστε ο άξονας περιστροφής της τράπεζας να ταυτίζεται με τον άξονα περιστροφής του ίδιου. Τα σχήματα 4.5 και 4.6 είναι τα αντίστοιχα των 4.3 και 4.4 με τον τροχό αλλά και το κοπτικό εργαλείο να παραμένουν τα ίδια και το μόνο που αλλάζει είναι ο προσανατολισμός του εργαλείου, το οποίο προσεγγίζει ακτινικά πλέον τον τροχό.



Σχήμα 4.5

Προσομοίωση κοπής οδοντωτού τροχού σε κέντρο κατεργασιών τεσσάρων αξόνων.



Σχήμα 4.6

Καμία επιφάνεια με καμπυλότητα ακτίνας μικρότερης από την ακτίνα του εργαλείου.

Με αυτό τον τρόπο η κοπτική ακμή μπορεί να προσεγγίσει την κατατομή σε όλο της το βάθος και αν χρησιμοποιηθεί επίπεδο εργαλείο με μικρή ακτίνα καμπυλότητας στην ακμή του να μπορεί να αποδώσει ακριβώς τη γεωμετρία της επιφάνειας. Περιορισμοί στο πλάτος τίθενται μόνο: α) από τις διαστάσεις της μηχανής, β) το μήκος υπερκρέμασης του τεμαχίου που μπορεί να του δημιουργεί βέλος κάμψης όπως και γ) από το ίδιο βάρος του προς κατεργασία τεμαχίου το οποίο δεν πρέπει να υπερβαίνει το συνιστώμενο βάρος, από τον κατασκευαστή της τράπεζας.

Φυσικά, και η τετραξονική προσέγγιση έχει περιορισμούς στα μεγέθη των module και άρα διακένων των δοντιών που μπορεί να διαχειριστεί δεδομένου ότι αυτή τη στιγμή η ελάχιστη διάμετρος εμπορικού κονδυλίου γενικής χρήσης κυμαίνεται στο 1 mm. Όμως, με σιγουριά μπορεί να κόψει μεγαλύτερο εύρος τροχών από ότι η προσέγγιση με τρεις άξονες.

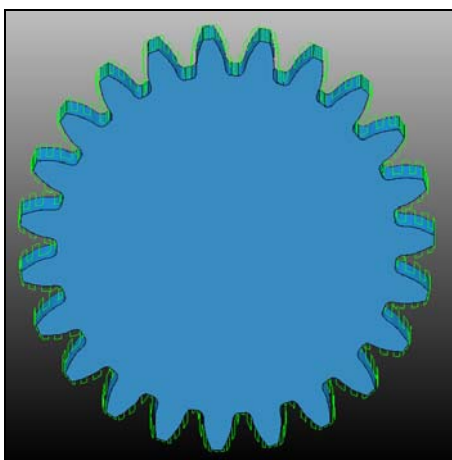
Από την άλλη η σταθερή απόσταση της ατράκτου της περιστρεφόμενης τράπεζας από την κύρια τράπεζα περιορίζει τη μέγιστη διάμετρο (200mm για την περίπτωση της Tsudakoma RN – 150R) των τροχών που μπορούν να δημιουργηθούν. Αυτό δεν αποτελεί πρόβλημα για την κοπή με χρήση τριών αξόνων ειδικά αν απαιτηθεί μεγάλο module και λίγα δόντια οπότε και τα διάκενα μπορεί να επιτρέψουν τη χρήση άλλων εργαλείων από τα συμβατικά κονδύλια.

4.3.2 Στρατηγικές κοπής με χρήση περιστροφικής τράπεζας

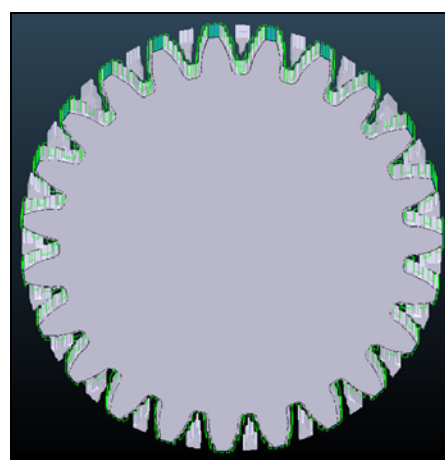
Προκειμένου να βρεθεί η βέλτιστη διαδικασία για την κοπή του οδοντωτού τροχού με χρήση της περιστροφικής τράπεζας, έγιναν κάποιες δοκιμαστικές προσεγγίσεις σε περιβάλλον CAM. Ακολουθώς, παρουσιάζονται οι κύριες στρατηγικές που εξετάστηκαν. Το προς κατεργασία τεμάχιο έχει το σχήμα του κυλίνδρου που παρουσιάστηκε και παραπάνω. Η κοπή αποφασίστηκε να χωριστεί σε δύο στάδια το εκχόνδρισμα και την αποπεράτωση. Προκειμένου να ανταποκριθούμε στην απαίτηση για χρήση εργαλείων του εμπορίου με όσο το δυνατόν χαμηλότερο κόστος κτήσης αποφασίστηκε οι στρατηγικές και των δύο σταδίων να υπολογισθούν με χρήση συμβατικών κονδυλίων.

Μια εγγενής αδυναμία των κονδυλίων για πλευρικό φρεζάρισμα είναι ότι οι ρυθμοί που μπορούν να εισέλθουν στο υλικό κατακόρυφα (plunging) είναι πολύ μικρότεροι από αυτούς που επιτυγχάνουν εισερχόμενα στο υλικό πλευρικά και δημιουργώντας αύλακα (slotting). Κατά το εκχόνδρισμα απαιτείται η αποβολή υλικού από το τεμάχιο με υψηλούς ρυθμούς. Επομένως ειδικά για το στάδιο του εκχονδρίσματος το εργαλείο θα έπρεπε να εισέλθει κατά την αξονική διεύθυνση (παράλληλα στον άξονα X) και να κόψει σε όλο το πλάτος του τροχού έτσι ώστε να επιτύχει μέγιστο ρυθμό αποβολής υλικού.

Πάνω σε αυτή τη λογική δοκιμάστηκε η στρατηγική περιστροφικής κοπής που παρουσιάζεται στο σχήμα 4.7. Το εργαλείο που χρησιμοποιείται είναι κυλινδρικό κονδύλι με επίπεδο κάτω άκρο το οποίο παρουσιάζει αυξημένη στιβαρότητα και είναι το πιο σύνηθες κονδύλι. Το κονδύλι εισέρχεται στο τεμάχιο από το πλάι δημιουργώντας αύλακα και ακολουθεί διαδρομή που θυμίζει μαϊάνδρο. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνει το εκχόνδρισμα όλων των επιφανειών ακολουθώντας τη συντομότερη οδό. Το βασικό μειονέκτημα της μεθόδου είναι πως απαιτεί από το κονδύλι να έχει κοπτική ακμή ίση με το μέγιστο βάθος κοπής που εκτελείται (περίπου το ύψος δοντιού). Το αποτέλεσμα της μη τήρησης της απαίτησης αυτής φαίνεται στο φανταστικό σχήμα 4.8 όπου παρατηρούμε ξεκάθαρα το μέρος του υλικού που δεν κόβεται και που στην πραγματικότητα θα συγκρούονταν με το στέλεχος του κονδυλίου.



Σχήμα 4.7
Δοκιμή στρατηγικής
εκχονδρίσματος.

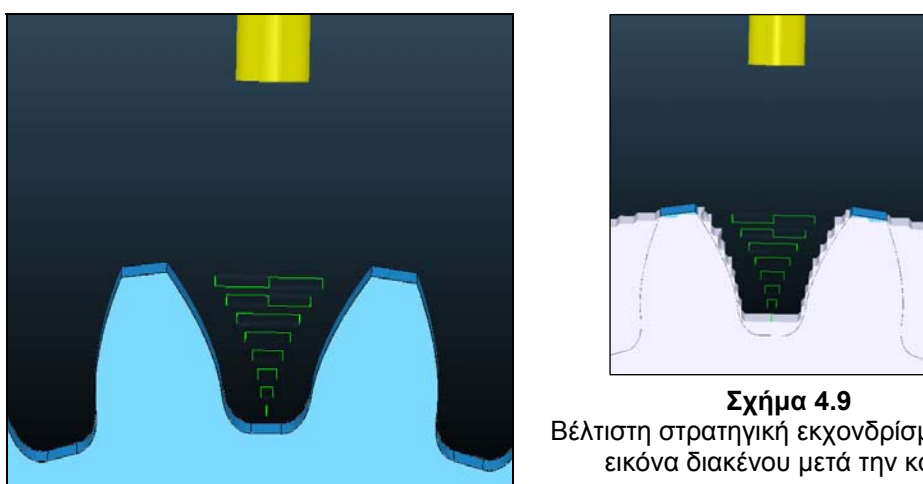


Σχήμα 4.8
Αδυναμία κοπής λόγω ελλιπούς
ύψους κοπτικής ακμής.

Γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι δεδομένης της ύπαρξης στενής εξάρτησης μεταξύ διαμέτρου κονδυλίου και μήκους ακμής κοπής για λόγους λειτουργικότητας η συγκεκριμένη στρατηγική δεν θα μπορούσε να λειτουργήσει. Αφού για να μπορέσει να κόψει αρκετά βαθιά –προετοιμάζοντας σωστά το τεμάχιο- απαιτεί μικρή διάμετρο και μεγάλο μήκος κοπτικής ακμής χαρακτηριστικά ασύμβατα μεταξύ τους.

Μια λύση στο πρόβλημα θα ήταν το βάθος κοπής να αυξάνει βηματικά κάθε φορά μετά το πέρας μιας περιστροφής του τεμαχίου κόβοντας ουσιαστικά ομοαξονικούς κυκλικούς τομείς ανάμεσα από τα δόντια. Όσα θα ήταν τα προϋπολογισμένα πάσα ανάλογα με το μέγιστο βάθος κοπής του εργαλείου τόσες περιστροφές θα γίνονταν. Αυτή η λύση αποτέλεσε και την έμπνευση για την τελική λύση που δόθηκε για τη στρατηγική του εκχονδρίσματος. Σύμφωνα με την τελική λύση δεν είναι απαραίτητο να υφίστανται, σε μια περιστροφή, κατεργασία όλα τα διάκενα των δοντιών για το δεδομένο βάθος (ή ακτίνα) κοπής. Αντίθετα, είναι πολύ πιο συμφέρον από θέμα ελαχιστοποίησης των διαδρομών του εργαλείου, χρόνου και περιστροφών της τράπεζας να υφίσταται την κατεργασία εκχονδρίσματος το κάθε διάκενο ξεχωριστά, από την αρχή μέχρι το πέρας της.

Στο σχήμα 4.9 βλέπουμε τη διαδρομή που ακολουθεί το κοπτικό εργαλείο σε ένα από τα διάκενα των δοντιών για τη στρατηγική εκχονδρίσματος που προκρίθηκε και η οποία υλοποιείται από την εφαρμογή. Το εργαλείο εισέρχεται στην αξονική φορά παράλληλα με την επιφάνεια του ενός δοντιού και αφού κόψει σε όλο το πλάτος του τροχού, μετακινείται πλάγια και κάθετα στον άξονα του τροχού -μένοντας στο ίδιο ύψος- μέχρι να ευθυγραμμιστεί με την επόμενη ευθεία κοπής. Κατόπιν, κόβει και πάλι όλο το πλάτος του τροχού με αντίθετη διεύθυνση κίνησης. Αυτό συνεχίζεται μέχρι να καλυφθεί όλο το διάκενο για το συγκεκριμένο ύψος και ύστερα μετακινείται ακτινικά πλέον ως προς το τεμάχιο για να ξεκινήσει την κοπή σε χαμηλότερο επίπεδο. Αφού ολοκληρωθεί το ένα διάκενο δοντιών το εργαλείο μένει εκτός τεμαχίου στην ακτίνα κεφαλής και ο τροχός περιστρέφεται για γωνία ίση με το βήμα ύστερα ακολουθεί κοπή του επόμενου διακένου κ.ο.κ. Μια προσομοίωση του υλικού που αφαιρεί αυτή η στρατηγική από ένα διάκενο φαίνεται επίσης στο σχήμα 4.9.



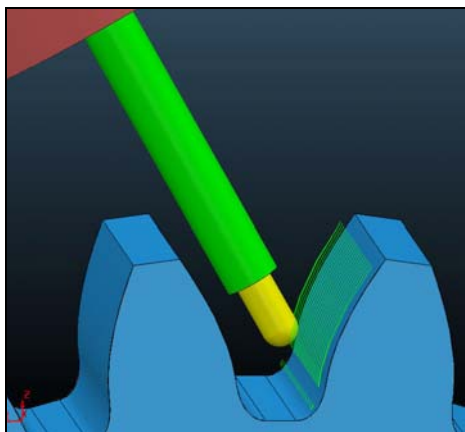
Κατά τη μελέτη των πιθανών στρατηγικών για την αποπεράτωση υπήρξε σοβαρός προβληματισμός σε ότι αφορά την κοπή με το κονδύλι να διαγράφει μια ευθεία κατά την έννοια του πλάτους του τροχού (όπως στο εκχόνδρισμα) επί της

κατατομής του δοντιού. Ο προβληματισμός έγκειται στο γεγονός ότι οι γραμμές επαφής των οδοντωτών τροχών με ίσια δόντια είναι ευθείες γραμμές παράλληλες στον άξονα περιστροφής, που κείνται επί της κατατομής. Το ίχνος που αφήνει πίσω του το εργαλείο πάνω στην επιφάνεια την οποία έχει κατεργαστεί, αν λόγω αστάθμητου παράγοντα δημιουργήσει ανωμαλία μεγαλύτερης τάξης μεγέθους από το πάχος του στρώματος του λιπαντικού με το οποίο θα εργαστεί αργότερα ο τροχός, είναι πολύ πιθανό να οδηγήσει στη δημιουργία μικροεκκοίλανσης στην επιφάνεια του δοντιού. Αυτή προκαλεί μικροδιάβρωση και μικροκόπωση και στη συνέχεια κόπωση και γήρανση. Αντίθετα με τη συμβατική κόπωση τείνει να εξαπλώνεται και να προχωρεί [9]. Μπορεί λοιπόν μια τέτοια κοπή να δημιουργήσει προϋποθέσεις καταστροφής της επιφάνειας του δοντιού.

Προκειμένου επομένως να αποφευχθεί μια τέτοια περίπτωση κρίθηκε πως η στρατηγική αποπεράτωσης θα έπρεπε να δημιουργεί τροχιές εργαλείου σε διεύθυνση διαφορετική από αυτή του εκχονδρίσματος. Δεν πρέπει να παραβλεφθεί το γεγονός ότι μετά το εκχονδρίσμα οι εναπομείνουσες ακμές υλικού προς κοπή μέχρι την τελική επιφάνεια, έχουν ύψος τέτοιο που επιτρέπει την κοπή τους και με την κάτω ακμή του εργαλείου και δεν απαιτείται αποκλειστικά πλευρική κοπή.

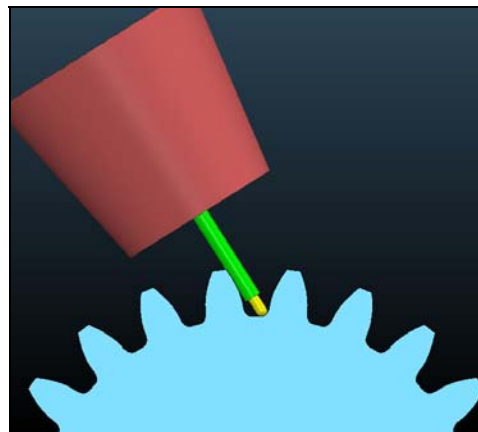
Σαν πρώτη ιδέα και για να γίνει βέλτιστη εκμετάλλευση των δυνατοτήτων της κοπής με χρήση περιστρεφόμενης τράπεζας, προτάθηκε η κοπή να γίνει με εργαλείο σφαιρικής κοπτικής ακμής το οποίο θα διατηρούσε με την υπό κοπή επιφάνεια σταθερή κλίση αλλάζοντας διαρκώς γωνία προσέγγισης μέσω της περιστροφής της τράπεζας. Με αυτό τον τρόπο η δύναμη κοπής θα διατηρούσε σταθερή διεύθυνση με ευεργετικά αποτελέσματα για την αποδιδόμενη επιφάνεια. Η τροχιές που θα ακολουθούσε το εργαλείο θα ήταν παράλληλες γραμμές από την κεφαλή του δοντιού μέχρι τον κύκλο ποδός με σχήμα ανάλογο της κατατομής όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.10.

Μια προσεκτικότερη ματιά όμως αποκαλύπτει ότι οι τροχιές είναι διακοπτόμενες στο τμήμα που η κατατομή είναι σχεδόν κατακόρυφη. Αυτό συμβαίνει γιατί σε αυτό το σημείο το εργαλείο δεν μπορεί να συνεχίσει να έχει σταθερή κλίση ως προς την επιφάνεια της κατατομής χωρίς να συγκρουσθεί με το δόντι από κάτω του (βλ. σχήμα 4.11). Σταδιακή μείωση της κλίσης επέτρεψε τη δημιουργία συνεχών τροχιών, όμως η διαφορά ως προς την εντελώς κατακόρυφη προσέγγιση –ειδικά για μικρότερα module- ήταν μικρή έως ασήμαντη (4-6 μοίρες περίπου).



Σχήμα 4.10

Κοπή κατατομής δοντιού με σφαιρικό εργαλείο και σταθερή κλίση ως προς την επιφάνεια.



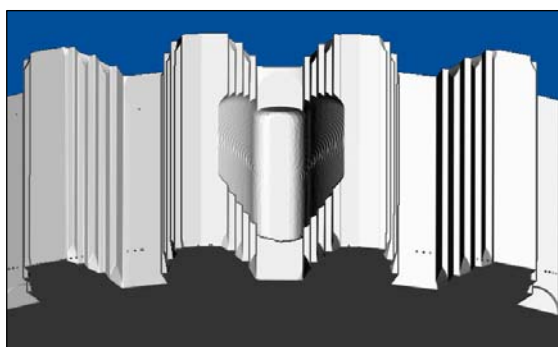
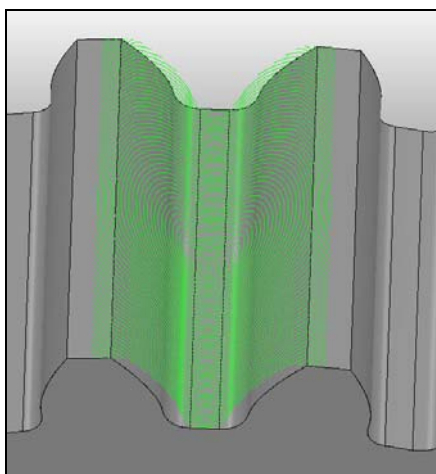
Σχήμα 4.11

Σύγκρουση κονδυλίου – τεμαχίου στην προσπάθεια για διατήρηση σταθερής κλίσης με την κατεργαζόμενη επιφάνεια.

Το δεύτερο σημαντικό πρόβλημα των σφαιρικών κονδυλίων ήταν η αδυναμία τους να κόψουν στο κέντρο του κάτω άκρου τους λόγω μηδενισμού της περιφερειακής ταχύτητας της κοπτικής ακμής. Για να λυθεί αυτό το πρόβλημα θα έπρεπε ο κύκλος ποδός να κόβεται με το εργαλείο υπό σχετική κλίση. Και πάλι υπήρξαν προβλήματα προσέγγισης χωρίς σύγκρουση ενώ και ο αλγόριθμος για την εφαρμογή θα γινόταν πολύ πολύπλοκος δεδομένου ότι θα απαιτούσε αλλαγές εργαλείων εντός του αλγορίθμου με αυξημένες πιθανότητες να γίνει κάποιιο λάθος από το χρήστη.

Για να λυθούν τα παραπάνω προβλήματα, θα πρέπει το κονδύλι που θα χρησιμοποιηθεί να έχει τη δυνατότητα κοπής στο κέντρο της κάτω επιφάνειάς του και παράλληλα η κόψη του στην περιφέρειά του να μην έχει τη μορφή ακμής έτσι ώστε η κατεργασμένη επιφάνεια που δημιουργεί να είναι όσο λιγότερο τραχεία γίνεται. Οι απαιτήσεις αυτές οδήγησαν στην επιλογή κονδυλίου με επίπεδη κάτω επιφάνεια και άκρα στην περιφέρεια με μικρή ακτίνα καμπυλότητας.

Μια άλλη στρατηγική αποπεράτωσης που προτάθηκε είναι αυτή του σχήματος 4.12. Το εργαλείο που χρησιμοποιείται είναι το προαναφερθέν κονδύλι. Κατ' αρχάς το εργαλείο βυθίζεται στο κέντρο του διακένου στο μέσον του πλάτους του τροχού και κατόπιν ακολουθεί σπειροειδή κίνηση προς τα άκρα των δοντιών. Με αυτό τον τρόπο τα δημιουργούμενα ίχνη δεν έχουν ολόκληρα τμήματα –παρά μόνο σημεία– πάνω σε γραμμές επαφής του δοντιού ξεπερνώντας με αυτό τον τρόπο το πρόβλημα που προαναφέρθηκε. Επιπρόσθετα δεν υπάρχουν αλλαγές φοράς πάνω στο τεμάχιο που θα μπορούσαν να αφήσουν και πάλι ίχνη.



Σχήμα 4.12

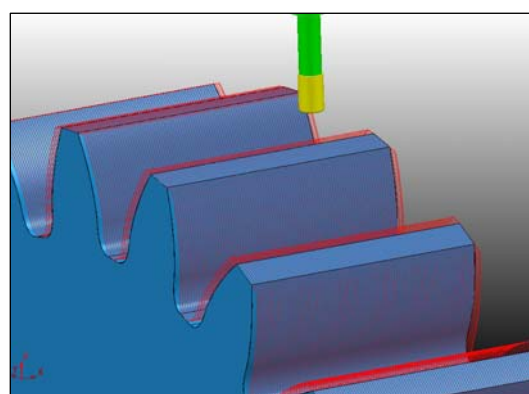
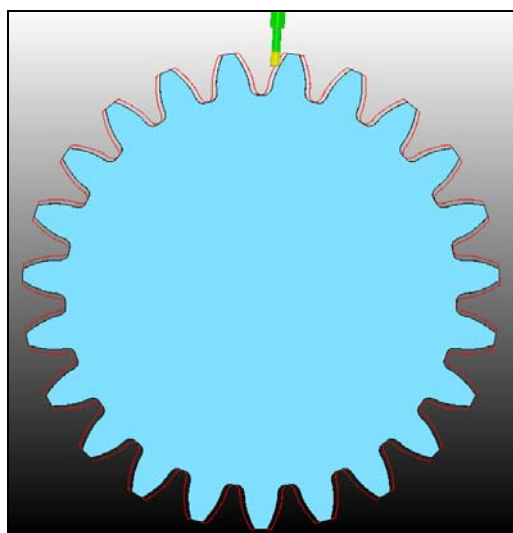
Σπειροειδής διαδρομή αποπεράτωσης και άποψη της κοπής σε ενδιάμεσο στάδιο.

Μελετώντας προσεκτικότερα την τοπολογία της συγκεκριμένης τροχιάς του κοπτικού εργαλείου, μπορεί κανείς να παρατηρήσει πως καθώς απομακρύνεται από το μέσον του πλάτους του τροχού τείνει να παραλληλισθεί με την πλευρική επιφάνεια του τροχού. Μάλιστα, του μέγεθος του κομματιού της που παρουσιάζει αυτή την τάση είναι ευθέως ανάλογο με το πλάτος του τροχού και αντιστρόφως ανάλογο του ύψους των δοντιών. Άρα για τροχούς μεγάλου πλάτους και μικρού module, εμφανίζεται ένα μεγάλο κομμάτι του πλάτους τους το οποίο υφίσταται κατεργασία με τροχιές σχεδόν παράλληλες μεταξύ τους και κάθετες ως προς τις γραμμές επαφής του τροχού.

Ένα πρόβλημα της συγκεκριμένης στρατηγικής είναι πως μόλις η σπείρα αποκτήσει ακτίνα τέτοια που να κόψει την κεφαλή των δοντιών (βλ. συνοδευτικό σχήματος 4.12) παύει η τροχιά να είναι συνεχόμενη και γίνεται τμηματική. Αυτό έχει

σαν άμεση συνέπεια την ανάλωση χρόνου για κινήσεις του εργαλείου εκτός τεμαχίου. Αυτό είναι ένα πρόβλημα συνυφασμένο με την κοπή κάθε διάκενου και ξεχωριστά, όταν η τροχιά που ακολουθείται, επιβάλλει την έξοδο του εργαλείου στην ακμή κεφαλής του ενός δοντιού και την έξοδό του από την αντίκρου ακμή του επόμενου δοντιού.

Η στρατηγική αποπεράτωσης που τελικά επιλέχθηκε προτείνει τη συνεχόμενη περιμετρική κοπή μιας λεπτής (όσο το βήμα του πάσου) τομής όλου του τροχού. Στο σχήμα 4.13 (με κόκκινο χρώμα) φαίνεται πως μια αλληλουχία τέτοιων πάσων αποπερατώνει τον τροχό σε όλο του το πλάτος. Επιπρόσθετα, ελαχιστοποιείται το μήκος της διαδρομής του εργαλείου εκτός τεμαχίου στα μικρά καμπύλα τμήματα επί των κεφαλών των δοντιών, που ενώνουν τις τροχιές αποπεράτωσης των κατατομών. Αν η προεργασία δημιουργίας του προς κοπή τεμαχίου είναι τέλεια, από αυτά τα τμήματα θεωρητικά το κονδύλι θα διέρχεται χωρίς επαφή με τον τροχό. Σε αντίθετη περίπτωση θα εκτελείται διορθωτική κοπή που θα αφήνει πίσω της τη σωστή ακτίνα κεφαλής στο δόντι.



Σχήμα 4.13

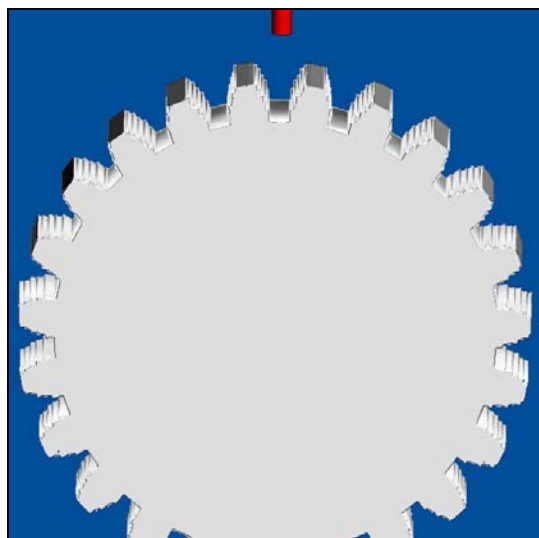
Τροχιές κοπτικού εργαλείου κατά την επιλεγείσα στρατηγική αποπεράτωσης.

Με τη συγκεκριμένη στρατηγική η αποδιδόμενη επιφάνεια αναμένεται ομοιογενής σε όλο το πλάτος το δοντιού. Επίσης, επειδή το κοπτικό εργαλείο δεν προσεγγίζει το διάκενο με μεγάλες, ως προς την κατακόρυφο γωνίες, ουσιαστικά μηδενίζεται ο κίνδυνος σύγκρουσης του κονδυλίου με τα δόντια και επιτρέπεται η χρήση σχετικά μεγαλύτερων διαμέτρων κονδυλίων (όσο επιτρέπει η καμπύλη του κύκλου ποδός). Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται ταχύτερη κοπή λόγω της ικανότητας για αυξημένη αποβολή υλικού ενώ και το ίχνος της κοπής είναι πιο αμβλύ λόγω μεγαλύτερης ακτίνας καμπυλότητας.

4.4 Συμπεράσματα

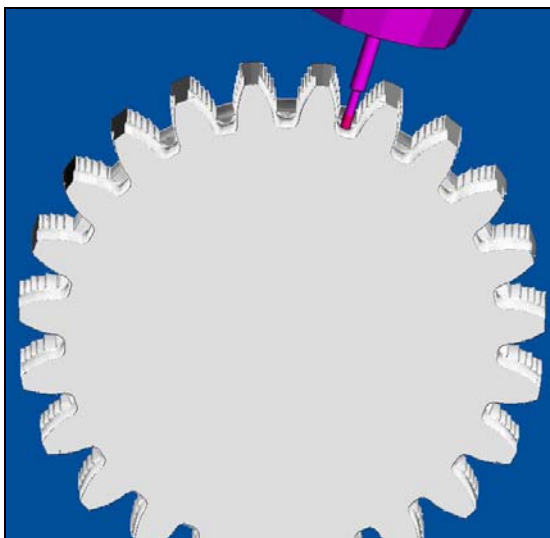
Στις εικόνες 4.14 και 4.15 παρουσιάζεται μια άποψη του αποτελέσματος της διαδικασίας εκχονδρίσματος και μέρος της διαδικασίας, του σταδίου αποπεράτωσης αντίστοιχα. Με αυτό τον τρόπο επιδιώκεται ο αναγνώστης να αποκτήσει σαφή εικόνα των δύο στρατηγικών που υλοποιεί η εφαρμογή. Επειδή η εφαρμογή δεν έχει ουσιαστικό τρόπο οπτικοποίησης των αποτελεσμάτων της -πέραν κάποιων

διαγραμμάτων που παρουσιάζουν την γεννώμενη κατατομή- καλό είναι ο αναγνώστης να αναφέρεται σε αυτό το κεφάλαιο όποτε έχει απορία σχετικά με τα όσα θα αναφερθούν στο επόμενο.



Σχήμα 4.14

Άποψη του τροχού μετά το εκχόνδρισμα.



Σχήμα 4.15

Άποψη του τροχού κατά την αποπεράτωση.

Κλείνοντας, πρέπει να επισημανθεί πως κεφαλαιώδους σημασίας για την επιτυχία των υπολογιζόμενων κοπών είναι η σωστή προετοιμασία του τεμαχίου που θα κοπεί. Αφού, η εφαρμογή δεν έχει κάποιο τρόπο για να διαπιστώσει ότι οι διαστάσεις του κυλίνδρου που “θεωρεί” ως χώρο κοπής είναι οι προβλεπόμενες. Πρέπει λοιπόν η κατασκευή του κυλίνδρου να είναι ακριβής με διάμετρο όχι μεγαλύτερη του 0.1% του κύκλου κεφαλής έτσι ώστε να βρίσκεται εντός των ορίων μετωπικής κοπής των κονδυλίων που προβλέπονται για την αποπεράτωση. Το πλάτος ασφαλείας έχει προκαθοριστεί στο 1mm από κάθε πλευρά του τροχού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΚΟΠΗΣ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ ΣΕ ΚΕΝΤΡΟ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ ΤΕΣΣΑΡΩΝ ΑΞΟΝΩΝ

5.1 Εισαγωγή

Για να ολοκληρωθεί η προσέγγιση της κοπής οδοντωτών τροχών από κέντρο κατεργασιών κάνοντας χρήση της λειτουργίας του τέταρτου άξονα, έπρεπε να δημιουργηθεί μια εφαρμογή που να μετατρέπει την ουσία όλης της θεωρητικής προσέγγισης σε πρακτικά αξιοποιήσιμο λογισμικό. Για να γίνει αυτό χρησιμοποιήθηκε προγραμματιστικό περιβάλλον Matlab και καταβλήθηκε προσπάθεια για το όσο πιο εύληπτο και εύλογο “στήσιμο” του αλγορίθμου. Αυτό έγινε για να ευνοηθεί η ευχρηστία και να ενθαρρυνθεί η παρεμβατικότητα στον αλγόριθμο με σκοπό τη βελτίωσή του.

Για την εφαρμογή επιλέχθηκε μια σπονδυλωτή δομή έτσι ώστε οι διεργασίες που ανήκουν σε ένα νοητικό και υπολογιστικό κομμάτι να μην επηρεάζουν τις υπόλοιπες. Επίσης με αυτό τον τρόπο μπορούν να γίνουν παρεμβάσεις σε καθένα από τα τρία κύρια τμήματα από τα οποία αποτελείται χωρίς να επηρεαστούν τα υπόλοιπα, ή ακόμη και να προστεθεί κάποιο επιπλέον. Τα τρία κύρια μέρη της εφαρμογής είναι: α) η ρουτίνα υπολογισμού της γεωμετρίας της κατατομής του δοντιού (*gewmetria.m*), β) η ρουτίνα υπολογισμού της τροχιάς εκχονδρίσματος και εξαγωγής του κώδικα g-code (*ekchondrisma.m*) για την κοπή και γ) η ρουτίνα υπολογισμού της τροχιάς αποπεράτωσης και εξαγωγής του κώδικα g-code (*aparperatwsh.m*) για την κοπή.

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει μια αναλυτική παρουσίαση: των διεργασιών που εκτελεί η εφαρμογή, των αλγορίθμων που διέπουν τη λειτουργία αυτών των διεργασιών καθώς επίσης και των αποτελεσμάτων που εξάγει η εφαρμογή. Τέλος, θα παρατεθούν τα όποια συμπεράσματα προέκυψαν από την εμπλοκή μας με το εγχείρημα της δημιουργίας της εφαρμογής.

5.2 Ρουτίνα υπολογισμού της γεωμετρίας της κατατομής του δοντιού (*gewmetria.m*)

5.2.1 Δομή της ρουτίνας *gewmetria.m*

Ο στόχος που τέθηκε κατά τη δημιουργία αυτής της ρουτίνας, ήταν να εισάγονται τα δεδομένα που αφορούν τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του επιθυμητού προς κατασκευή οδοντωτού τροχού και να εξάγεται η τοπολογία των σημείων που απαρτίζουν το δεξί μισό της κατατομής του διακένου ανάμεσα σε δύο δόντια. Η τοπολογία αυτή, σε συνδυασμό με τα κατασκευαστικά μεγέθη που μεταφέρονται αυτούσια, γίνεται με τη σειρά της είσοδος για τη λειτουργία των άλλων δύο ρουτινών. Αρκεί έτσι, μόνο το δεξί μισό της κατατομής του διακένου ανάμεσα σε δύο δόντια, γιατί εμπεριέχει όλη την πληροφορία που απαιτείται για τη λειτουργία των άλλων δύο ρουτινών.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να παρατηρηθεί πως κάθε φορά που θα γίνεται αναφορά, για πρώτη φορά, σε κάποια μεταβλητή που χρησιμοποιείται εντός της

εφαρμογής θα παρατίθεται σε παρένθεση το πραγματικό της όνομα στην εφαρμογή. Τα στοιχεία εισόδου που απαιτεί η ρουτίνα για την ορθή λειτουργία της είναι τα ακόλουθα:

- 1) Επιθυμητός αριθμός δοντιών του τροχού (n).
- 2) Επιθυμητό module του τροχού σε mm (m).
- 3) Γωνία εξειλιγμένης στον αρχικό κύκλο σε μοίρες (a_0), επειδή όμως οι συναρτήσεις με γωνίες του Matlab απαιτούν τις τιμές των γωνιών σε rad τη θέση της a_0 παίρνει σε όλες τις σχέσεις η μεταβλητή a_0r για την οποία ισχύει:

$$a_0r(rad) = \frac{a_0 \cdot \pi}{180}.$$

- 4) Ακτινική χάρη ως ποσοστό επί τοις εκατό του module του τροχού (cr).
- 5) Χάρη των κατατομών ως ποσοστό επί τοις εκατό του πάχους του δοντιού στην ακτίνα του αρχικού κύκλου (ct).
- 6) Ακτίνα καμπυλότητας του νοητού κοπτικού κανόνα στην ακμή του δοντιού του σε mm (rc).
- 7) Πάχος του τροχού σε mm (b).
- 8) Επιθυμητή απόσταση ανάμεσα στα σημεία της κατατομής που θα εξάγει η ρουτίνα σαν ποσοστό επί τοις εκατό του module ($akrib$). Για αυτό το σκοπό χρησιμοποιείται η μεταβλητή $s(mm) = akrib \cdot m$, που υπολογίζει την ελάχιστη δυνατή απόσταση ανάμεσα σε δύο σημεία της κατατομής. Επίσης, η μεταβλητή $ds(mm) = s/1000$ για να οριστεί η μέγιστη δυνατή απόσταση ανάμεσα σε δύο σημεία της κατατομής ως το άθροισμα $s + ds$.

Όλα τα παραπάνω στοιχεία εισάγονται από το χρήστη ανάλογα με τον τροχό που επιθυμεί να κατασκευάσει. Τα στοιχεία από το 1 έως και το 7 καταγράφονται και στον πίνακα με τα σημεία της κατατομής που εξάγει η ρουτίνα έτσι ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν και από τις άλλες δύο ρουτίνες σαν δεδομένα εισόδου. Κατόπιν, η εφαρμογή χρησιμοποιεί τα 1 έως 7 στοιχεία για να υπολογίσει κάποια γεωμετρικά δεδομένα του οδοντωτού τροχού που παρουσιάστηκαν αναλυτικά στο κεφάλαιο 3. Ακολούθως απλώς θα αναφερθούν συνοπτικά μαζί με την ανάλογη σχέση που τα υπολογίζει έτσι ώστε ο εν δυνάμει χρήστης της εφαρμογής να έχει γνώση όλων των παραμέτρων.

- 9) Αρχική ακτίνα σε mm (r_0) σχέση (3.8).
- 10) Ακτίνα κεφαλής σε mm (r_k) σχέση (3.9).
- 11) Ακτίνα ποδός σε mm (r_f) σχέση (3.10).
- 12) Ακτίνα βασικού κύκλου σε mm (r_g) σχέση (3.18).
- 13) Βήμα του τροχού επί της περιφέρειας του αρχικού κύκλου σε mm (t_0) σχέση (3.6).
- 14) Πάχος δοντιού επί του αρχικού κύκλου σε mm (s_0) σχέση (3.11).
- 15) Τόξο του διάκενου ανάμεσα σε δύο διαδοχικά δόντια επί της περιφέρειας του αρχικού κύκλου σε mm (l_0) σχέση (3.12).
- 16) Απόσταση κέντρου καμπυλότητας της ακμής του κανόνα από την ευθεία που εφάπτεται επί του αρχικού κύκλου όταν συνεργάζεται ο νοητός κοπτικός κανόνας με τον υπό γένεση τροχό σε mm (B) σχέση (3.23).
- 17) Απόσταση κέντρου καμπυλότητας της ακμής του νοητού κοπτικού κανόνα από τον άξονα συμμετρίας του δοντιού του κανόνα σε mm (d_1) σχέση (3.24).

- 18) Γωνία του σημείου εκκίνησης της εξειλιγμένης καμπύλης επί του βασικού κύκλου σε σχέση με τον άξονα συμμετρίας του δοντιού του τροχού σε rad (ag) σχέση (3.19).
- 19) Γωνία ανάμεσα στην ακμή του δοντιού του τροχού στον κύκλο κεφαλής και σημείου X επί του βασικού κύκλου. Όπου το σημείο X προσδιορίζεται επί του βασικού κύκλου, αν από την ακμή του δοντιού φέρουμε εφαπτόμενη στο βασικό κύκλο σε rad (ak) σχέση (3.20).
- 20) Γωνία στο σημείο εκκίνησης της εξειλιγμένης επί του βασικού κύκλου και της ακμής του δοντιού του τροχού στον κύκλο κεφαλής σε rad (fk) σχέση (3.21).
- 21) Γωνία για την οποία η συνάρτηση της εξειλιγμένης εξάγει το σημείο της ακμής του δοντιού του επιθυμητού τροχού στον κύκλο κεφαλής σε rad (fik) σχέση (3.22).
- 22) Γωνία ανάμεσα στους άξονες συμμετρίας δύο διαδοχικών δοντιών σε rad (ft) σχέση (3.25).
- 23) Γωνία ανάμεσα στον άξονα συμμετρίας του τροχοειδούς και τον άξονα συμμετρίας του δοντιού σε rad (w) σχέση (3.26).
- 24) Γωνία ανάμεσα στον άξονα συμμετρίας του τροχοειδούς και τον άξονα συμμετρίας του διακένου ανάμεσα σε δύο διαδοχικά δόντια σε rad (v) σχέση (3.27).
- 25) Γωνία που σχηματίζει η αρχή της εξειλιγμένης καμπύλης επί του βασικού κύκλου σε σχέση με τον άξονα συμμετρίας του διακένου των δοντιών σε rad (fek) σχέση (3.43).

Τα δεδομένα 9 έως και 25 υπολογίζονται όχι μόνο στη ρουτίνα για την εξαγωγή της γεωμετρίας (βλ. Παράρτημα Κωδ.1.1) αλλά και στην αρχή και των υπολοίπων δύο ρουτινών, αφού κάποια από αυτά τα μεγέθη χρησιμοποιούνται και σε αυτές. Επομένως τα 9 έως 25 μπορεί να υπολογίζονται κάθε φορά, όμως μέσα στον αλγόριθμο λειτουργούν ως δεδομένες σταθερές και για αυτό συμπεριλαμβάνονται στις μεταβλητές εισόδου.

Στην πορεία της ρουτίνας υπολογίζονται τα σημεία που απαρτίζουν την εξειλιγμένη καμπύλη από το βασικό κύκλο μέχρι τον κύκλο κεφαλής, με τέτοιο ώστε η απόσταση του καθενός από το επόμενο να βρίσκεται εντός προκαθορισμένου εύρους. Οι συντεταγμένες των σημείων περιστρέφονται έτσι ώστε να βρεθούν στη σωστή θέση σε σχέση με τον άξονα συμμετρίας του διακένου των δοντιών.

Η ίδια ακριβώς διαδικασία ακολουθείται και με τα σημεία που απαρτίζουν το τροχοειδές από τον κύκλο ποδός μέχρι και τον αρχικό κύκλο. Αφού, έχει περιστραφεί και το τροχοειδές εντοπίζεται το ζευγάρι των σημείων –ένα σημείο από κάθε καμπύλη– που παρουσιάζουν την πλησιέστερη απόσταση μεταξύ τους από οποιοδήποτε άλλο. Ύστερα και διατηρώντας μόνο το σημείο της εξειλιγμένης θεωρείται ότι σε αυτή τη θέση είναι το σημείο τομής των δύο καμπυλών.

Τελικά, οι συντεταγμένες του τροχοειδούς από τον κύκλο ποδός μέχρι το σημείο τομής με την εξειλιγμένη, όπως επίσης και οι συντεταγμένες της εξειλιγμένης από αυτό το σημείο μέχρι και το τελευταίο σημείο στον κύκλο κεφαλής, αποθηκεύονται σε ένα αρχείο τύπου ASCII (με το όνομα katat). Σε προκαθορισμένες θέσεις αυτού του αρχείου αποθηκεύονται και οι μεταβλητές 1 έως 7 που προαναφέρθηκαν. Επιπρόσθετα υπολογίζονται και οι μέγιστες διαμέτροι που

επιτρέπεται να έχουν τα κονδύλια για το εκχόνδρισμα και για την αποπεράτωση έτσι ώστε να είναι εφικτή η λειτουργία των αντίστοιχων ρουτινών στη συνέχεια.

5.2.2 Αναλυτική παρουσίαση αλγόριθμου υπολογισμού των σημείων της εξειλιγμένης

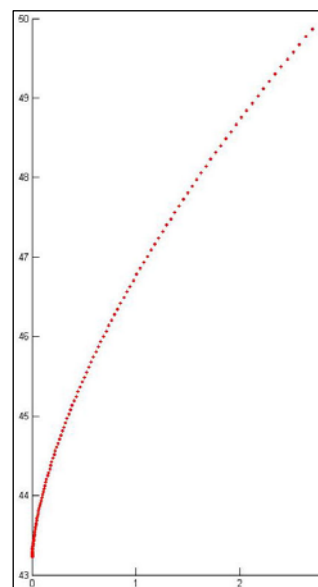
Στο παράρτημα Κώδ.1.2 παρουσιάζεται ο κώδικας υπολογισμού των σημείων της εξειλιγμένης. Κατ' αρχάς έχει επιλεγεί να εμφανίζεται με κατάλληλη μορφοποίηση ένα μήνυμα που ενημερώνει το χρήστη ότι τα σημεία που θα παραχθούν από τον αλγόριθμο θα έχουν μεταξύ τους ελάχιστη απόσταση ίση με: s και μέγιστη απόσταση ίση με: $s + ds$. Στη συνέχεια υπολογίζονται (μέσω των σχέσεων (3.4) και (3.42) για $\omega = 0$) και αποθηκεύονται στον πίνακα με τις συντεταγμένες των σημείων της εξειλιγμένης (eks()), οι συντεταγμένες X και Y του πρώτου σημείου της εξειλιγμένης επί του βασικού κύκλου (θέσεις eks(1,1) και eks(1,2) αντίστοιχα).

Διαπιστώθηκε πως τα σημεία που θα προέκυπταν από τις σχέσεις (3.4) και (3.42) για σταθερές διαμερίσεις της γωνίας διαγραφής ω (στην εφαρμογή χρησιμοποιείται η μεταβλητή a), θα παρουσίαζαν μεταξύ τους συνεχώς αυξανόμενες αποστάσεις καθώς η ω θα αυξανόταν (βλ. σχήμα 5.1). Αυτό συμβαίνει γιατί καθώς αυξάνεται το ω , το $\sin(\omega)$ και στις δύο σχέσεις παρουσιάζει αυξανόμενη βαρύτητα για τον υπολογισμό της εκάστοτε συντεταγμένης. Το παραπάνω σε συνδυασμό με το γεγονός ότι αυξανόμενου του ω αυξάνεται και το $\sin(\omega)$, δημιουργεί αυτό το αποτέλεσμα.

Για την επίλυση του προβλήματος επιλέχθηκε να ακολουθηθεί αριθμητικός τρόπος με τη δημιουργία μιας επαναληπτικής διαδικασίας. Έτσι, επιστρατεύθηκαν τέσσερις προσωρινές μεταβλητές που αλλάζουν τιμή σε κάθε επανάληψη οι: e , eks2x, eks2y και dek12. Μέχρι τη διαγραφή όλης της γωνίας fik (δεδομένο υπ' αριθμό 21), που προσδιορίζει το σημείο πέρατος της δεδομένης εξειλιγμένης καμπύλης και παράλληλα το σταμάτημα του αλγόριθμου υπολογισμού των σημείων, γίνονται i επαναλήψεις. Το αποτέλεσμα κάθε μιας από αυτές είναι ένα ζεύγος συντεταγμένων που προσδιορίζει ένα σημείο της εξειλιγμένης καμπύλης και αποθηκεύεται στις i -οστές θέσεις (eks(i,1) και eks(i,2) αντίστοιχα) του πίνακα eks(). Για την εύρεση της κατάλληλης διαμέρισης e εκτελείται μια δεύτερη επαναληπτική διαδικασία εντός της πρώτης. Η e είναι μια μεταβαλλόμενη διαμέριση η οποία αποκτά τιμή εκκίνησης 0.5 μοίρες (που μετατρέπονται σε rad) σε κάθε i -οστή επανάληψη.

Σε κάθε επανάληψη της ένθετης διαδικασίας:

A) Υπολογίζονται από τις σχέσεις (3.4) και (3.42) οι συντεταγμένες X_2 και Y_2 (eks2x και eks2y αντίστοιχα) του πιθανού νέου σημείου της εξειλιγμένης καμπύλης για την υπό κρίση καταλληλότητας γωνία $\omega + e$ ($a + e$ στην εφαρμογή).



Σχήμα 5.1
Σημεία της εξειλιγμένης καμπύλης που προέκυψαν από την παραμετρική συνάρτηση για ίσες αυξήσεις της γωνίας διαγραφής.

Β) Υπολογίζεται η απόσταση του πιθανού σημείου με συντεταγμένες X_2 και Y_2 από το αμέσως προηγούμενο σημείο, το οποίο έχει αποθηκευθεί (θέσεις $eks(i-1,1)$ και $eks(i-1,2)$) -ως αποδεκτό- με το πέρασμα της προηγούμενης ευρύτερης επανάληψης. Ο υπολογισμός γίνεται μέσω της σχέσης:

$$dek12 = \sqrt{[eks2x - eks(i-1,1)]^2 + [eks2y - eks(i-1,2)]^2} \quad (5.1)$$

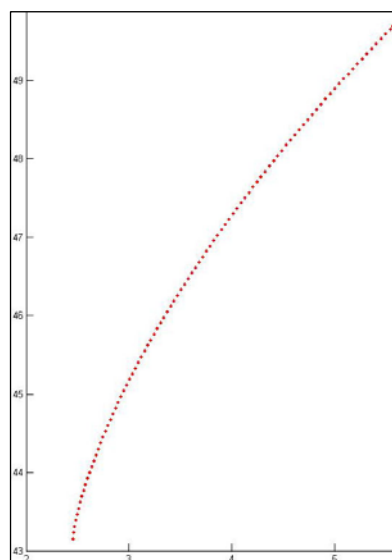
Γ_α) Ελέγχεται αν η απόσταση των δύο σημείων $dek12$ είναι μικρότερη της ελάχιστης ζητούμενης απόστασης s και αν είναι τότε η e προσαυξάνεται κατά 0.00011 μίρες και η ένθετη επανάληψη ξεκινάει πάλι από το βήμα Α.

Γ_β) Ελέγχεται αν η απόσταση των δύο σημείων $dek12$ είναι μεγαλύτερη της μέγιστης ζητούμενης απόστασης $s + ds$ και αν είναι τότε η e μειώνεται κατά 0.0001 μίρες και η ένθετη επανάληψη ξεκινάει πάλι από το βήμα Α.

Γ_γ) Ελέγχεται αν η απόσταση των δύο σημείων $dek12$ είναι μεγαλύτερη της ελάχιστης ζητούμενης απόστασης s και την ίδια στιγμή αν είναι μικρότερη της μέγιστης ζητούμενης απόστασης $s + ds$ και αν είναι, τότε: α) εγγράφονται οι X_2 και Y_2 ($eks2x$ και $eks2y$) στις i -οστές θέσεις ($eks(i,1)$ και $eks(i,2)$ αντίστοιχα) του πίνακα $eks()$, β) προσαυξάνεται η γωνία ω κατά την εγκεκριμένη διαμέριση e ($a + e$ στην εφαρμογή) και γ) παύεται η ένθετη επαναληπτική διαδικασία και εκκινεί η υπ' αριθμό $(i+1)$ ευρύτερη επανάληψη.

Αφού υπολογιστούν όλα τα σημεία της εξειλιγμένης καταχωρείται στη μεταβλητή E το πλήθος τους. Κατόπιν, υπολογίζονται αναλυτικά οι τιμές των (3.4) και (3.42) για γωνία fik και αντικαθιστούν τις τελευταία υπολογισμένες –με την προηγούμενη μέθοδο– τιμές της εξειλιγμένης (θέσεις $eks(E,1)$ και $eks(E,2)$). Αυτό γίνεται έτσι ώστε να καταγράφεται με ακρίβεια το τελευταίο σημείο της καμπύλης, που προσδιορίζει και τον κύκλο κεφαλής.

Στη συνέχεια εκτελείται ο πολλαπλασιασμός που περιγράφεται από τη σχέση (3.44) και περιστρέφει τα σημεία της εξειλιγμένης κατά τη γωνία fek , φέρνοντάς τα στη σωστή θέση σε σχέση με τον άξονα συμμετρίας του διακένου των δοντιών. Τα νέα σημεία καταχωρούνται στον πίνακα $eks()$ στη θέση των παλιών. Τα αποτελέσματα του αλγορίθμου υπολογισμού των σημείων της εξειλιγμένης παρουσιάζονται στο σχήμα 5.2.



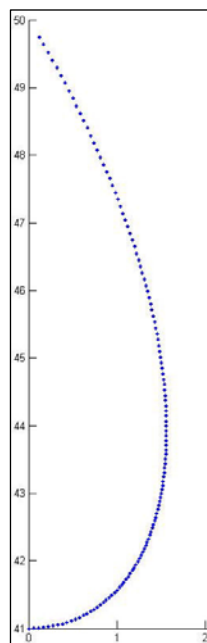
Σχήμα 5.2

Σημεία της εξειλιγμένης καμπύλης που προέκυψαν από την παραμετρική συνάρτηση για άνισες αυξήσεις της γωνίας διαγραφής.

5.2.3 Αναλυτική παρουσίαση αλγόριθμου υπολογισμού των σημείων του τροχοειδούς

Στο παράρτημα Κώδ.1.3 παρουσιάζεται ο κώδικας υπολογισμού των σημείων του τροχοειδούς. Πριν αναλυθεί ο καθεαυτού αλγόριθμος, πρέπει να επισημανθεί πως και για την περίπτωση των σχέσεων που εξάγουν τα σημεία της καμπύλης του τροχοειδούς εμφανίζεται το φαινόμενο για ίσες διαμερίσεις της γωνίας θ τα εξαγόμενα σημεία να μην ισαπέχουν (βλ. σχήμα 5.3). Για την ακρίβεια, τα σημεία κοντά στον

κύκλο ποδός του τροχού εμφανίζουν μια απόσταση μεταξύ τους η οποία βαίνει μειούμενη, καθώς η γωνία θ αυξάνεται και η καμπύλη του τροχοειδούς τείνει να γίνει κατακόρυφη. Η πυκνότητα των σημείων μεγιστοποιείται όταν η γωνία της εφαπτόμενης στην καμπύλη του τροχοειδούς είναι περίπου 45 μοίρες. Από εκεί και πέρα αρχίζει και πάλι μια σταδιακή αραίωση. Η αιτία αυτής της ανομοιομορφίας δεν μπορεί να εξηγηθεί εποπτικά όπως στην προηγούμενη περίπτωση εξαιτίας της πολυπλοκότητας που χαρακτηρίζει την εμπλοκή της γωνίας θ (και πάλι a στην εφαρμογή) στις σχέσεις εύρεσης του τελικού σημείου του τροχοειδούς. Πάντως, πιθανά έχει να κάνει με την κλίση της γενέτειρας καμπύλης του τροχοειδούς, που παράγεται από το κέντρο καμπυλότητας της ακμής του δοντιού του νοητού κοπτικού κανόνα (σχέση (3.35)), αφού με βάση αυτή γίνεται η προς τα έξω προβολή των τελικών σημείων του.



Σχήμα 5.3
Ανομοιογενής διασπορά των σημείων που απαρτίζουν το τροχοειδές, που εξήχθησαν για ίσες αυξήσεις της γωνίας διαγραφής θ .

Προκειμένου να επιτευχθεί ισοκατανομή των σημείων κατά μήκος της καμπύλης του τροχοειδούς ακολουθήθηκε και πάλι μια αριθμητική μέθοδος αντίστοιχη με την περίπτωση της εξειλιγμένης. Και πάλι υπάρχει μια επαναληπτική διαδικασία ένθετη σε μια άλλη ευρύτερη. Πριν την έναρξη των επαναλήψεων δίνονται οι συντεταγμένες του πρώτου σημείου του τροχοειδούς επί του κύκλου ποδός (θέσεις $fil(1,1)$ και $fil(1,2)$ του πίνακα $fil()$ με τις συντεταγμένες των σημείων του τροχοειδούς. Η ευρύτερη επαναληπτική διαδικασία εκτελείται i φορές μέχρι το υπολογιζόμενο σημείο του τροχοειδούς να ξεπεράσει σε ακτινική απόσταση την ακτίνα του αρχικού κύκλου. Αυτό συμβαίνει όταν ισχύσει η συνθήκη:

$$\sqrt{[fil(i,1)]^2 + [fil(i,2)]^2} > r_0 \quad (5.2)$$

Όπου $fil(i,1)$ και $fil(i,2)$ είναι οι συντεταγμένες X και Y του i -οστού σημείου του τροχοειδούς. Και πάλι χρησιμοποιούνται οι προσωρινές μεταβλητές: e , $fil1x$, $fil1y$, A , $filx$, $fily$ και $dfil2$. Η μεταβαλλόμενη διαμέριση e αποκτά τιμή εκκίνησης 0.5 μοίρες, στην αρχή κάθε i -οστής επανάληψης της ευρύτερης επαναληπτικής διαδικασίας. Για την εύρεση της κατάλληλης διαμέρισης e εκτελείται η δεύτερη επαναληπτική διαδικασία εντός της ευρύτερης.

Σε κάθε επανάληψη της ένθετης διαδικασίας:

A) Υπολογίζονται από τις σχέσεις (3.32) και (3.33) οι συντεταγμένες X_Z και Y_Z ($fil1x$ και $fil1y$ αντίστοιχα) του πιθανού νέου σημείου της καμπύλης του τροχοειδούς (που διαγράφει το κέντρο καμπυλότητας της ακμής του δοντιού του νοητού κοπτικού κανόνα) για την υπό κρίση καταλληλότητας γωνία $\theta + e$ ($a + e$ στην εφαρμογή).

B) Υπολογίζεται από τη σχέση (3.35) η κλίση της καμπύλης τροχοειδούς του παραπάνω πιθανού σημείου και εκχωρείται στην προσωρινή μεταβλητή A .

Γ) Υπολογίζονται από τις σχέσεις (3.36) και (3.37) οι συντεταγμένες X_T και Y_T ($filx$ και $fily$ αντίστοιχα) του πιθανού νέου τελικού σημείου της καμπύλης του τροχοειδούς για την υπό κρίση καταλληλότητας γωνία $\theta + e$ ($a + e$ στην εφαρμογή).

Δ) Υπολογίζεται η απόσταση του παραπάνω πιθανού σημείου με συντεταγμένες X_T και Y_T από το τρέχον σημείο, το οποίο έχει αποθηκευθεί (θέσεις $fil(i,1)$ και $fil(i,2)$) -ως αποδεκτό- με το πέρας της προηγούμενης ευρύτερης επανάληψης. Ο υπολογισμός γίνεται μέσω της σχέσης:

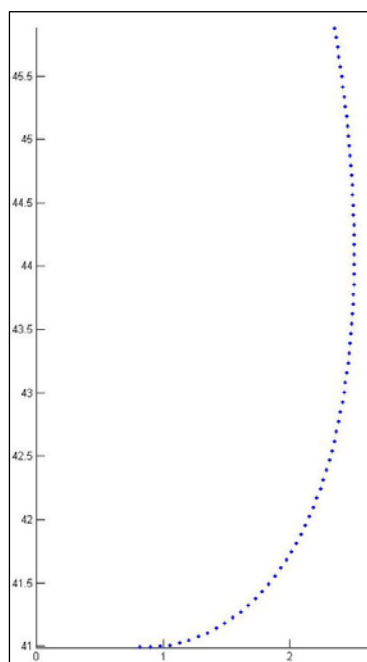
$$dfil12 = \sqrt{[filx - fil(i,1)]^2 + [fily - fil(i,2)]^2} \quad (5.3)$$

Ε_α) Ελέγχεται αν η απόσταση των δύο σημείων $dfil12$ είναι μικρότερη της ελάχιστης ζητούμενης απόστασης s και αν είναι τότε η e προσαυξάνεται κατά 0.00011 μίρες και η ένθετη επανάληψη ξεκινάει πάλι από το βήμα A.

Ε_β) Ελέγχεται αν η απόσταση των δύο σημείων $dfil12$ είναι μεγαλύτερη της μέγιστης ζητούμενης απόστασης $s + ds$ και αν είναι τότε η e μειώνεται κατά 0.0001 μίρες και η ένθετη επανάληψη ξεκινάει πάλι από το βήμα A.

Ε_γ) Ελέγχεται αν η απόσταση των δύο σημείων $dfil12$ είναι μεγαλύτερη της ελάχιστης ζητούμενης απόστασης s και την ίδια στιγμή αν είναι μικρότερη της μέγιστης ζητούμενης απόστασης $s + ds$ και αν είναι, τότε: α) εγγράφονται οι X_T και Y_T ($filx$ και $fily$) στις επόμενες των τρεχουσών θέσεις με αριθμό $(i+1)$ ($fil(i+1,1)$ και $fil(i+1,2)$ αντίστοιχα) του πίνακα $fil()$, β) προσαυξάνεται η γωνία θ κατά την εγκεκριμένη διαμέριση e ($\theta + e$ στην εφαρμογή) και γ) παύεται η ένθετη επαναληπτική διαδικασία και εκκινεί η υπ' αριθμό $(i+1)$ ευρύτερη επανάληψη.

Παρατηρείται εδώ μια μικρή διαφορά σε σχέση με τον αλγόριθμο υπολογισμού των σημείων της εξειλιγμένης η οποία έχει να κάνει με το i εκκίνησης της ευρύτερης επαναληπτικής διαδικασίας το οποίο είναι το 2 για την εξειλιγμένη και το 1 για το τροχοειδές. Αφού υπολογιστούν όλα τα σημεία του τροχοειδούς καταχωρείται στη μεταβλητή G το πλήθος τους.



Στη συνέχεια εκτελείται ο πολλαπλασιασμός που περιγράφεται από τη σχέση (3.38) και περιστρέφει τα σημεία του τροχοειδούς κατά τη γωνία ν , φέρνοντάς τα στη σωστή θέση σε σχέση με τον άξονα συμμετρίας του διακένου των δοντιών. Τα νέα σημεία καταχωρούνται στον πίνακα $fil()$ στη θέση των παλιών. Τα αποτελέσματα του αλγορίθμου υπολογισμού των σημείων του τροχοειδούς παρουσιάζονται στο σχήμα 5.4.

Σχήμα 5.4

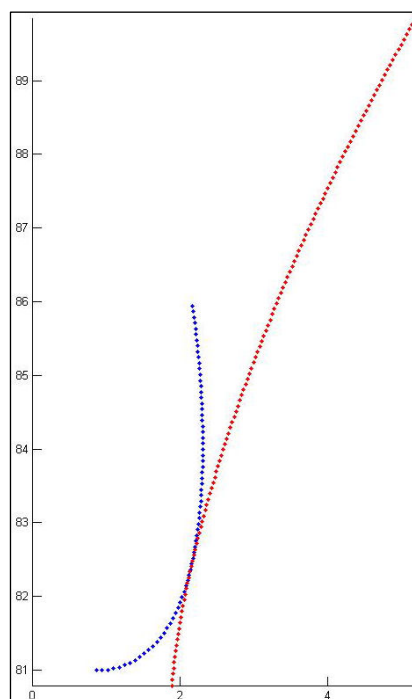
Ομοιογενής διασπορά των σημείων επί της καμπύλης του τροχοειδούς μετά των υπολογισμούς τους με χρήση άνισων διαμερίσεων της γωνίας διαγραφής.

5.2.4 Αναλυτική παρουσίαση των αλγορίθμων: α) εύρεσης του σημείου τομής των καμπυλών εξειλιγμένης και τροχοειδούς, β) υπολογισμού των σημείων της τελικής κατατομής και γ) υπολογισμού των διαμέτρων των κονδυλιών

Μετά το πέρας των παραπάνω αλγορίθμων υπολογισμού υπάρχουν πλέον σα δεδομένα δύο πίνακες: α) ο $eks()$ με πλήθος γραμμών E που κάθε μια αποτελείται

από τις δύο συντεταγμένες των σημείων της εξειλιγμένης, από το βασικό κύκλο μέχρι τον κύκλο κεφαλής και β) ο $fil()$ με πλήθος γραμμών G που κάθε μια αποτελείται από τις δύο συντεταγμένες των σημείων του τροχοειδούς, από τον κύκλο ποδός μέχρι τον αρχικό κύκλο. Πρέπει να σημειωθεί πως οι συντεταγμένες και των δύο αναφέρονται σε κοινό σύστημα συντεταγμένων με άξονα τεταγμένων τον άξονα συμμετρίας του διακένου των δοντιών.

Όταν τα σημεία των δύο καμπυλών προβληθούν στο ίδιο επίπεδο όπως στο σχήμα 5.5 παρατηρείται πως εμφανίζουν μια κοινή περιοχή. Μέσα σε αυτή την περιοχή βρίσκεται το σημείο τομής τους. Επειδή οι δύο καμπύλες δεν είναι συνεχείς, δεν υπάρχει ουσιαστικά σημείο τομής τους, αφού είναι θέμα τύχης να συμπέσει σημείο της μιας καμπύλης πάνω σε σημείο της άλλης. Ο αλγόριθμος εύρεσης του κοινού σημείου (βλ. παράρτημα Κωδ.1.4), έχει επιλεγεί να εντοπίζει τα δύο πλησιέστερα σημεία (ένα από κάθε καμπύλη) και να θεωρεί ως σημείο τομής το σημείο το προερχόμενο από την καμπύλη της εξειλιγμένης. Για να γίνει αυτό εκτελείται μια επαναληπτική διαδικασία που χρησιμοποιεί τις ακόλουθες προσωρινές μεταβλητές: dx για την διαφορά κατά x των δύο σημείων, dy για την διαφορά κατά y των



Σχήμα 5.5
Καμπύλες εξειλιγμένης και τροχοειδούς σε κοινό σύστημα συντεταγμένων.

δύο σημείων, $mindist$ για την αποθήκευση της ελάχιστης εντοπιζόμενης απόστασης και $dist$ για την αποθήκευση της τρέχουσας απόστασης.

Πριν την έναρξη της διαδικασίας υπολογίζεται η απόσταση του πρώτου σημείου της εξειλιγμένης ($eks(1,1)$, $eks(1,2)$) από το πρώτο σημείο του τροχοειδούς ($fil(1,1)$, $fil(1,2)$) και καταχωρείται σαν η ελάχιστη απόσταση στην $mindist$.

Κατόπιν, εκκινεί η επαναληπτική διαδικασία η οποία για κάθε ένα από τα i (όπου $i \in 1, 2, \dots, E$) ξεχωριστά σημεία της εξειλιγμένης καμπύλης και για όλα τα j (όπου $j \in 1, 2, \dots, G$) διαδοχικά σημεία του τροχοειδούς:

A) Βρίσκει την απόστασή τους κατά την έννοια των x' και y' αξόνων με τις ακόλουθες σχέσεις:

$$dx = eks(i,1) - fil(j,1) \quad (5.4)$$

$$dy = eks(i,2) - fil(j,2) \quad (5.5)$$

B) Υπολογίζει την απόσταση μεταξύ των σημείων του τρέχοντος ζεύγους με τη σχέση:

$$dist = \sqrt{(dx)^2 + (dy)^2} \quad (5.6)$$

Γ) Ελέγχει αν η $dist$ είναι μικρότερη από την τελευταία τιμή για την ελάχιστη απόσταση ($mindist$) που έχει καταχωρημένη και αν είναι: α) καταχωρεί στη $mindist$ την τιμή της $dist$, β) αποθηκεύει στις μεταβλητές t και k τη θέση (στους πίνακες $eks()$ και $fil()$) των συγκεκριμένων σημείων της εξειλιγμένης και του τροχοειδούς αντίστοιχα

και γ) επανεκκινεί τη διαδικασία από το σημείο A για το επόμενο ζεύγος σημείων, μέχρι εξαντλήσεως αυτών. Στην περίπτωση που η $dist$ είναι μεγαλύτερη ή ίση με την $mindist$ εκτελείται μόνο η γ) ενέργεια του συγκεκριμένου βήματος.

Με το πέρας της διαδικασίας εμφανίζεται στο χρήστη μήνυμα που τον ενημερώνει ότι η απόσταση των δύο σημείων του επιλεχθέντος ζεύγους είναι η τελευταία τιμή της $mindist$. Αν ο χρήστης θεωρήσει πως η απόσταση δεν είναι ικανοποιητική μπορεί να αλλάξει την μεταβλητή $akrib$ και να πυκνώσει ή να αραιώσει έτσι τα σημεία που αποτελούν τις δύο καμπύλες. Επανεκκινώντας κατόπιν όλη τη ρουτίνα, μπορεί να καταλήξει σε αποστάσεις μικρότερες του μισού μικρού (ουσιαστική ταύτιση των δύο σημείων).

Μέσα από την παραπάνω διαδικασία η εφαρμογή “γνωρίζει” πλέον μέχρι ποιο σημείο (θέση k του πίνακα $fil()$) με αφηγήρια τον κύκλο ποδός, θα θεωρεί για την κατατομή ότι συνίσταται από τα σημεία της καμπύλης του τροχοειδούς. Επιπρόσθετα, από ποιο σημείο και έπειτα (θέση t του πίνακα $eks()$) μέχρι τον κύκλο κεφαλής, θα θεωρεί για την κατατομή ότι συνίσταται από τα σημεία της καμπύλης της εξειλιγμένης. Αυτή που μόλις περιγράφηκε είναι η λογική που ακολουθείται κατά τη συμπλήρωση του πίνακα $katat()$ με τα σημεία του δεξιού μέρους της κατατομής του διακένου ανάμεσα σε δύο δόντια.

Στο παράρτημα Κωδ.1.5 παρατίθεται το κομμάτι της ρουτίνας που εκτελεί αυτή τη διαδικασία. Πριν αναλυθεί πρέπει να επισημανθεί πως οι επτά πρώτες θέσεις του πίνακα $katat()$ (οι $katat(1,1)$, $katat(1,2)$, $katat(2,1)$, $katat(2,2)$, $katat(3,1)$, $katat(3,2)$ και $katat(4,1)$) έχουν συμπληρωθεί με τις μεταβλητές εισόδου του προγράμματος (n , m , $a0$, cr , ct , rc και b αντίστοιχα) για να διασφαλισθεί πως τα δεδομένα που χρησιμοποιούν οι άλλες δύο ρουτίνες αφορούν κάθε φορά το σωστό οδοντωτό τροχό.

Στην αρχή ο αλγόριθμος θέτει στη μεταβλητή tom τον αριθμό των σημείων που θα αντληθούν από τον πίνακα με τα σημεία της εξειλιγμένης. Παράλληλα αποθηκεύει αυτή την τιμή στη θέση $katat(4,2)$ για να χρησιμοποιηθεί μετέπειτα από τη ρουτίνα $ekchondrisma.m$. Στη συνέχεια αντιγράφει τα tom τελευταία σημεία από τον πίνακα της εξειλιγμένης $eks()$ στον πίνακα $katat()$ στις θέσεις μετά τις πρώτες 8 που είναι κατειλημμένες.

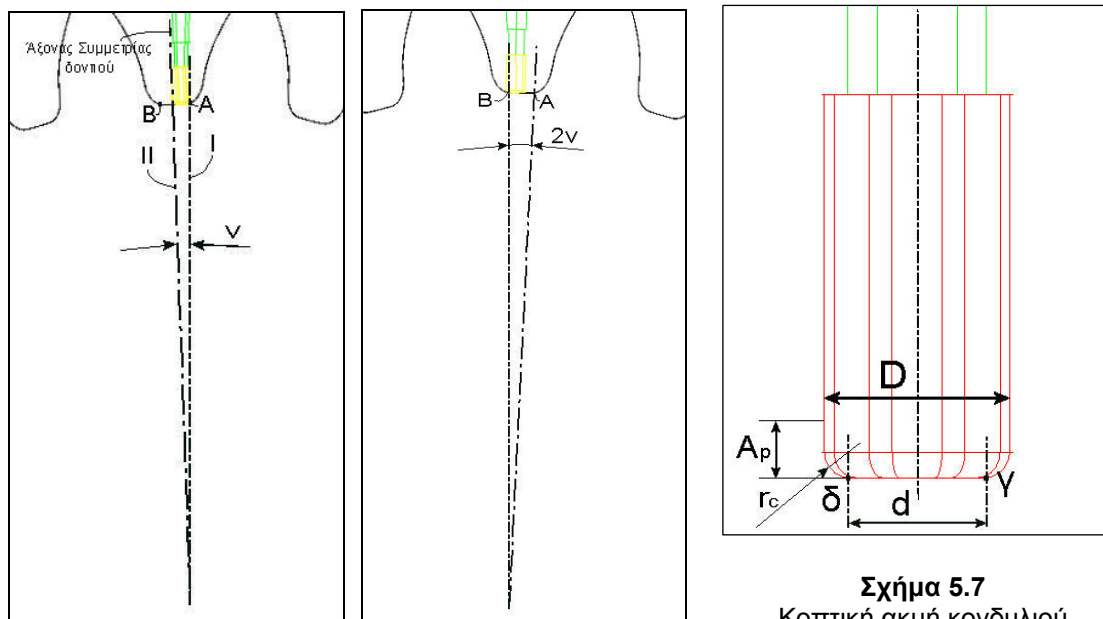
Για τις θέσεις μετά από το πλήθος tom αντιγράφει τα υπόλοιπα σημεία από τον πίνακα του τροχοειδούς $fil()$, από το σημείο τομής με την εξειλιγμένη μέχρι και τον κύκλο ποδός. Πρέπει εδώ να παρατηρηθεί πως ο πίνακας $katat()$ συμπληρώνεται αντίστροφα δηλαδή στις πρώτες θέσεις βρίσκονται οι συντεταγμένες των σημείων κοντά στην κεφαλή. Αυτό γίνεται γιατί τον καθιστά πιο εύχρηστο για τους αλγορίθμους κοπής, οι οποίοι, εύλογα, εκκινούν τις εντολές κοπής του τροχού από το εξωτερικό του προς το εσωτερικό του.

Πριν ολοκληρωθεί η ρουτίνα $gewmetria.m$ υπολογίζονται οι μέγιστες επιτρεπόμενες διάμετροι για τα κονδύλια που θα χρησιμοποιηθούν κατά τις διαδικασίες του εκchonδρίσματος και της αποπεράτωσης. Θα επεξηγηθεί πρώτα η λογική επιλογής της διαμέτρου του κονδυλιού αποπεράτωσης και ύστερα του κονδυλιού εκchonδρίσματος καθ’ όσον η επιλογή του δευτέρου εξαρτάται άμεσα από την επιλογή του πρώτου.

Στις δύο εικόνες του σχήματος 5.6 παρουσιάζεται το κονδύλι αποπεράτωσης στις δύο ακραίες φάσεις κατεργασίας του κύκλου ποδός. Στην πρώτη φάση η κάτω

δεξιά ακμή του (σημείο γ σχήμα 5.7) βρίσκεται στο σημείο A και κόβει το τελευταίο σημείο του τροχοειδούς της δεξιάς κατατομής του διακένου. Η κατακόρυφη αξονική γραμμή I που διέρχεται από το A διέρχεται επίσης από τον άξονα περιστροφής του τροχού και προσδιορίζει το σημείο δράσης γ του κάτω μέρους του κονδυλιού. Η αξονική I σχηματίζει με τον άξονα συμμετρίας II του διακένου των δοντιών γωνία ν (σχέση 3.27) όπως έχει επεξηγηθεί και στο κεφάλαιο 3, επομένως για να κοπεί όλος ο κύκλος ποδός θα πρέπει ο τροχός να στραφεί κατά $2 \cdot \nu$.

Μέχρι και αυτό το σημείο το κονδύλι αφαιρούσε υλικό με τη δεξιά καμπυλωμένη ακμή του. Σε αυτό το σημείο έχει ήδη βυθιστεί στο υλικό που έχει αφήσει πίσω του το κονδύλι εκχονδρίσματος (αυτό το δεδομένο επεξηγείται παρακάτω) και πλέον κόβει με το κάτω μέρος και την αριστερή πλευρά του (καμπυλωμένη και κατακόρυφη) τον κύκλο ποδός του διακένου και το υλικό που έχει απομείνει από το εκχόνδρισμα. Στη διάρκεια αυτής της τελευταίας κοπής η απόσταση από τον άξονα περιστροφής διατηρείται σταθερή (σταθερό ύψος Z για τη μηχανή), το κονδύλι μεταφέρεται προς τα δεξιά και σε οριζόντια διεύθυνση (στα αρνητικά του άξονα Y της μηχανής) και παράλληλα ο τροχός στρέφεται δεξιόστροφα (στα θετικά του άξονα A της μηχανής). Στο τέλος αυτής της κίνησης το σημείο δ (σχήμα 5.7) του κονδυλιού ταυτίζεται με το σημείο B από όπου διέρχεται πλέον και η κατακόρυφη αξονική. Από αυτό το σημείο και έπειτα η κοπή γίνεται μόνο με το αριστερό τμήμα του κονδυλιού.



Σχήμα 5.6
Στιγμιότυπα κοπής κύκλου ποδός.

Σχήμα 5.7
Κοπτική ακμή κονδυλιού αποπεράτωσης με σχεδιαστικά δεδομένα.

Η συνθήκη που πρέπει να ισχύει για το κονδύλι της αποπεράτωσης είναι πως πρέπει το κάτω επίπεδο τμήμα του γδ (σχήμα 5.7) να έχει μήκος το πολύ ίσο με το τόξο του κύκλου ποδός AB σχήμα (5.6). Αυτό απαιτείται γιατί η περιστροφική με την μεταφορική κίνηση γίνονται συγχρονισμένα και ένα κονδύλι με μεγαλύτερη διάμετρο d (σχήμα 5.7) είτε δεν θα χωρούσε είτε θα κατέστρεφε τη γεωμετρία των τροχοειδών. Δεδομένου ότι η ακτίνα του τόξου AB είναι ίση με την ακτίνα ποδός και ότι η γωνία του είναι $2 \cdot \nu$ η δευτερεύουσα διάμετρος d θα δίνεται από τη σχέση:

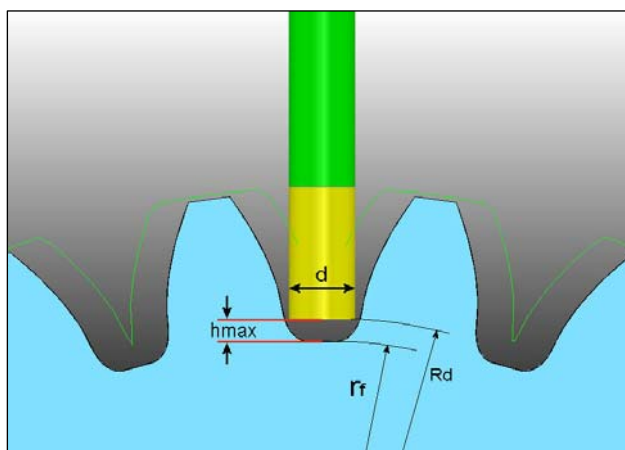
$$d(mm) = 2 \cdot v \cdot r_f \quad (5.7)$$

Σημειώνεται εδώ πως για την κύρια διάμετρο του κονδυλίου αποπεράτωσης D (βλ. σχήμα 5.7) ισχύει η σχέση:

$$D(mm) = d + 2 \cdot r_c \quad (5.8)$$

Στο ίδιο σχήμα σημειώνεται με το δείκτη A_p το ύψος της κοπτικής ακμής που δύναται να χρησιμοποιηθεί όταν το κονδύλι βυθίζεται με παράλληλη πλάγια κίνηση σε συμπαγές υλικό (ramp milling). Αυτή είναι και η δυσμενέστερη φόρτιση που μπορεί να δεχθεί το κονδύλι κατά τη συγκεκριμένη κατεργασία. Τέτοια συνθήκη κατεργασίας προκύπτει κατά την κοπή αποπεράτωσης του τροχοειδούς εφόσον μετά το εκχόνδρισμα δεν έχει επιτευχθεί η κοπή να γίνει μέχρι τον κύκλο ποδός (λόγω μεγάλης διαμέτρου του κονδυλίου εκχονδρίσματος). Άρα το μέγιστο A_p αποτελεί ουσιαστικά τον καθοριστικό παράγοντα για το ελάχιστο βάθος που θα απαιτηθεί να επιτύχει η κοπή του εκχονδρίσματος. Το A_p ταυτίζεται με το h_{max} του σχήματος 5.8 και καθορίζει έμμεσα τη διάμετρο d του κονδυλίου εκχονδρίσματος.

Το A_p δίνεται συνήθως σαν ποσοστό της κύριας διαμέτρου D του κονδυλίου αποπεράτωσης από την κατασκευάστρια εταιρεία. Μια μέση τιμή αυτού του ποσοστού, όπως προέκυψε από έρευνα σε μεγάλους κατασκευαστές του χώρου, ήταν 50% της κύριας διαμέτρου D . Από τη διαδικασία που περιγράφηκε προηγουμένως σαν δεδομένο



Σχήμα 5.8

Κονδύλι εκχονδρίσματος και μέγιστο επιτρεπόμενο ύψος ακατέργαστου υλικού που επιτρέπεται να παραμείνει μετά το εκχόνδρισμα.

υπάρχει η μέγιστη δευτερεύουσα διάμετρος d του κονδυλίου αποπεράτωσης και με βάση αυτή, -και όχι την κύρια- επιλέγεται από την εφαρμογή εκείνη η διάμετρος κονδυλίου εκχονδρίσματος που επιτυγχάνει:

$$A_p(mm) = R_d - r_f \quad (5.9)$$

Όπου R_d η ακτινική απόσταση στην οποία μπορεί να βυθιστεί το κονδύλι εκχονδρίσματος χωρίς να προκαλέσει βλάβη στη γεωμετρία. Επειδή η δευτερεύουσα διάμετρος είναι μικρότερη της κύριας, η επιλογή μπορεί να θεωρηθεί πιο συντηρητική. Επιπλέον, το προκύπτει:

$$h_{max} < R_d - r_f \quad (5.10)$$

οπότε και πάλι η επιλογή είναι συντηρητική αφού από (5.9) και (5.10) το τελικό ύψος του υλικού h_{max} θα είναι μικρότερο του ελάχιστου επιτρεπόμενου A_p . Παρόλα αυτά, αλλάζοντας το συντελεστή 0.5 της παρακάτω σχέσης (5.11) -εντός της εφαρμογής- μπορεί ο χρήστης να ρυθμίσει αυτή την επιλογή σε επιθυμητό επίπεδο. Επομένως, η μέγιστη διάμετρος d του κονδυλίου εκχονδρίσματος θα προκύψει για εκείνο το σημείο i της κατατομής, που θα εμφανίζει ακτινική απόσταση

$$R_d(i) = \sqrt{[katat(i,1)]^2 + [katat(i,2)]^2} \text{ τέτοια ώστε αφαιρούμενης της ακτίνας ποδός να}$$

προκύπτει απόσταση ίση με το A_p . Ο αλγόριθμος αναζητά από όλα τα σημεία της κατατομής εκείνο που πρώτο θα επιτύχει:

$$\sqrt{[katat(i,1)]^2 + [katat(i,2)]^2} - r_f \leq 0.5 \cdot (2 \cdot v \cdot r_f) \quad (5.11)$$

και κατόπιν αποθηκεύει την αμέσως προηγούμενη θέση (αφού στον πίνακα $katat()$ τα σημεία είναι διατεταγμένα από το πιο απόμακρο στο πλησιέστερο) στη μεταβλητή $Rdmin$. Με βάση αυτή τη θέση προκύπτει και η διάμετρος που συστήνεται από την εφαρμογή. Σε περίπτωση που η σχέση (5.11) δεν ικανοποιείται για κανένα i σημαίνει πως υπάρχει δυσαναλογία στα μεγέθη του οδοντωτού κανόνα που γεννούν λάθος γεωμετρία και για αυτό εμφανίζεται και στο χρήστη μήνυμα ότι ο συνδυασμός module με ακτίνα καμπυλότητας r_c ακμής κανόνα δεν είναι εφικτός.

Η ρουτίνα τελειώνει με εντολές για εγγραφή των συντεταγμένων σε μορφή ASCII για περαιτέρω χρήση από τις άλλες ρουτίνες αλλά και σε φύλλο της εφαρμογής Microsoft XL έτσι ώστε ο χρήστης να μπορεί να τις χρησιμοποιήσει όπου χρειάζεται (π.χ. πρόγραμμα CAD, επιβεβαίωση υπολογισμών κ.α.). Παρατίθενται και κάποιοι αλγόριθμοι δημιουργίας σχημάτων, από τα σημεία, για οπτικοποίηση της κατατομής.

5.3 Ρουτίνα δημιουργίας και εξαγωγής του κώδικα g-code του σταδίου του εκχονδρίσματος (ekxondrisma.m)

5.3.1 Δομή της ρουτίνας `ekxondrisma.m`

Κατά τη δημιουργία της ρουτίνας, εξαγωγής του κώδικα καθοδήγησης του κέντρου κατεργασιών για την εκτέλεση της διαδικασίας εκχονδρίσματος, στόχος ήταν η όσο το δυνατόν καλύτερη προσέγγιση της στρατηγικής, που επιλέχθηκε για το εκχόνδρισμα, από το αποτέλεσμα του αλγορίθμου. Η στρατηγική του εκχονδρίσματος (βλ. κεφάλαιο 4) όριζε πως η κατεργασία γίνεται διακριτά σε κάθε διάκενο. Προκειμένου να ολοκληρωθεί η κατεργασία ενός διακένου θα πρέπει να αφαιρεθεί το υλικό που περιέχει, υπό δύο αυστηρές συνθήκες: α) το πάχος του εναπομείναντος υλικού για το στάδιο της αποπεράτωσης επιβάλλεται να μην ξεπερνάει μια προκαθορισμένη από το χρήστη τιμή και β) το μέγιστο ακτινικό βάθος κοπής που θα επιτευχθεί να είναι τουλάχιστον αυτό που ορίστηκε στα προηγούμενα (βλ. συνθήκη (5.11)).

Για την επίτευξη της πρώτης συνθήκης θα πρέπει ο προς αφαίρεση όγκος υλικού (βλ. σχήμα 4.9) να χωριστεί σε νοητά παράλληλα επίπεδα με ενδιάμεση απόσταση τέτοια ώστε τα “σκαλοπάτια” υλικού που θα απομείνουν στις πλευρές της κατατομής να έχουν συγκεκριμένο πλάτος. Για να γίνει αυτό πρέπει πρώτα να βρεθούν τα σημεία της κατατομής που ικανοποιούν με τη θέση τους το επιθυμητό ύψος Z . Κατόπιν ο αλγόριθμος πρέπει να γεννήσει εκείνη τη διαδρομή εργαλείου που θα επιτύχει την επιπεδοποίηση όλης της προβλεπόμενης επιφάνειας που υπαγορεύει το συγκεκριμένο Z και τέλος να οδηγήσει το εργαλείο στο πέρασμα από το μέγιστο απαιτούμενο βάθος κοπής.

Στην αρχή της ρουτίνας (βλ. παράρτημα Κωδ.2.1) ο χρήστης καλείται να εισάγει τη διάμετρο του κυλινδρικού κονδυλιού (d) που θα χρησιμοποιήσει. Έχει θεωρηθεί δεδομένο πως δεν θα χρησιμοποιηθεί κονδύλι μεγαλύτερης διαμέτρου από αυτή που συστήνεται από την προηγούμενη ρουτίνα. Επειδή όμως μπορεί να

χρησιμοποιηθεί κονδύλι μικρότερης διαμέτρου, ο αλγόριθμος πρέπει να υπολογίζει το νέο μέγιστο βάθος κοπής και να εξάγει κώδικα για την επίτευξη αυτού του βάθους.

Για να “γνωρίζει” ο αλγόριθμος το επιθυμητό πάχος του εναπομένοντος υλικού ζητείται από το χρήστη να το εισάγει στη θέση της μεταβλητής *ofst* σε mm. Το *ofst* βρίσκεται ουσιαστικά σε άμεση συνάρτηση με το πάχος υλικού που μπορεί να κόψει το κονδύλι αποπεράτωσης σε φάση βύθισης με το κάτω μέρος του και για αυτό το λόγο θα μπορούσε να θεωρηθεί από την προηγούμενη ρουτίνα ίσο με το ήμισυ της δευτερεύουσας διαμέτρου. Προτιμήθηκε όμως, για λόγους αποφόρτισης του κονδυλιού (και άρα βελτίωσης της τελικής επιφάνειας) κατά την αποπεράτωση της κατατομής της εργαζόμενης επιφάνειας (εξειλιγμένη) να δίνεται αυτή η δυνατότητα επιλογής μικρότερου μεγέθους στο χρήστη.

Κατά την κοπή των επίπεδων επιφανειών που δημιουργεί ο αλγόριθμος, εντός του διακένου, το κονδύλι κόβει κατά μήκος της επιφάνειας διαγράφοντας παράλληλες τροχιές, εναλλάξ προς τα θετικά και τα αρνητικά, στην αξονική διεύθυνση *X* της μηχανής. Σε κάθε διαδρομή του, πέραν της πρώτης, θα πρέπει μέρος της επίπεδης κάτω κοπτικής ακμής του να διέλθει πάνω από το ήδη κομμένο τμήμα εξασφαλίζοντας με αυτό τον τρόπο την πλήρη επιπεδοποίηση της επιφάνειας. Το μέγεθος αυτό της επικάλυψης ζητείται από το χρήστη να καταχωρηθεί στη μεταβλητή *over* σαν ποσοστό επί τοις εκατό της διαμέτρου (*d*) του κονδυλιού. Για να υπολογιστεί το μέγεθος της μέγιστης πλευρικής μετατόπισης σε κάθε πάσο από τη σχέση:

$$rov(mm) = d \cdot over \quad (5.12)$$

Επειδή κατά το πρώτο πάσο επιπεδοποίησης μιας επιφάνειας, το κονδύλι κόβει αύλακα σε συμπαγές υλικό (*slotting*), πρέπει να ορισθεί στον αλγόριθμο το μέγιστο βάθος κοπής του κονδυλιού για τέτοια περίπτωση. Ο ορισμός γίνεται στη μεταβλητή *ap* σαν ποσοστό επί τοις εκατό της διαμέτρου (*d*) του κονδυλιού. Και άρα το τελικό μέγεθος σε mm προκύπτει από τη σχέση:

$$z \max(mm) = ap \cdot d \quad (5.13)$$

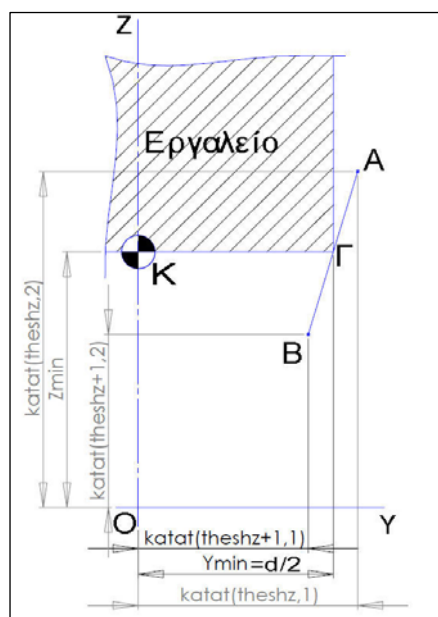
Αυτή είναι και η τελευταία μεταβλητή εισόδου που θέτει ο χρήστης, από εκεί και έπειτα εισάγονται όπως προαναφέρθηκε τα επτά κύρια κατασκευαστικά μεγέθη του τροχού και υπολογίζονται τα δεδομένα 9 έως και 25 της ενότητας 5.2.1 με τον τρόπο που προαναφέρθηκε. Πλέον ο αλγόριθμος διαθέτει όλες τις παραμέτρους που απαιτούνται για την εκτέλεσή του.

5.3.2 Αναλυτική παρουσίαση του αλγορίθμου εύρεσης των κατάλληλων υψών κοπής για καθένα από τα επίπεδα εκχονδρίσματος

Η πρώτη εργασία που εκτελεί ο αλγόριθμος *ekchondrisma.m* (βλ. παράρτημα Κωδ.2.2) είναι η εύρεση του κατώτατου ύψους *Zmin* που θα φτάσει στο τελευταίο πάσο το κονδύλι. Σε αυτό το ύψος, και οι δύο ακμές εκατέρωθεν του άξονα συμμετρίας *OZ* (βλ. σχήμα 5.9) του κονδυλιού (ο οποίος θα ταυτίζεται με τον άξονα συμμετρίας του διακένου των δοντιών) θα κόβουν σημεία των συμμετρικών κατατομών. Αυτά θα είναι τα κατώτατα σημεία της κατατομής που το κονδύλι αυτής της διαμέτρου γίνεται να κόψει χωρίς να δημιουργήσει βλάβη στη γεωμετρία. Ο αλγόριθμος χωρίζεται σε δύο φάσεις. Στην πρώτη, μέσω ενός ελέγχου εντοπίζει το τελευταίο σημείο (από πάνω προς τα κάτω) της δεξιάς κατατομής που απέχει από

τον άξονα OZ απόσταση μεγαλύτερη από το ήμισυ της διαμέτρου (σημείο A σχήμα 5.9) και αποθηκεύει τη θέση του στη μεταβλητή *theshz*. Κατόπιν, και θεωρώντας και το αμέσως επόμενο προς τα κάτω σημείο της κατατομής με δείκτη *theshz+1* (σημείο B σχήμα 5.9), υπολογίζει την εξίσωση της ευθείας που διέρχεται από τα δύο σημεία της κατατομής. Γνωρίζοντας ότι το σημείο Γ του σχήματος 5.9, πρέπει να απέχει από τον άξονα OZ απόσταση ίση με *d/2*, και αντικαθιστώντας στην εξίσωση της ευθείας ο αλγόριθμος υπολογίζει το *Zmin* με τις ακόλουθες σχέσεις:

$$y_{\min}(mm) = d / 2 \quad (5.14)$$



Σχήμα 5.9

Εύρεση του κατώτατου ύψους *Zmin* που θα κόψει το κονδύλι κατά το εκχόνδρισμα.

$$z_{\min}(mm) = katat(theshz, 2) - \left\{ \frac{[katat(theshz, 2) - katat(theshz + 1, 2)]}{[katat(theshz, 1) - katat(theshz + 1, 1)]} \right\} \cdot [katat(theshz, 1) - y_{\min}] \quad (5.15)$$

Επομένως, όταν το κέντρο K του συστήματος αναφοράς του εργαλείου βρεθεί στη θέση με συντεταγμένες (0, *Zmin*), το κονδύλι θα βρίσκεται στο κατώτατο δυνατό σημείο (δεδομένου ότι κατά το εκχόνδρισμα άξονας Z της μηχανής και άξονας συμμετρίας του διακένου ταυτίζονται). Σε ότι αφορά το πάχος του εναπομένοντος υλικού, κατά την κατάστροψη των συνθηκών που υπαγόρευσαν τον αλγόριθμο έγιναν οι ακόλουθες παραδοχές έτσι ώστε να εξαγονται τα ζητούμενα ύψη κοπής:

A) για λόγους ελέγχου και ευκολίας όλα τα ύψη κοπής θα αντιστοιχούν σε υπαρκτές τεταγμένες της κατατομής με εξαίρεση το κατώτατο που ευρίσκεται με τη μέθοδο που περιγράφηκε.

B) οι έλεγχοι για την εύρεση των τεταγμένων είναι διαφορετικοί: για το κομμάτι της κατατομής που ανήκει στην εξειλιγμένη, και στρέφει τα κοίλα κάτω, και για το κομμάτι που ανήκει στο τροχοειδές και στρέφει τα κοίλα πάνω.

Γ) το σημείο τομής των δύο καμπυλών αποτελεί πάντα σημείο της τροχιάς εργαλείου.

Δ) για λόγους συντηρητικότητας, ασφαλείας, ταχύτητας υπολογισμών αλλά και απλότητας επιλέχθηκε οι αποστάσεις που τίθενται υπό έλεγχο να μην είναι τα υποψήφια προς γένεση πάχη αλλά, άλλες γεωμετρικές διαστάσεις που για δεδομένο εναπομείναν πάχος εμφανίζουν διαστάσεις μεγαλύτερες. Επομένως αν ο έλεγχος γίνει ως προς αυτές τότε το πραγματικό εναπομείναν πάχος υλικού θα είναι μικρότερο.

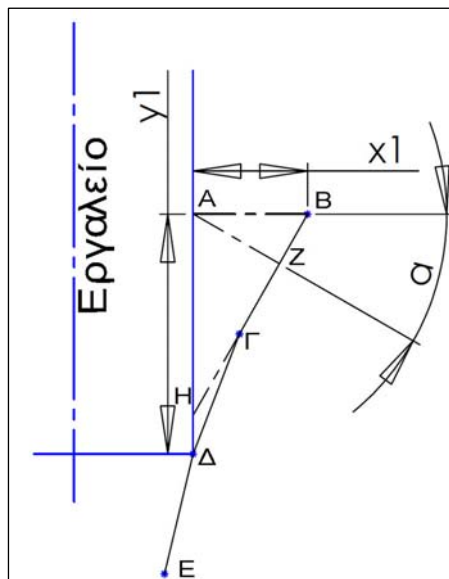
Για να γίνει κατανοητή η τελευταία παραδοχή χρησιμοποιείται το ακόλουθο παράδειγμα. Στο σχήμα 5.10 τα σημεία B,Γ,Δ και E ανήκουν στην αριστερή κατατομή ενός δοντιού και μάλιστα στο τμήμα της εξειλιγμένης. Με μπλε χρώμα είναι

σχεδιασμένη η δεξιά πλευρά του κονδυλιού εκχονδρίσματος. Αν θεωρηθεί πως μέχρι το επίπεδο που βρίσκεται το ευθύγραμμο τμήμα AB υπάρχει συμπαγές υλικό (του χώρου που καταλαμβάνει το εργαλείο συμπεριλαμβανομένου) ο αλγόριθμος καλείται να επιλέξει ποιο θα είναι το επόμενο βάθος Y1 που πρέπει να κοπεί, έτσι ώστε το εναπομένον υλικό στο πλευρό του εργαλείου να έχει συγκεκριμένο πάχος.

Στόχος είναι, αν γίνεται, να παρακαμφθούν κάποια σημεία της κατατομής από την τροχιά του εργαλείου (όπως το Γ στο σχήμα 5.10) και με αυτό τον τρόπο να εξοικονομηθεί χρόνος από την κατεργασία. Το πως γίνεται αυτό θα εξηγηθεί αμέσως μετά, αυτό που πρέπει να αποσαφηνισθεί είναι ποια διάσταση θα πρέπει να θεωρηθεί ως πάχος και με βάση αυτή να γίνει ο έλεγχος. Οι δύο επιλογές που υπάρχουν είναι είτε το τμήμα AZ που αποτελεί το ύψος του νοητού τριγώνου AHB είτε η οριζόντια απόσταση AB που αποτελεί την υποτεινούσα του ABZ και άρα $AB > AZ$. Εκ πρώτης όψεως η επιλογή που βρίσκεται πιο κοντά στην έννοια του πάχους είναι το τμήμα AZ, όμως για τους λόγους που αναφέρθηκαν επελέγη η απόσταση AB.

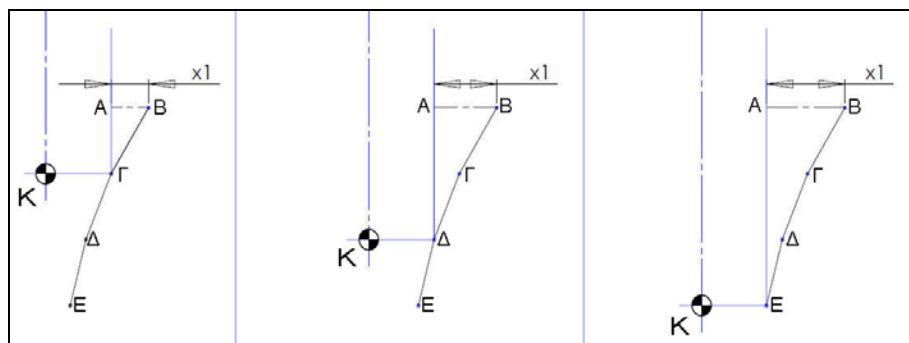
Ο έλεγχος που εκτελεί ο αλγόριθμος του παραρτήματος Κωδ.2.3 βασίζεται και πάλι σε επαναληπτικές διαδικασίες. Πρώτη εντολή είναι η αποθήκευση της θέσης (στον πίνακα `katat()`) του πρώτου σημείου της κατατομής έτσι ώστε να επιπεδοποιηθεί το κομμάτι του αρχικού κυλινδρικού μπλοκ ανάμεσα στις ακμές κεφαλής των δύο δοντιών και να έχει μια αφετηρία η διαδικασία ελέγχου. Για την αποθήκευση των θέσεων των εκλεγέντων σημείων από τον πίνακα `katat()` χρησιμοποιείται ο πίνακας στήλη `apoxros()`. Στη συνέχεια γίνεται ένας έλεγχος, έτσι ώστε να εντοπισθεί αν το κατώτατο σημείο από όπου θα διέλθει το κονδύλι, βρίσκεται κάτω από το επίπεδο που ορίζει το σημείο τομής μεταξύ καμπύλης τροχοειδούς και εξειλιγμένης. Σε αυτή την περίπτωση ο αλγόριθμος εύρεσης, των σημείων ορισμού των επιπέδων κοπής, χωρίζεται σε δύο μέρη.

Το πρώτο μέρος αφορά στην εύρεση των σημείων που ανήκουν στο κομμάτι της εξειλιγμένης. Για αυτά όπως εξηγήθηκε προηγουμένως η απόσταση που ελέγχεται αν είναι μικρότερη του `ofst` είναι η χ_1 όπως φαίνεται στο σχήμα 5.11.



Σχήμα 5.10

Δυνατές επιλογές για την έννοια του πάχους που αφήνει πίσω του το εκχονδρίσμα.



Σχήμα 5.11

Διαδοχικά στιγμιότυπα ελέγχου της απόστασης χ_1 για την εύρεση εκείνου που ικανοποιεί το επιθυμητό πάχος υλικού.

Ο έλεγχος γίνεται ως εξής:

A) Θεωρείται το ζεύγος των σημείων B και Γ και υπολογίζεται η απόσταση χ_1 από τις τετμημένες τους με τη σχέση:

$$\chi_1 = x_B - x_T = \text{katat}(j,1) - \text{katat}(i,1) \quad (5.16)$$

Όπου: j η θέση του στατικού σημείου αφετηρίας (σημείο B και για τα τρία στιγμιότυπα του σχήματος 5.11) στον πίνακα $\text{katat}()$, κάθε επανάληψης ελέγχου και i η θέση του δυναμικού σημείου (σημείο Γ, Δ και Ε αντίστοιχα για κάθε μια από τις τρεις επαναλήψεις του σχήματος) που μεταβάλλεται σε κάθε επανάληψη. Η μέγιστη τιμή που λαμβάνει αυτή η θέση είναι εκείνη που ο πίνακας $\text{katat}()$ ορίζει (στη θέση $\text{katat}(4,2)$) ότι βρίσκεται το σημείο τομής τροχοειδούς και εξειλιγμένης.

B_α) Ελέγχεται αν το χ_1 είναι μικρότερο ή ίσο του ορισθέντος ofst και αν είναι τότε αυξάνεται η τιμή του i κατά 1 και επανεκκινεί η επαναληπτική διαδικασία από το βήμα A). Με αυτό τον τρόπο το σημείο θεωρείται αποδεκτό από το κριτήριο ελέγχου και ο αλγόριθμος προχωρά στην εξέταση του επόμενου σημείου (από το Γ στο Δ κ.ο.κ.).

B_β) Ελέγχεται αν το χ_1 είναι μεγαλύτερο του ορισθέντος ofst και παράλληλα αν η θέση του σημείου αφετηρίας j προσαυξημένη κατά 1 είναι μεγαλύτερη ή ίση με την τιμή της τρέχουσας θέσεως i. Το ενδεχόμενο να είναι μεγαλύτερη περιλαμβάνεται στον έλεγχο μόνο για λόγους πληρότητας αφού είναι ανέφικτο από τη φύση του αλγορίθμου. Αυτό που ενδιαφέρει είναι αν είναι ίσες.

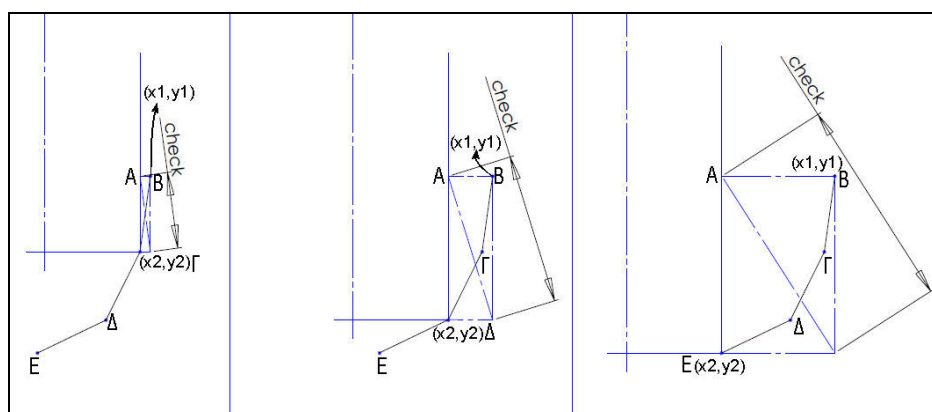
Η τιμή της j είναι στατική για όσους κύκλους χρειαστεί η διαδικασία μέχρι να εντοπίσει την επόμενη θέση που πληροί το κριτήριο ελέγχου. Αφού εντοπισθεί και κατόπιν καταγραφεί (βλ. επόμενο βήμα B_γ) η j παίρνει την τιμή που εντοπίστηκε και ο αλγόριθμος εκτελείται για τα i από το νέο σημείο και έπειτα. Αν επομένως, κατά την εξέταση του αμέσως επόμενου –από το νέο j– σημείου, το χ_1 προκύψει μεγαλύτερο του επιθυμητού, αυτό σημαίνει πως με τις δεδομένες διαμερίσεις του μήκους της κατατομής δεν υπάρχει σημείο στο οποίο πηγαίνοντας το εργαλείο να αφήσει πάχος υλικού μικρότερο ή ίσο του ορισθέντος επιθυμητού. Για αυτό το λόγο παύεται ο αλγόριθμος και εμφανίζεται μήνυμα που αναφέρει την εμφάνιση του συγκεκριμένου προβλήματος. Ο χρήστης σε τέτοια περίπτωση πρέπει να επιστρέψει στον αλγόριθμο γένεσης της γεωμετρίας και μεταβάλλοντας προς τα κάτω τη μεταβλητή akrib να δημιουργήσει μια κατατομή με μεγαλύτερο πλήθος σημείων.

B_γ) Ελέγχεται αν το χ_1 είναι μεγαλύτερο του ορισθέντος ofst και παράλληλα αν η θέση του σημείου αφετηρίας j προσαυξημένη κατά 1 είναι μικρότερη της τιμής της τρέχουσας θέσεως i. Σε αυτή την περίπτωση έχει μόλις ξεπεραστεί το ορισθέν όριο για το πάχος για το τρέχον σημείο με θέση i. Επομένως το ζητούμενο σημείο είναι αυτό που έχει θέση την αμέσως προηγούμενη. Έτσι, καταχωρείται στην τρέχουσα θέση k του πίνακα-στήλη αποχρος() η τιμή της τρέχουσας θέσεως i μειωμένη κατά 1, δίνεται στην τιμή του σημείου αφετηρίας j η τιμή της τρέχουσας θέσεως i μειωμένη κατά 1, προσαυξάνεται η τρέχουσα θέση k του πίνακα-στήλη αποχρος() κατά 1 και επανεκκινεί η επαναληπτική διαδικασία από το βήμα A).

Το σημείο τομής εξειλιγμένης και τροχοειδούς θεωρείται κοινό και για τις δύο, όμως το τρόπος ελέγχου του εναπομείναντος υλικού αλλάζει για το τμήμα του τροχοειδούς. Αυτό το σημείο αποτελεί πέρας της καμπύλης εξειλιγμένης (και άρα και του αλγορίθμου ελέγχου) και αρχή της καμπύλης τροχοειδούς (και άρα και του

αλγορίθμου ελέγχου). Για αυτό το λόγο πρέπει οπωσδήποτε να συμπεριλαμβάνεται στον πίνακα-στήλη αποχρος() με τις θέσεις των σημείων από όπου διέρχεται το εργαλείο. Για να εξασφαλισθεί αυτό ελέγχεται εάν η τελευταία θέση του πίνακα-στήλη αποχρος() έχει σαν τιμή τη θέση $katat(4,2)+4$ που εντοπίζεται το σημείο τομής τροχοειδούς και εξειλιγμένης στον πίνακα $katat()$. Εάν δεν έχει αυτή την τιμή τότε εγγράφεται επιπλέον σαν τελευταία τιμή του αποχρος().

Το πάχος του εναπομείναντος υλικού για τα σημεία που ανήκουν στο τροχοειδές θεωρείται όπως προαναφέρθηκε με διαφορετικό τρόπο. Επειδή η καμπύλη του τροχοειδούς στρέφει τα κοίλα άνω, δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί η απόσταση AB (βλ. σχήμα 5.12) που χρησιμοποιήθηκε προηγουμένως, αφού για περισσότερες της μιας διαμερίσεις είναι μικρότερη του πραγματικού πάχους του εναπομείναντος υλικού. Για αυτό το λόγο και πάντα με πρώτη προτεραιότητα την ασφάλεια της γεωμετρίας και των εργαλείων επιλέχθηκε σαν μέγεθος ελέγχου να χρησιμοποιηθεί το εκάστοτε μήκος της διαγωνίου check του σχήματος 5.12.



Σχήμα 5.12
Διαδοχικά στιγμιότυπα ελέγχου της απόστασης check για την εύρεση εκείνου που ικανοποιεί το επιθυμητό πάχος υλικού.

Η λύση αυτή υιοθετήθηκε και για το λόγο ότι αν βρισκόταν το πάχος του υλικού μέσω του κάθετου στην επιφάνεια -του τροχοειδούς- διανύσματος που διέρχεται από το σημείο A, θα έπρεπε ο αλγόριθμος να εξάγει νέα σημεία για την κατατομή. Η αύξηση της πολυπλοκότητας που θα υπήρχε για την υλοποίηση μιας τέτοιας λύσης, δεν δικαιολογείται από την τάξη μεγέθους της διαφοράς ανάμεσα στις δύο προσεγγίσεις.

Στην αρχή του αλγορίθμου ορίζονται τιμές εκκίνησης για τα j και i: η θέση του σημείου τομής εξειλιγμένης τροχοειδούς και η επόμενη αντίστοιχα στον πίνακα $katat()$. Ο έλεγχος γίνεται ως εξής:

A) Θεωρείται το ζεύγος των σημείων B και Γ και υπολογίζεται η απόσταση check από τις συντεταγμένες τους με την ακόλουθη διαδικασία:

Ορίζονται οι συντεταγμένες της τρέχουσας επανάληψης:

$$x1 = katat(j,1) \quad (5.17)$$

$$x2 = katat(i,1) \quad (5.18)$$

$$y1 = katat(j,2) \quad (5.19)$$

$$y2 = katat(i,2) \quad (5.20)$$

$$check = \sqrt{(x1 - x2)^2 + (y1 - y2)^2} \quad (5.17)$$

Όπου: j η θέση του στατικού σημείου αφητηρίας (σημείο B και για τα τρία στιγμιότυπα του σχήματος 5.11) στον πίνακα $katat()$, κάθε επανάληψης ελέγχου και

ί η θέση του δυναμικού σημείου (σημείο Γ, Δ και Ε αντίστοιχα για κάθε μια από τις τρεις επαναλήψεις του σχήματος) που μεταβάλλεται σε κάθε επανάληψη. Η μέγιστη τιμή που λαμβάνει αυτή η θέση είναι εκείνη της γραμμής του πίνακα `katat()` που έχει θεωρηθεί από προηγούμενη διαδικασία ότι περιέχει τις συντεταγμένες του κατώτατου υπολογισμένου σημείου (θέση `katat(theshz)`).

B_α) Ελέγχεται αν το `check` είναι μικρότερο ή ίσο του ορισθέντος `ofst` και αν είναι τότε αυξάνεται η τιμή του `i` κατά 1 και επανεκκινεί η επαναληπτική διαδικασία από το βήμα Α). Με αυτό τον τρόπο το σημείο θεωρείται αποδεκτό από το κριτήριο ελέγχου και ο αλγόριθμος προχωρά στην εξέταση του επόμενου σημείου (από το Γ στο Δ κ.ο.κ.).

B_β) Ελέγχεται αν το `check` είναι μεγαλύτερο του ορισθέντος `ofst` και παράλληλα αν η θέση του σημείου αφετηρίας `j` προσαυξημένη κατά 1 είναι μεγαλύτερη ή ίση με την τιμή της τρέχουσας θέσεως `i`. Το ενδεχόμενο να είναι μεγαλύτερη περιλαμβάνεται στον έλεγχο μόνο για λόγους πληρότητας αφού είναι ανέφικτο από τη φύση του αλγορίθμου. Και πάλι αυτό που ενδιαφέρει είναι αν είναι ίσες.

Η τιμή της `j` είναι στατική για όσους κύκλους χρειαστεί η διαδικασία μέχρι να εντοπίσει την επόμενη θέση που πληροί το κριτήριο ελέγχου. Αφού εντοπισθεί και κατόπιν καταγραφεί (βλ. επόμενο βήμα B_γ) η `j` παίρνει την τιμή που εντοπίστηκε και ο αλγόριθμος εκτελείται για τα `i` από το νέο σημείο και έπειτα. Αν επομένως, κατά την εξέταση του αμέσως επόμενου –από το νέο `j`– σημείου, το `check` προκύψει μεγαλύτερο του επιθυμητού, αυτό σημαίνει πως με τις δεδομένες διαμερίσεις του μήκους της κατατομής δεν υπάρχει σημείο στο οποίο πηγαίνοντας το εργαλείο να αφήσει πάχος υλικού μικρότερο ή ίσο του ορισθέντος επιθυμητού. Για αυτό το λόγο παύεται ο αλγόριθμος και εμφανίζεται μήνυμα που αναφέρει την εμφάνιση του συγκεκριμένου προβλήματος. Ο χρήστης σε τέτοια περίπτωση πρέπει να επιστρέψει στον αλγόριθμο γένεσης της γεωμετρίας και μεταβάλλοντας προς τα κάτω τη μεταβλητή `akrib` να δημιουργήσει μια κατατομή με μεγαλύτερο πλήθος σημείων.

B_γ) Ελέγχεται αν το `check` είναι μεγαλύτερο του ορισθέντος `ofst` και παράλληλα αν η θέση του σημείου αφετηρίας `j` προσαυξημένη κατά 1 είναι μικρότερη της τιμής της τρέχουσας θέσεως `i`. Σε αυτή την περίπτωση έχει μόλις ξεπεραστεί το ορισθέν όριο για το πάχος για το τρέχον σημείο με θέση `i`. Επομένως το ζητούμενο σημείο είναι αυτό που έχει θέση την αμέσως προηγούμενη. Έτσι, καταχωρείται στην τρέχουσα θέση `k` του πίνακα-στήλη `apoxros()` η τιμή της τρέχουσας θέσεως `i` μειωμένη κατά 1, δίνεται στην τιμή του σημείου αφετηρίας `j` η τιμή της τρέχουσας θέσεως `i` μειωμένη κατά 1, προσαυξάνεται η τρέχουσα θέση `k` του πίνακα-στήλη `apoxros()` κατά 1 και επανεκκινεί η επαναληπτική διαδικασία από το βήμα Α).

Με το πέρας του αλγορίθμου γίνεται ένας έλεγχος για το αν η θέση του τελευταίου σημείου που αποθηκεύτηκε στον πίνακα-στήλη `apoxros()` είναι αυτή που βρέθηκε ως η κατώτατη υπολογισμένη (η τιμή `theshz`) και εάν δεν είναι τίθεται από την εφαρμογή.

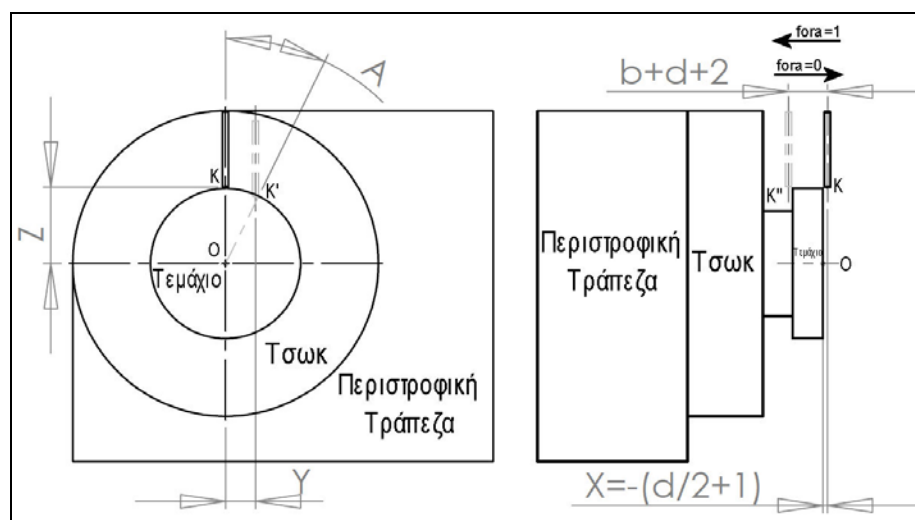
Για την περίπτωση που το κατώτατο σημείο από όπου θα διέλθει το κονδύλι, βρίσκεται πάνω από το επίπεδο που ορίζει το σημείο τομής μεταξύ καμπύλης τροχοειδούς και εξειλιγμένης, εκτελείται ο αλγόριθμος ελέγχου που εξάγει τα σημεία για το κομμάτι της εξειλιγμένης όπως περιγράφηκε παραπάνω. Η διαφορά σε αυτή

την περίπτωση είναι πως ο έλεγχος εκτελείται για όλες τις θέσεις μέχρι αυτή που ορίζει το κατώτατο σημείο διέλευσης του κονδυλιού. Η συγκεκριμένη περίπτωση δεν γίνεται να εμφανισθεί αν ο χρήστης ορίσει τη διάμετρο του κονδυλιού σύμφωνα με την υπόδειξη της ρουτίνας `gewmetria.m`. Όμως περιλήφθηκε στη ρουτίνα `ekchondrisma.m` για την περίπτωση που ο χρήστης επιθυμεί να χωρίσει τη διαδικασία του εκχονδρίσματος σε δύο στάδια (ένα με κονδύλι μεγάλης διαμέτρου και ένα με μικρής), ή για την περίπτωση που κατά την αποπεράτωση χρησιμοποιηθεί κονδύλι με ειδικές προδιαγραφές βάθους κοπής.

Αφού λοιπόν έχουν βρεθεί όλες οι θέσεις των συντεταγμένων του πίνακα `katat()` που εκπληρώνουν τα κριτήρια ελέγχου δημιουργείται ο πίνακας `tool()` που περιέχει τις συντεταγμένες μόνο των σημείων της δεξιάς κατατομής του διακένου που ορίζουν τα ύψη κοπής. Αυτό γίνεται για λόγους απλοποίησης αφού οι συντεταγμένες θα μπορούσαν να λαμβάνονται απευθείας από τον πίνακα `katat()`. Στην τελευταία γραμμή του πίνακα `tool()` αποθηκεύονται (αν δεν έχει ήδη γίνει) οι συντεταγμένες `ymin` και `zmin`.

5.3.3 Αναλυτική παρουσίαση του αλγορίθμου δημιουργίας του αρχείου κειμένου (`roughgcode.txt`) με τον κώδικα `g-code` για την εκτέλεση της κοπής εκχονδρίσματος

Πριν επεξηγηθεί το πως εξάγονται οι τροχιές εργαλείου για το εκχόνδρισμα θα πρέπει να παρουσιασθούν τα συστήματα συντεταγμένων που χρησιμοποιούνται. Στο σχήμα 5.13 φαίνεται σε πρόοψη και πλάγια όψη η περιστροφική τράπεζα με το ακατέργαστο μπλοκ υλικού και το κονδύλι εκχονδρίσματος. Το σημείο `O` αποτελεί το κύριο σύστημα συντεταγμένων ως προς το οποίο έχει αποφασιστεί να εξαχθούν όλες οι κινήσεις. Οι κινήσεις αυτές καθαυτές αφορούν το σημείο `K` (βλ. και σχήμα 5.9) που βρίσκεται επί της κάτω επίπεδης επιφάνειας του κονδυλιού εκχονδρίσματος στη θέση από την οποία διέρχεται ο άξονας περιστροφής του.



Σχήμα 5.13
Σχέδιο περιστροφικής τράπεζας και διευθύνσεις των τεσσάρων κινήσεων ως προς το κύριο σύστημα συντεταγμένων με αρχή το `O`.

Η θέση αυτή του κέντρου συντεταγμένων του εργαλείου επιβάλλει για τις διευθύνσεις `X` και `Y` να λαμβάνεται υπόψη το ήμισυ της διαμέτρου `d` του κονδυλιού εκχονδρίσματος στη δημιουργία των εντολών μετάβασης σε νέες θέσεις. Για λόγους ασφαλείας όλες οι κινήσεις που δεν είναι κοπές έχει επιλεγεί να γίνονται σε

απόσταση 1 mm από το τεμάχιο. Για αυτό, για παράδειγμα, σημειώνεται (στην πλάγια όψη) η θέση του Κ πριν το κονδύλι κόψει αξονικά, και είναι ίση με $-\left(\frac{d}{2}+1\right)$, ενώ αφού θα έχει κόψει, και πριν μεταφερθεί κατά Υ για το νέο πάσο, θα είναι $b+\frac{d}{2}+1$ δηλαδή η συνολική διαδρομή κατά Χ θα είναι $b+d+2$.

Η δημιουργία ενός αρχείου κειμένου που θα περιέχει τον κώδικα κοπής g-code έχει οριστεί σαν δεύτερη βασική λειτουργία της ρουτίνας *ekchondrisma.m*. Επειδή στη συγκεκριμένη στρατηγική το κονδύλι κατά την έννοια του Χ βρίσκεται είτε στη μια είτε στην άλλη ακραία θέση που προαναφέρθηκαν χρησιμοποιήθηκε μια μεταβλητή η *fora* (βλ. σχήμα 5.13) η οποία λειτουργεί σαν δείκτης. Όταν έχει την τιμή 1 σημαίνει πως το κονδύλι βρίσκεται στο $-\left(\frac{d}{2}+1\right)$ κατά Χ, επομένως η επόμενη

κίνηση-κοπής που θα γραφεί θα πρέπει να είναι $b+\frac{d}{2}+1$. Σε αυτή τη θέση η *fora* παίρνει τιμή 0 και επομένως ο αλγόριθμος γνωρίζει ότι το κονδύλι βρίσκεται στο άλλο άκρο. Ο αλγόριθμος (παράρτημα Κωδ.2.4) γένεσης των διαδρομών εργαλείου, αφού αρχικοποιήσει τη θέση του εργαλείου στο σημείο Κ του σχήματος 5.13 (δηλαδή 1mm πάνω και εμπρός από το τεμάχιο), σε γενικές γραμμές εκτελεί τα ακόλουθα:

Για κάθε διακριτό ύψος Ζ που αντλεί από τη δεύτερη στήλη του πίνακα *tool(j,2)* (όπου j ο δείκτης του τρέχοντος επιπέδου του διακένου) εξάγει τη διαδρομή που θα επιπεδοποιήσει την επιφάνεια του διακένου. Αυτό γίνεται μέσω μιας ενθυλακωμένης επαναληπτικής διαδικασίας η οποία εκτελεί τα ακόλουθα:

A) Διαιρείται το (κατά την έννοια των Υ) πλάτος του τρέχοντος επιπέδου με το μέγεθος της μέγιστης πλευρικής μετατόπισης *rov* και εξάγεται το υπόλοιπο της διαίρεσης. Το πλάτος προς διαίρεση, βρίσκεται αν από το διπλάσιο της κατά Υ απόστασης της κατατομής από τον άξονα συμμετρίας του διακένου (που έχει αποθηκευτεί στη θέση *tool(j,1)*), αφαιρεθεί μια διάμετρος του εργαλείου

B) Αν το υπόλοιπο της διαίρεσης είναι 0, χρησιμοποιείται η βηματική μεταβλητή *p* με τιμή εκκίνησης τιμή στη θέση $tool(j,1)-\frac{d}{2}$, βήμα *-rov* και τιμή

τερματισμού την τιμή $-tool(j,1)+\frac{d}{2}$ και γράφονται διαδοχικές κοπές (δηλαδή μεταφορές του εργαλείου στις δύο ακραίες θέσεις κατά Χ) για κάθε διακριτό *p*. Με την γραφή όλων των κοπών του επιπέδου παύεται η ένθετη επαναληπτική διαδικασία και επανεκκινεί ο αλγόριθμος για νέο ύψος Ζ.

Γ₁) Αν το υπόλοιπο της διαίρεσης είναι διάφορο του 0, χρησιμοποιείται και πάλι η βηματική μεταβλητή *p* με τιμή εκκίνησης τιμή στη θέση $tool(j,1)-\frac{d}{2}$, βήμα *-rov* αλλά η τιμή τερματισμού γίνεται πλέον $-tool(j,1)+\frac{d}{2}+\left\{tool(j,1)\cdot\upsilon\acute{\rho}\omicron\lambda\omicron\iota\pi\omicron\left[\frac{tool(j,1)}{rov}\right]\right\}$. Αυτό σημαίνει πως η ελάχιστη

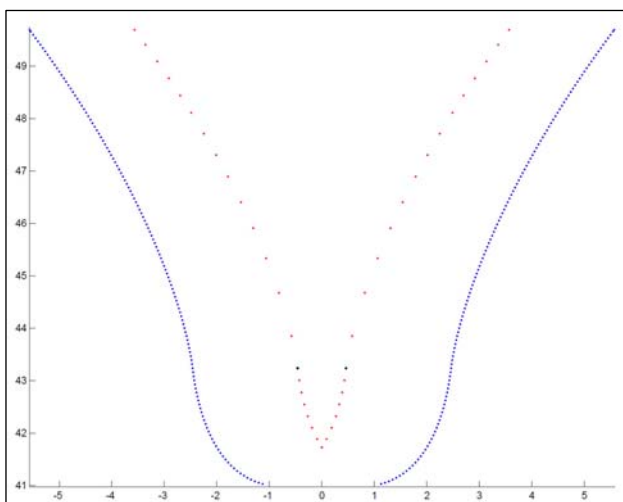
τιμή που θα λάβει η θέση Υ, θα απέχει από την αριστερή κατατομή του διακένου απόσταση ίση με το ήμισυ της διαμέτρου προσαυξημένο κατά το εναπομείναν (με την

έννοια του μη ακέραιου) κομμάτι του γον. Στη συνέχεια γράφονται διαδοχικές κοπές (δηλαδή μεταφορές του εργαλείου στις δύο ακραίες θέσεις κατά X) για κάθε διακριτό ρ.

Γ₂) Για το ύψος του προηγούμενου βήματος το εργαλείο μετατοπίζεται κατά Y στην τελική θέση $-tool(j,1) + \frac{d}{2}$ και γράφεται η κοπή που ολοκληρώνει την επιπεδοποίηση. Ύστερα, παύεται η ένθετη επαναληπτική διαδικασία και επανεκκινεί ο αλγόριθμος για νέο ύψος Z.

Όλες οι παραπάνω ενέργειες αφορούν στο εκχόνδρισμα ενός διακένου. Μετά το πέρας της διαδικασίας εγγραφής των εντολών της κοπής του ενός διακένου, εγγράφεται εντολή στροφής σε γωνία ίση με τη γωνία βήματος του τροχού προσαυξημένη κατά τη γωνία ανάμεσα στον άξονα συμμετρίας του διακένου και την ακμή στην κεφαλή του δοντιού ($fek + fk$). Αυτή η επιλογή έχει γίνει για λόγους συμβατότητας με τη στρατηγική αποπεράτωσης η οποία εκκινεί την κοπή από τη συγκεκριμένη ακμή και θεωρεί πως η γωνία της τράπεζας είναι ίση με 0 σε αυτή τη θέση. Στη συνέχεια επανεκκινεί ο αλγόριθμος για το νέο διάκενο.

Στο σχήμα 5.14 φαίνεται η κατατομή του διακένου (με μπλε χρώμα) και τα ακραία κατά Y σημεία κάθε επιπέδου στα οποία θα φτάσει το σημείο K του εργαλείου κατά την επιπεδοποίηση κάθε ύψους. Με μαύρο χρώμα σημειώνεται το επίπεδο που βρίσκεται το σημείο τομής του τροχοειδούς με την εξειλιγμένη. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός της πύκνωσης των επιπέδων από το σημείο αυτό και κάτω καθώς η καμπύλη στρέφει τα κοίλα άνω και μεταβάλλεται ο έλεγχος που εκτελείται για την επιλογή των σημείων.



Σχήμα 5.14

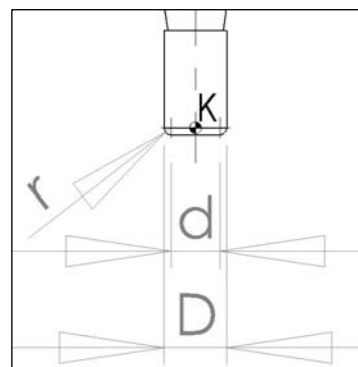
Διάκενο μεταξύ δύο δοντιών και σημεία από τα οποία θα διέλθει το κονδύλι κατά το εκχόνδρισμα.

5.4 Ρουτίνα δημιουργίας και εξαγωγής του κώδικα g-code του σταδίου αποπεράτωσης (apoperatwsh.m)

5.4.1 Δομή της ρουτίνας apoperatwsh.m

Η στρατηγική της αποπεράτωσης προβλέπει το πέραςμα του εργαλείου από όλα τα σημεία της κατατομής των κύκλων ποδός και κεφαλής πράγμα που επιτυγχάνεται με παράλληλη περιστροφή του τεμαχίου σε συνδυασμό με την κατάλληλη τοποθέτηση του κονδυλιού στο επίπεδο της κοπής. Αρκεί επομένως η εξαγωγή του g-code για μια τομή του τροχού παράλληλη στο επίπεδο ZY και από εκεί και έπειτα η χρήση μιας επαναληπτικής διαδικασίας για την εγγραφή αυτής της κοπής για κάθε διακριτό πλάτος X του τροχού.

Προκειμένου να εξαχθεί ο g-code για μια τομή του τροχού θα πρέπει να είναι γνωστή η θέση που θα έχει το κέντρο του συστήματος συντεταγμένων K του εργαλείου του σχήματος 5.15 σε σχέση με το κύριο σύστημα συντεταγμένων O (βλ. σχήμα 5.13). Θα πρέπει επομένως πρώτα να βρεθεί η θέση του κέντρου της ακτίνας καμπυλότητας r σε σχέση με το τεμάχιο και κατόπιν να μεταφερθεί (ανάλογα με το ποια μεριά του κονδυλιού κόβει) κατά την έννοια των Y απόσταση ίση με τη δευτερεύουσα ακτίνα του κονδυλιού.



Σχήμα 5.15

Σύστημα συντεταγμένων κονδυλιού αποπεράτωσης και χαρακτηριστικές διαστάσεις του.

Κατά τη δημιουργία του αλγορίθμου επιλέχθηκε το σημείο της κατατομής που κόβεται να κείται επί του κατακόρυφου άξονα του κυρίου συστήματος συντεταγμένων με κέντρο το O. Αυτή η επιλογή έγινε γιατί απλοποιούσε σχετικά τις σχέσεις που αφορούν τη θέση του προς κοπή σημείου δεδομένου ότι η γωνία που σχηματίζει με τον κατακόρυφο άξονα είναι 0.

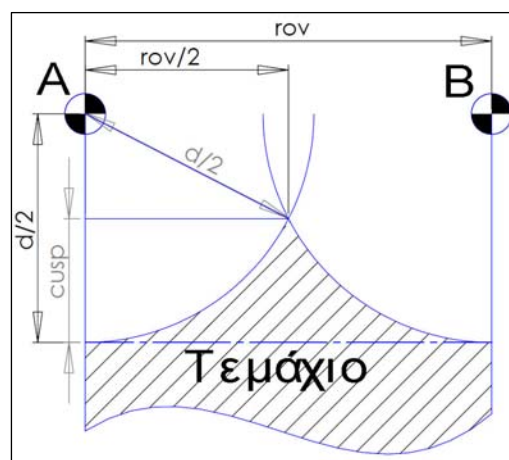
Με την εκκίνηση της ρουτίνας ο χρήστης καλείται να θέσει τις τιμές των χαρακτηριστικών διαστάσεων του κονδυλιού που επισημαίνονται στο σχήμα 5.15. Δηλαδή την κύρια διάμετρο D και την ακτίνα καμπυλότητας r. Η δευτερεύουσα διάμετρος d προκύπτει από τη σχέση:

$$d(mm) = D - 2 \cdot r \quad (5.18)$$

Στη συνέχεια ορίζει όπως και στη ρουτίνα ekchondrisma.m το μέγεθος της επικάλυψης του ενός πάσου από το επόμενο σαν ποσοστό της κυρίας διαμέτρου D του κονδυλιού με την τιμή της μεταβλητής over. Επομένως, από πάσο σε πάσο η παράλληλη μετατόπιση του άξονα περιστροφής του κονδυλιού θα δίνεται και πάλι από τη σχέση (5.12). Η σημαντικότερη διαφορά σε σχέση με την περίπτωση του εκχονδρίσματος είναι πως κατά την αποπεράτωση το κονδύλι δεν κόβει μόνο με τις κάτω ακμές του (περίπτωση που περιορίζεται στα τμήματα των κύκλων ποδός και κεφαλής) αλλά και με τις πλευρικές και κυρίως με τις καμπύλες ακμές του (στα τμήματα εξειλιγμένης και τροχοειδούς).

Σε αυτή την τελευταία περίπτωση το κονδύλι κόβει με τις πλευρικές ακμές του και η διεύθυνση της κοπής βρίσκεται πάνω στο ευθύγραμμο τμήμα που δημιουργείται από το σημείο που κόβεται και το σημείο τομής του άξονα περιστροφής του κονδυλιού με την επιφάνεια του τεμαχίου. Σε αυτή την περίπτωση το ίχνος της κοπής έχει το σχήμα μιας πολύ μικρής περιοχής γύρω από το σημείο επαφής της ακμής του κονδυλιού με το τεμάχιο. Έχει γίνει η παραδοχή πως αυτό το ίχνος είναι τόσο μικρό που ταυτίζεται με το σημείο επαφής.

Όταν το κονδύλι κόβει με το καμπύλο τμήμα του η ακτίνα του μεταβάλλεται ανάλογα με την κλίση της υπό κατεργασία επιφάνειας. Καθώς πλησιάζει το



Σχήμα 5.16

Κάτοψη του εναπομένοντος υλικού στην ένωση κύκλου ποδός με τροχοειδές κατά την αποπεράτωση.

σημείο πέρατος της καμπύλης του τροχοειδούς και την αρχή της επιφάνειας του κύκλου ποδός υπάρχει ένα τουλάχιστον σημείο (σημείο A σχήματος 5.16) στο οποίο το κονδύλι χρησιμοποιεί το κατώτατο σημείο του καμπύλου τμήματός του (σημείο γ σχήμα 5.7) με διάμετρο ίση με τη δευτερεύουσα διάμετρο d . Όταν το κονδύλι διέλθει και πάλι από το συγκεκριμένο σημείο, αλλά μετατοπισμένο κατά την έννοια του πλάτους του τροχού σε απόσταση ίση με το βήμα (κατά X) γον (σημείο B του σχήματος 5.16), για να αποπερατώσει την επόμενη τομή του τροχού, τότε ανάμεσα στα δύο αυτά σημεία θα έχει απομείνει μια προεξοχή υλικού.

Το ύψος αυτής της προεξοχής (*cuspr*) φαίνεται στην κάτοψη δύο διαδοχικών κοπών που παρουσιάζεται στο σχήμα 5.16. Τα σημεία A και B αποτελούν τις θέσεις του άξονα περιστροφής του κονδυλιού για δύο διαδοχικά πάσα. Αυτή αποτελεί και τη δυσμενέστερη των περιπτώσεων από άποψη αποδιδόμενης επιφάνειας αφού για την ίδια απόσταση γον επιλέγεται η μικρότερη δυνατή ακτίνα $\frac{d}{2}$. Το θετικό στοιχείο είναι

πως αυτή η περίπτωση εμφανίζεται μόνο στην ένωση του τροχοειδούς με τον κύκλο ποδός, δηλαδή σε σημείο που δεν αποτελεί μέρος της εργαζόμενης κατατομής. Το ύψος του εναπομένοντος υλικού *cuspr* είναι σχετικά εύκολο να υπολογιστεί με χρήση απλής τριγωνομετρίας. Δίνεται δε από την ακόλουθη σχέση:

$$cuspr(mm) = \frac{d}{2} - \sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 - \left(\frac{rov}{2}\right)^2} \quad (5.19)$$

Επειδή αυτό το ύψος είναι ενδεικτικό της επιφάνειας που θα απομείνει με το πέρας της κατεργασίας η χρήστης όταν εκτελέσει τη ρουτίνα ειδοποιείται από σχετικό μήνυμα για το μέγεθος αυτής της ποσότητας έτσι ώστε αν θέλει να μεταβάλλει τη μεταβλητή *over*. Δεδομένου ότι μια καλή τιμή τραχύτητας για μια επιφάνεια που έχει υποστεί αποπεράτωση κυμαίνεται στο 1 μm τιμές μέχρι και τα 3 μm θεωρούνται αποδεκτές.

Όπως και με τη ρουτίνα του εκχονδρίσματος από αυτό το σημείο και έπειτα εισάγονται, όπως προαναφέρθηκε, τα επτά κύρια κατασκευαστικά μεγέθη του τροχού και υπολογίζονται τα δεδομένα 9 έως και 25 της ενότητας 5.2.1 με τον τρόπο που προαναφέρθηκε. Πλέον ο αλγόριθμος διαθέτει όλες τις παραμέτρους που απαιτούνται για την εκτέλεσή του.

5.4.2 Αναλυτική παρουσίαση του αλγορίθμου εύρεσης των συντεταγμένων των εκάστοτε θέσεων κονδυλιού – τεμαχίου κατά την αποπεράτωση

Μετά την εκτέλεση της ρουτίνας *gewmetria.m*, ο αλγόριθμος εξαγωγής του *g-code* για την αποπεράτωση “έχει στη διάθεσή του” τον πίνακα *katat()* με όλα τα σημεία της δεξιάς κατατομής του διακένου των δοντιών όταν ο άξονας των τεταγμένων ταυτίζεται με τον άξονα συμμετρίας του διακένου. Από τις συντεταγμένες του κάθε σημείου μπορεί εύκολα να βρεθεί η γωνία που σχηματίζει ο άξονας συμμετρίας του διακένου με το ευθύγραμμο τμήμα που συνδέει τον άξονα περιστροφής του τροχού-τράπεζας με το εκάστοτε σημείο της κατατομής.

Έστω λοιπόν το σημείο της κατατομής A' του σχήματος 5.17 με συντεταγμένες (*katat(i,1),katat(i,2)*) όπου *i* η τρέχουσα γραμμή του πίνακα *katat*. Η γωνία που σχηματίζει το OA' με τον κατακόρυφο άξονα εξάγεται από τον αλγόριθμο

(βλ. παράρτημα Κωδ.3.2) μέσω της ακόλουθης σχέσης και αποθηκεύεται στον πίνακα με τις κλίσεις των σημείων της δεξιάς κατατομής $katcor()$:

$$katcor(i)(rad) = \tan^{-1}\left(\frac{A'x}{A'y}\right) = \tan^{-1}\left[\frac{katat(i,1)}{katat(i,2)}\right] \quad (5.20)$$

Το αμέσως επόμενο σημείο της κατατομής B' θα έχει συντεταγμένες $(katat(i+1,1), katat(i+1,2))$ και κλίση $katcor(i+1)$. Η θέση κοπής προϋποθέτει να διέρχεται από το προς κοπή σημείο η κατακόρυφος του σχήματος 5.17. Για να “έρθει” επομένως το σημείο A' στη θέση A για να κοπεί σύμφωνα με τα όσα έχουν σημειωθεί προηγουμένως, θα πρέπει να στραφεί αριστερόστροφα κατά γωνία $katcor(i)$. Αντίστοιχα και το επόμενο σημείο B' θα στραφεί αριστερόστροφα κατά την ίδια γωνία $katcor(i)$ για να έρθει στη θέση B . Σε αυτές τις θέσεις A και B οι νέες συντεταγμένες των σημείων θα δίνονται από τις σχέσεις:

$$x1(mm) = katat(i,1) \cdot \cos[katcor(i)] - katat(i,2) \cdot \sin[katcor(i)] \quad (5.21)$$

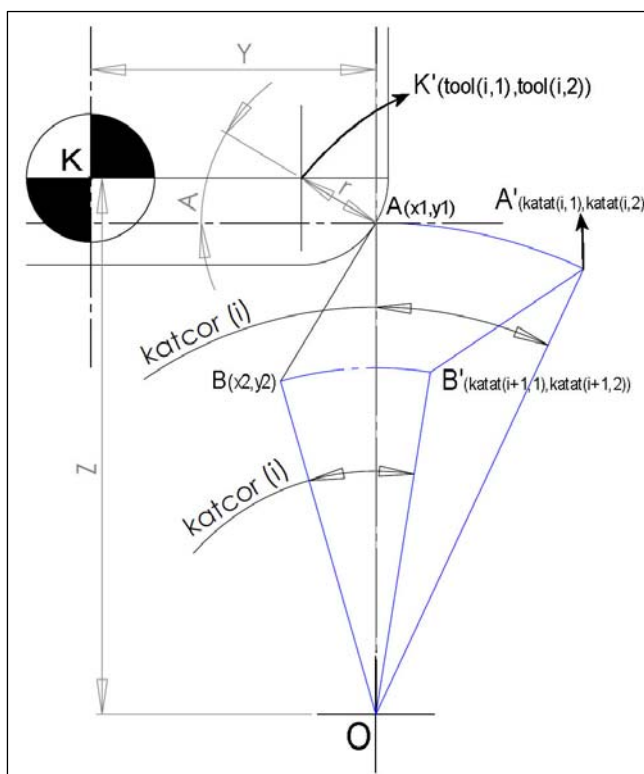
$$x2(mm) = katat(i+1,1) \cdot \cos[katcor(i)] - katat(i+1,2) \cdot \sin[katcor(i)] \quad (5.22)$$

$$y1(mm) = katat(i,1) \cdot \sin[katcor(i)] + katat(i,2) \cdot \cos[katcor(i)] \quad (5.23)$$

$$y2(mm) = katat(i+1,1) \cdot \sin[katcor(i)] + katat(i+1,2) \cdot \cos[katcor(i)] \quad (5.24)$$

Για τη συγκεκριμένη ρουτίνα έχει γίνει η παραδοχή πως η κλίση της επιφάνειας στο σημείο A ταυτίζεται με την κλίση του ευθυγράμμου τμήματος AB . Αντίστοιχα η κλίση της επιφάνειας στο σημείο B θα ταυτίζεται με την κλίση του ευθυγράμμου τμήματος με αρχή το B και πέρας το επόμενο υπολογισμένο σημείο της κατατομής. Δεδομένης της απόστασης που έχουν τα σημεία (η οποία για μια όχι και τόσο ακριβή κατατομή περιορίζεται στα 40 – 70 μm) θεωρήθηκε πως η συγκεκριμένη παραδοχή δεν βλάπτει το τελικό αποτέλεσμα.

Στο σχήμα 5.17 εμφανίζεται η κάτω δεξιά κατατομή του κονδυλιού αποπεράτωσης στη θέση που θα έχει τη στιγμή που θα κόβει το σημείο A της κατατομής (το A ανήκει στη δεξιά κατατομή του διακένου των δοντιών). Με το γράμμα K' σημειώνεται η θέση του κέντρου τις ακτίνας καμπυλότητας του καμπύλου τμήματος του κονδυλιού αποπεράτωσης. Στόχος του αλγορίθμου –που παρουσιάζεται στο παράρτημα Κωδ.3.2– είναι η εύρεση των συντεταγμένων που λαμβάνει



Σχήμα 5.17

Συντεταγμένες της κατατομής και του κονδυλιού κατά τη διαδικασία αποπεράτωσης του σημείου A .

αυτή η θέση, και η αποθήκευσή τους στις θέσεις $tool(i,1)$ και $tool(i,2)$, για κάθε σημείο i της κατατομής αφού έχει περιστραφεί έτσι ώστε να βρίσκεται σε θέση κοπής. Από τον πίνακά $tool()$ στη συνέχεια μπορεί να εξαχθεί ο g-code για την κοπή της κατατομής (και της συμμετρικής της) απλά ανάγοντας τις συντεταγμένες στο κέντρο του συστήματος συντεταγμένων του εργαλείου K .

Για την εύρεση της κλίσης στο σημείο A και κατά συνέπεια και η γωνία A που σημειώνεται στο σχήμα 5.17 χρησιμοποιείται η σχέση:

$$A(rad) = \frac{\pi}{2} - \tan^{-1}\left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}\right) \quad (5.25)$$

Στην περίπτωση που κατά την περιστροφή προκύψει $x_1=x_2$ η A παίρνει την τιμή 0. Αφού έχει βρεθεί η A ο υπολογισμός των συντεταγμένων του K' προκύπτει εύκολα από τις τριγωνομετρικές σχέσεις:

$$tool(i,1) = x_1 - r \cdot \cos(A) \quad (5.26)$$

$$tool(i,2) = y_1 + r \cdot \sin(A) \quad (5.27)$$

5.4.3 Αναλυτική παρουσίαση του αλγορίθμου δημιουργίας του αρχείου κειμένου (finishgcode.txt) με τον κώδικα g-code για την εκτέλεση της κοπής αποπεράτωσης

Στο παράρτημα Κωδ.3.3 παρουσιάζεται ο αλγόριθμος συμπλήρωσης δύο πινάκων των: $tool1()$ και $tool2()$. Ο πρώτος περιέχει τις εκάστοτε συντεταγμένες Y και Z του κονδυλιού και την εκάστοτε γωνία στροφής της τράπεζας για την κοπή όλων των σημείων της δεξιάς κατατομής του πρώτου διακένου του τροχού. Ο $tool2()$ περιέχει ακριβώς τα ίδια στοιχεία για τη συμμετρική της αριστερή κατατομή του πρώτου διακένου.

Στην πρώτη στήλη του $tool1()$ συμπληρώνεται αυτούσια η τιμή του ύψους του σημείου K' (που είναι η τιμή του $tool(i,2)$) και άρα και του K που θα αποτελέσει την τιμή του Z (βλ. σχήμα 5.17) κατά τη γραφή του g-code. Αντίστοιχα, στην τρίτη στήλη του $tool1()$ συμπληρώνεται η τιμή της οριζόντιας απόστασης του K από το σημείο τομής, που είναι ίση με την απόσταση του K' από το σημείο τομής (που είναι η απόλυτη τιμή του $tool(i,1)$) προσαυξημένη κατά το ήμισυ της δευτερεύουσας διαμέτρου d , και θα αποτελέσει την τιμή του Y (βλ. σχήμα 5.17) κατά τη γραφή του g-code. Τέλος στη δεύτερη στήλη του $tool1()$ συμπληρώνεται η τιμή της γωνίας κατά την οποία θα πρέπει να έχει στραφεί το τεμάχιο έτσι ώστε να βρίσκεται σε θέση για να κοπεί το σημείο για το οποίο έχουν εξαχθεί οι άλλες δύο συντεταγμένες. Για να βρεθεί η γωνία στροφής αρκεί να αφαιρεθεί από τη γωνία στην οποία βρίσκεται η ακμή στην κεφαλή της δεξιάς κατατομής η γωνία που σχηματίζει το υπόψη σημείο με τον άξονα συμμετρίας του διακένου.

Ο πίνακας $tool2()$ συμπληρώνεται με ανάποδη φορά από την τελευταία του γραμμή προς την πρώτη έτσι ώστε οι πρώτες γραμμές να αφορούν την κοπή του τροχοειδούς και οι τελευταίες το τελείωμα της εξειλιγμένης στον κύκλο κεφαλής. Η πρώτη στήλη του $tool2()$ περιέχει τις τιμές των αντίστοιχων θέσεων της πρώτης στήλης του $tool1()$. Η τρίτη στήλη περιέχει τις αντίθετες (ελέω συμμετρίας) τιμές των αντίστοιχων θέσεων της τρίτης στήλης του $tool1()$. Στη δεύτερη στήλη του $tool2()$ συμπληρώνεται η γωνία που προκύπτει αν από τη συνολική γωνία, που διαγράφεται

από τη δεξιά μέχρι την αριστερή ακμή στις αντίκρου κεφαλές του διακένου, αφαιρεθεί η τιμή της γωνίας εργασίας της αντίστοιχης θέσης της δεύτερης στήλης του tool1().

Για τον κύκλο ποδός, και προκειμένου να εξασφαλισθεί η μέσα σε στενά όρια ταυτόχρονη περιστροφή της τράπεζας με την παράλληλη κατά Υ μετατόπιση του κονδυλιού επιστρατεύθηκε η ικανότητα προς κοπή με χρήση γραμμικής παρεμβολής από τη μηχανή. Αυτό σημαίνει πως από την κατώτατη θέση που ορίζει ο πίνακας tool1() το κονδύλι μεταφέρεται -ενώ παράλληλα στρέφεται ο τροχός- στην πρώτη θέση του πίνακα tool2() με ταχύτητα κοπής και τις δύο κινήσεις (μεταφορά και περιστροφή) να εκκινούν και να παύονται τις ίδιες χρονικές στιγμές.

Η λογική δημιουργίας αυτών των δύο πινάκων ήταν, οι συντεταγμένες που αφορούν την κοπή ενός διακένου, να υπολογιστούν μια φορά και από εκεί και έπειτα να αντλούνται από αυτούς -από τον αλγόριθμο γένεσης του g-code- κατά τη γραφή του κώδικα κοπής για κάθε διάκενο. Με αυτό τον τρόπο μειώνεται σημαντικά το πλήθος των υπολογισμών που εκτελεί η εφαρμογή και αντικαθίσταται απλώς με αναγνώσεις εγγραφών.

Στο παράρτημα Κωδ.2.4 παρουσιάζεται ο αλγόριθμος δημιουργίας και γραφής του g-code στο αρχείο κειμένου finishgcode.m. Ο αλγόριθμος αποτελείται από δύο επαναληπτικές διαδικασίες που εγγράφουν τον κώδικα κοπής για τη δεξιά κατατομή και την αριστερή κατατομή αντίστοιχα αντλώντας δεδομένα από τους δύο πίνακες και προσαρμόζοντας την περιστροφή που είναι αθροιστικό μέγεθος για το εκάστοτε διάκενο. Η πρώτη επαναληπτική διαδικασία ορίζει στο κονδύλι να έρθει στην εκάστοτε θέση (του επιπέδου YZ) ενώ παράλληλα συγχρονίζει την περιστροφή του τροχού και με αυτό τον τρόπο κόβονται τα σημεία της δεξιάς κατατομής από τον κύκλο κεφαλής προς τον κύκλο ποδός.

Στη συνέχεια το κονδύλι έρχεται στη θέση που ορίζει το τελευταίο σημείο κοπής του κύκλου ποδός (και πρώτο της αριστερής κατατομής) έχοντας διαμορφώσει τον κύκλο ποδός. Ακολούθως ανυψώνεται κατακόρυφα και μόλις φτάσει σε ακτινική απόσταση ίση με την ακτίνα κεφαλής ο τροχός περιστρέφεται έτσι ώστε να έρθει η κορυφή της αριστερής κατατομής στα αριστερά του κονδυλιού. Κατόπιν μέσω της επαναληπτικής διαδικασίας (με αρνητικό βήμα) κόβεται και η αριστερή κατατομή του διακένου. Με το πέρας των δύο διαδικασιών, το κονδύλι ανυψώνεται και πάλι κατακόρυφα μέχρι την ακτίνα κεφαλής και εγγράφεται μια κίνηση περιστροφής του τεμαχίου μέχρι τη γωνία όπου θα έχει περάσει από κάτω του η κεφαλή του αριστερού δοντιού. Σε αυτή την κίνηση το κονδύλι διατηρείται σε ύψος Z τέτοιο ώστε να επιτυγχάνει επιπεδοποίηση του κύκλου κεφαλής.

Όλη η παραπάνω διαδικασία αφορά στην πλήρη αποπεράτωση ενός διακένου και του τομέα κεφαλής ενός δοντιού. Αυτός είναι και ο λόγος που έχει ενθουλακωθεί σε μια ευρύτερη επαναληπτική διαδικασία η οποία την επαναλαμβάνει για πλήθος φορών ίσο με τον αριθμό των δοντιών προσαρμόζοντας τις γωνίες που εγγράφονται. Επομένως με το πέρας και αυτής της διαδικασίας έχει αποπερατωθεί μια περίμετρος μικρού πλάτους όλου του τροχού. Για να επεκταθεί η αποπεράτωση σε όλο το πλάτος του τροχού όλα τα παραπάνω ενθουλακώνονται σε μια τελευταία ευρύτερη επαναληπτική διαδικασία, η οποία μεταβάλλει κάθε φορά την τιμή του X (επίσης αθροιστικό μέγεθος), για το οποίο θα γίνει η κοπή αποπεράτωσης της περιμέτρου του τροχού.

5.5 Συμπεράσματα

Η εμπλοκή με τη δημιουργία ενός κώδικα που θα εξάγει σαν αποτέλεσμα κώδικα αποτέλεσε σχετικά επίπονη διαδικασία. Ο κύριος λόγος ήταν η αδυναμία ελέγχου της ορθότητας των αποτελεσμάτων. Μπορεί η πρόσβαση στον εξαγόμενο κώδικα να δίνει τη δυνατότητα ελέγχου όμως όταν πρόκειται για πλήρη έλεγχο σε αρχεία εκατοντάδων χιλιάδων εγγραφών ο πλήρης έλεγχος γίνεται αδύνατος. Αυτός είναι και ο λόγος που η επιτυχία της εφαρμογής κρίνεται ουσιαστικά από τη διαδικασία της κοπής η οποία δεν συγχωρεί και την ύπαρξη σφαλμάτων.

Κατά τη δημιουργία των αλγορίθμων οι λύσεις που δόθηκαν προσπαθήθηκε να είναι οι απλούστερες δυνατές ακόμη και σε βάρος του χρόνου κατεργασίας. Με αυτό τον τρόπο διευκολύνθηκε ο έλεγχος των αποτελεσμάτων και ολοκληρώθηκε η εφαρμογή έγκαιρα για να αποδειχθεί η ορθή λειτουργία της από την κοπή. Επίσης είναι πιο εύκολο για τον χρήστη να αντιληφθεί τι διεργασίες εκτελούνται και αν θέλει να παρέμβει κιάλας. Αυτό σημαίνει πως υπάρχει χώρος για βελτιώσεις σε ένα πλαίσιο το οποίο όμως καταρχήν δουλεύει ορθά.

Το κύριο πρόβλημα που αντιμετωπίστηκε ήταν η σύλληψη των κινήσεων που απαρτίζουν την κοπή στο χώρο και ο συνδυασμός των συντεταγμένων τεμαχίου, εργαλείου και μηχανής χωρίς δυνατότητα οπτικοποίησης. Κλείνοντας πρέπει να επισημανθεί πως όσο επέτρεπαν οι συνθήκες έγινε προσπάθεια οι αλγόριθμοι εξαγωγής του κώδικα κοπής να είναι ανεξάρτητοι των στοιχείων που αποτελούν την πηγαία κατατομή. Με αυτό τον τρόπο προσπαθήθηκε οι αλγόριθμοι εξαγωγής g-code να μπορούν να λειτουργήσουν και για κατατομές με τροχοειδή διαφορετικής γεωμετρίας αρκεί να επισημαίνεται το σημείο τομής με την εξειλιγμένη. Αυτό έγινε γιατί έχουν εμφανιστεί γεωμετρίες τροχοειδών με αυξημένες ικανότητες αντοχής σε φόρτιση. Έτσι δεδομένου ότι η κατατομή στο κομμάτι της εξειλιγμένης δεν αναμένεται να υποστεί αλλαγές στο άμεσο μέλλον, οι τροχοί δύναται να βελτιωθούν αποκτώντας τροχοειδές διαφορετικής γεωμετρίας.

Η επιλογή αυτή χαρίζει στο όλο δημιούργημα επιπλέον ευελιξία καθώς γίνεται πιθανές γεωμετρίες να δοκιμασθούν χωρίς τη δημιουργία άλλων στρατηγικών ή εφαρμογών. Επίσης, η παρούσα εφαρμογή χαρίζει στο χρήστη τη δυνατότητα να δημιουργήσει οποιοδήποτε οδοντωτό τροχό με όσο εξεζητημένη γεωμετρία κοπτικού κανόνα επιθυμεί με κόστος μόνο αυτό των κονδυλίων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ ΠΟΥ ΕΛΑΒΑΝ ΧΩΡΑ ΣΤΑ ΠΛΑΙΣΙΑ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

6.1 Εισαγωγή

Όπως επισημάνθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο στα πλαίσια εκπόνησης της παρούσας εργασίας απαιτήθηκε η εγκατάσταση και λειτουργία μιας περιστρεφόμενης τράπεζας στο κέντρο κατεργασιών του εργοστασίου του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών. Για την συγκεκριμένη τράπεζα κατασκευάστηκε μια κυλινδρική πλάκα (η χρήση της εξηγείται παρακάτω) στο εργαστήριο του τομέα. Η διαδικασία και το φασεολόγιο δημιουργίας της συγκεκριμένης πλάκας παρουσιάζεται στο παρόν κεφάλαιο.

Πλέον της συγκεκριμένης κατασκευής στα πλαίσια της τεκμηρίωσης της ορθότητας του εξαγόμενου κώδικα g-code αποφασίστηκε η κοπή ενός οδοντωτού τροχού στο κέντρο κατεργασιών. Για αυτή την κοπή ακολουθήθηκε η διαδικασία των δύο σταδίων (εκχόνδρισμα και αποπεράτωση) όπως προβλέπεται από τη στρατηγική κοπής. Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται οι παράμετροι κοπής και τα κονδύλια που χρησιμοποιήθηκαν. Επίσης γίνεται ένας σχολιασμός του τελικού αποτελέσματος.

6.2 Κατεργασία πλάκας τσωκ

Για τη σωστή τοποθέτηση και σύνδεση της τράπεζας ακολουθήθηκαν όλες οι προβλεπόμενες από την κατασκευάστρια Tsudakoma οδηγίες. Η τράπεζα όμως δεν διέθετε κάποιο εξάρτημα πρόσδεσης τεμαχίων στην άτρακτό της. Για αυτό το λόγο μετά από σχετική έρευνα που διεξήχθη αποφασίστηκε η αγορά και τοποθέτηση ενός τσωκ.

Το τσωκ προτιμήθηκε από τη λύση της πλάκας πρόσδεσης αφού επιτυγχάνει το κεντράρισμα του τεμαχίου χωρίς την εκτέλεση επιπλέον διαδικασιών παρά μόνο με το σφίξιμο. Η λύση που παρείχε η κατασκευάστρια εταιρεία δεν γινόταν να εφαρμοστεί καθώς ο χρόνος παράδοσης των προϊόντων από την Ιαπωνία υπερέβαινε κατά πολύ τα χρονικά περιθώρια για την εκπόνηση της εργασίας. Πάνω σε αυτή τη βάση και μετά και από παρότρυνση της κατασκευάστριας εταιρείας προκρίθηκε η λύση της αγοράς ενός αστάλινου τσωκ ακριβείας της τσέχικης εταιρείας TOS.

Επειδή όμως οι οπές πρόσδεσης πάνω στην άτρακτο της συσκευής περιστρεφόμενης τράπεζας είχαν εντελώς διαφορετική τοπολογία από τις οπές για τη συγκράτηση του τσωκ έπρεπε να παρεμβληθεί μια ενδιάμεση πλάκα η οποία θα προσαρμοζόταν με κοχλίες στην άτρακτο της τράπεζας και επάνω της θα μπορούσε να προσδεθεί το τσωκ με τη δημιουργία κατάλληλα διαμορφωμένων οπών πρόσδεσης. Η επιθυμητή μορφή που θα έπρεπε να έχει η πλάκα αποτυπώνεται στο σχέδιο Σ.1 του παραρτήματος όπου φαίνονται και οι κατασκευαστικές διαστάσεις της.

Το σχέδιο δημιουργήθηκε μετά από προσεκτική μελέτη των απαιτούμενων διαστάσεων που θα έπρεπε να επιδιωχθούν έτσι ώστε όχι μόνο να συνδεθεί το τσωκ με την πλάκα αλλά να επιτευχθεί και η ζητούμενη συναρμογή ακριβείας.

Οποιαδήποτε απόκλιση στον υπολογισμό αυτών θα είχε σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας πλάκας με μειωμένη ακρίβεια.

Σαν πρώτη ύλη χρησιμοποιήθηκε χυτοσίδηρος GG30 λόγω της αυξημένης στιβαρότητας που παρουσιάζει σε συνδυασμό με την ικανότητά του προς απόσβεση υψίσυχνων κραδασμών. Το προς κατεργασία κομμάτι προήλθε από κυλινδρική ράβδο διαμέτρου 210 mm και μάλιστα από το τελείωμα της ράβδου όπως κόπηκε στο χυτήριο. Αυτό εξηγεί και το ανώμαλο σχήμα που παρουσιάζει στη φωτογραφία 6.1. Προκειμένου η πλάκα να αποκτήσει το ζητούμενο σχήμα δέχθηκε κατεργασία στον τόρνο, το κατακόρυφο δράπανο και τη φρέζα του εργαστηρίου. Τα στάδια της κατεργασίας που ακολουθήθηκαν προκειμένου να αποδοθεί το επιθυμητό σχήμα στο κομμάτι είναι τα ακόλουθα (σε παρένθεση επισημαίνεται η αντίστοιχη φωτογραφία που βρίσκεται στο παράρτημα):



Φωτογραφία 6.1
Ακατέργαστο αρχικό κομμάτι
χυτοσιδήρου.

- 1) Μετωπική τόννευση και επιπεδοποίηση των δύο επίπεδων επιφανειών (φωτ.6.1).
- 2) Περιφερειακή τόννευση για μείωση της εξωτερικής διαμέτρου σε επίπεδο +1.5mm της τελικής (φωτ.6.2).
- 3) Άνοιγμα κεντρικής οπής Φ35 mm (φωτ.6.3).
- 4) Εσωτερική τόννευση για τη δημιουργία της κωνικότητας στην είσοδο της οπής πάνω στην οποία θα “πατήσει” η περιστρεφόμενη πόντα στην επόμενη φάση (φωτ.6.4).
- 5) Συγκράτηση με χρήση αποκλειστικά της περιστρεφόμενης πόντας και μείωση της εξωτερικής διαμέτρου στα τελικά 200 mm (φωτ.6.5).
- 6) Εσωτερική τόννευση μέχρι την τελική διάμετρο της διαμπερούς οπής των 50mm (φωτ.6.6).
- 7) Εσωτερική τόννευση δημιουργίας ποκέτας οδήγησης της πλάκας επί της ατράκτου της συσκευής περιστρεφόμενης τράπεζας. Η διάμετρος της ποκέτας έφτασε τα 100,015 mm (φωτ.6.7).
- 8) Αποπεράτωση της κυλινδρικής επιφάνειας με χρήση σμυριδόχαρτων μειούμενου μεγέθους κόκκου μέχρι την επίτευξη οριακά ελεύθερης συναρμογής με την άτρακτο τελική διάμετρος 100,01 mm (φωτ.6.8).
- 9) Μετωπική τόννευση δημιουργίας της κλιμακωτής διαμόρφωσης της πλευράς της πλάκας στην όψη που προσδένεται το τσωκ. Η διαμόρφωση χρησιμοποιείται ως οδήγηση για το τσωκ. Η κοπή έγινε με κονδύλι μέχρι τη διάμετρο των 159,97 mm (φωτ.6.9).
- 10) Αποπεράτωση του οδηγού του τσωκ με χρήση σμυριδόχαρτων μειούμενου μεγέθους κόκκου μέχρι την επίτευξη οριακά ελεύθερης συναρμογής με το τσωκ. Τελική διάμετρος 160.04 mm (φωτ.6.10).
- 11) Σημάδεμα των τεσσάρων οπών για τους κοχλίες πρόσδεσης στην άτρακτο της τράπεζας. Η εργασία έγινε στο φρεζοδράπανο του εργαστηρίου (φωτ.6.11).

12) Διάτρηση των προαναφερθέντων οπών $\Phi 10,5$ mm στο κατακόρυφο δράπανο (φωτ.6.12).

13) Κοπή κυλινδρικών εσοχών των κεφαλών των κοχλιών που θα σφίξουν την πλάκα πάνω στην άτρακτο της συσκευής περιστρεφόμενης τράπεζας. Το κονδύλι έχει διάμετρο $\Phi 17$ mm (φωτ.6.13).

14) Διάτρηση των τριών οπών $\Phi 8,5$ mm πρόσδεσης του τσωκ πάνω στην πλάκα (φωτ.6.14).

15) Σπειροτόμηση των παραπάνω οπών με οδήγηση από το κατακόρυφο δράπανο (φωτ.6.15).

Η όλη κατασκευή διήρκεσε τρεις ημέρες και το αποτέλεσμα κρίθηκε απολύτως ικανοποιητικό καθόσον σε μετρήσεις επιπεδότητας και εκκεντρότητας που έλαβαν χώρα εντός του εργαστηρίου οι επιφάνειες επαφής και οδήγησης αντίστοιχα βρέθηκαν να εμφανίζουν συνολική απόκλιση της τάξης των 5 – 9 μm . Στις φωτογραφίες 6.2 και 6.3 φαίνεται η πλάκα μετά το πέρας των κατεργασιών καθώς επίσης και τοποθετημένη επί της συσκευής περιστροφικής τράπεζας.



Φωτογραφία 6.3
Πλάκα τσωκ επί της συσκευής.

Φωτογραφία 6.2
Αποπερατωμένη πλάκα τσωκ.

6.3 Κατεργασία οδοντωτού τροχού

Προκειμένου να αποδειχθεί η ορθότητα του εξαγόμενου από την εφαρμογή κώδικα g-code εκτελέστηκε κοπή στο κέντρο κατεργασιών Okuma MX-45VAE. Σε αυτή την ενότητα αναλύονται οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν κατά την κοπή, η διαδικασία της κοπής και τα συμπεράσματα που προέκυψαν μετά και το πέρας της.

Σαν πρώτη ύλη προς κοπή επιλέχθηκε ο πλαστικό υλικό Ertalon 6 για τους ακόλουθους κύριους λόγους: Α) για την ασφάλεια της μηχανής καθόσον παρότι οι κώδικες ελέγχθηκαν διεξοδικά για πιθανά σφάλματα, ο έλεγχος αυτός αφορούσε (για την αποπεράτωση ειδικά) ένα δείγμα του συνολικού κώδικα ο οποίος άγγιξε τις 480000 γραμμές. Επομένως με ένα σχετικά ενδοτικό υλικό η πιθανή ζημιά από μια σύγκρουση, στη μηχανή θα μπορούσε να είναι σχετικά μικρή ή και ακόμη εντός των ορίων φόρτισής της. Β) το υλικό χρησιμοποιείται συχνά για την κατασκευή ελαφρών και ανθεκτικών οδοντωτών τροχών οπότε ενέπιπτε στα πιθανά υλικά προς κατεργασία. Γ) Αποτελεί ιδιόμορφο υλικό στην κατεργασία του και επομένως η συμπεριφορά του κατά την κοπή με το συγκεκριμένο κώδικα παρουσίαζε αυξημένο ενδιαφέρον.

6.3.1 Προεργασία της κοπής

Ο οδοντωτός τροχός που επιλέχθηκε να κοπεί αποφασίστηκε να έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

Αριθμό δοντιών $n=23$

Module $m=4$ mm

Γωνία εξειλιγμένης $\alpha_0=20^\circ$

Ακτινική χάρη (επί τοις εκατό του module) $C_r=0,25$

Χάρη των κατατομών $C_i=0,05$

Ακτίνα καμπυλότητας της ακμής του δοντιού του κανόνα $r_c=0,8$ mm

Πλάτος του τροχού $b=20$ mm

Επιθυμητή ακρίβεια $akrib=0,01952$

Η επιλογή των παραπάνω έγινε λαμβάνοντας υπόψη τα μεγέθη του τροχού που θα προέκυπτε έτσι ώστε μεγιστοποιείται η δυνατότητα εποπτείας του τελικού προϊόντος. Για αυτό το λόγο διαθέτει λίγα και αναλογικά μεγάλα δόντια ως προς τη διάμετρό του. Το πλάτος επιλέχθηκε τόσο που να μην σπαταληθεί υλικό και χρόνος κατεργασίας και παράλληλα να επιτρέπει την εύκολη παρατήρηση. Τέλος για την ακρίβεια, η οποία προσδιορίστηκε με δοκιμές συνολικής χρονικής διάρκειας μικρότερης των 6 λεπτών, τα σημεία της κατατομής βρέθηκαν να απέχουν κατά μέσο όρο 0,0785 mm ενώ η ακτίνα μέσα στην οποία τέμνονται τα δύο επιλεγθέντα σημεία εξειλιγμένης και τροχοειδούς είναι: 0.000229249 mm.

Το σχήμα του μπλοκ ακατέργαστου υλικού θα έπρεπε να είναι κύλινδρος πλάτους ίσου με b και διαμέτρου ίσης με αυτή του κύκλου κεφαλής που σε αυτή την περίπτωση προέκυψε 100 mm. Προκειμένου να αποφευχθεί σύγκρουση της κεφαλής της μηχανής με το τσικ της περιστρεφόμενης τράπεζας αποφασίστηκε το προς κοπή μπλοκ να είναι πακτωμένο σε πρόβολο που θα το απομάκρυνε κατά την αξονική διεύθυνση από το τσικ. Αντί για τη δημιουργία ιδιοσυσκευής που θα έπαιζε αυτό το ρόλο προτιμήθηκε το μπλοκ να κατασκευαστεί στην άκρη συμπαγούς μπάρας από το υλικό του τροχού. Η δημιουργία του μπλοκ αρχικού υλικού έγινε στο εργοστάσιο του τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών και δύο στάδιά της φαίνονται στις φωτ.6.16 και φωτ.6.17 του παραρτήματος ενώ στη φωτογραφία 6.4 φαίνεται το πλήρες μπλοκ του αρχικού υλικού όπως “δέθηκε” στο κέντρο κατεργασιών ακριβώς πριν την έναρξη της κατεργασίας του.

Η μέγιστη επιτρεπόμενη διάμετρος κονδυλιού εκχονδρίσματος όπως προέκυψε από την εφαρμογή ήταν 4.10679 mm. Επιλέχθηκε επομένως ένα κυλινδρικό κονδύλι με επίπεδο κάτω άκρο της SECO tools το J99040 το οποίο είναι κατασκευασμένο από συμπαγές καρβίδιο και έχει τη μορφή που φαίνεται στο σχήμα 6.1. Το κονδύλι έχει δύο κοπτικές ακμές και σύμφωνα με τον κατάλογο της εταιρείας



Φωτογραφία 6.4

Μπλοκ αρχικού υλικού επί της περιστρεφόμενης τράπεζας πριν την κατεργασία του.

είναι κατάλληλο για κατεργασία σκληρών πλαστικών σε υψηλές ταχύτητες. Οι χαρακτηριστικές του διαστάσεις όπως φαίνονται στο σχήμα είναι οι ακόλουθες:

$$D_c = 4 \text{ mm}$$

$$d_{m} = 4 \text{ mm}$$

$$l_2 = 50 \text{ mm}$$

$$a_p = 8 \text{ mm}$$

Για το συγκεκριμένο κονδύλι η κατασκευάστρια εταιρεία προτείνει μια περιφερειακή ταχύτητα κοπής και μια πρόωση για την περίπτωση της κοπής αύλακος σε σκληρό πλαστικό. Η τιμή της περιφερειακής ταχύτητας είναι $V_c = 300 \text{ m/min}$ ενώ για την πρόωση είναι $f_z (\text{mm} / \deltaόντι) = 0,004 \cdot D_c = 0,004 \cdot 4 = 0,016$. Το μέγιστο βάθος για κοπή αύλακα σε αυτό το υλικό προσδιορίζεται στο ήμισυ της διαμέτρου D_c δηλαδή στα 2 mm. Αυτή η τιμή 0,5 της διαμέτρου τέθηκε στη μεταβλητή a_p της ρουτίνας *ekchondrisma.m*. Η ταχύτητα περιστροφής της ατράκτου υπολογίστηκε από τη σχέση:

$$n(\text{στροφές} / \text{min}) = \frac{V_c \cdot 1000}{\pi \cdot D_c} \quad (6.1)$$

και βρέθηκαν ίσες με 23873 στροφές/min. Δεδομένου ότι το μέγιστο όριο περιστροφής του κέντρου κατεργασιών Okuma MX-45VAE είναι 7000 στροφές/min επιλέχθηκε -και για να μην λειτουργεί το κέντρο στο όριό του- η κοπή να γίνει με 6000 στροφές/min. Για αυτό τον αριθμό στροφών ανά λεπτό η ταχύτητα πρόωσης προκύπτει από τη σχέση:

$$f(\text{mm} / \text{min}) = n \cdot \alpha\rho \cdot \deltaοντιών \cdot f_z \quad (6.2)$$

και είναι ίση με 192 mm/min. Σαν επιθυμητό πάχος υλικού μετά το εκχόνδρισμα ορίστηκαν (στη μεταβλητή *ofst*) τα 0,7 mm. Για αυτά τα δεδομένα εκτελέστηκε η ρουτίνα *ekchondrisma.m* και προέκυψε πως το μέγιστο βάθος κοπής θα βρίσκεται 0,7244 mm πάνω από τον κύκλο ποδός επιβεβαιώνοντας με αυτό τον τρόπο και την επιλογή μας για το επιθυμητό πάχος υλικού.

Η μέγιστη επιτρεπόμενη δευτερεύουσα διάμετρος του κονδυλιού αποπεράτωσης, όπως προέκυψε από την εφαρμογή ήταν 1.6376 mm. Επιλέχθηκε επομένως ένα κυλινδρικό κονδύλι με επίπεδο κάτω άκρο και καμπυλωμένες άκρες της SECO tools το JH421020R020Z2-MEGA-T το οποίο είναι κατασκευασμένο από συμπαγές καρβίδιο και έχει τη μορφή που φαίνεται στο σχήμα 6.2. Το κονδύλι έχει δύο κοπτικές ακμές και σύμφωνα με τον κατάλογο της εταιρείας είναι κατάλληλο για γενική κατεργασία σκληρών πλαστικών. Οι χαρακτηριστικές του διαστάσεις όπως φαίνονται στο σχήμα είναι οι ακόλουθες:

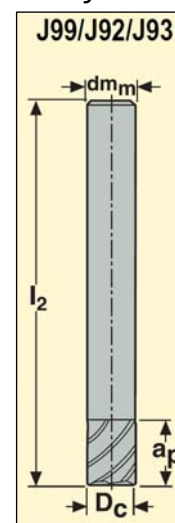
$$D_c = 2 \text{ mm} \quad \epsilon = 0,10 \text{ mm}$$

$$d_{m} = 3 \text{ mm} \quad r_{\epsilon 1} = 0,20 \text{ mm}$$

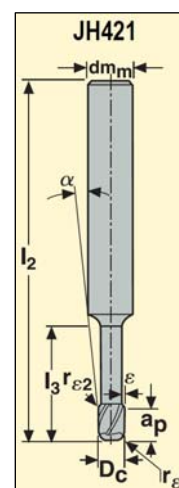
$$l_2 = 40 \text{ mm} \quad r_{\epsilon 2} = 2 \text{ mm}$$

$$a_p = 8 \text{ mm} \quad \alpha = 3^\circ$$

Προκειμένου να είναι ορατά τα αποτελέσματα τόσο της κοπής εκχονδρίσματος όσο και της κοπής αποπεράτωσης αποφασίστηκε η δεύτερη να λάβει χώρα για το ήμισυ του πλάτους του τροχού και το υπόλοιπο να μείνει



Σχήμα 6.1
Κονδύλι εκχονδρίσματος.



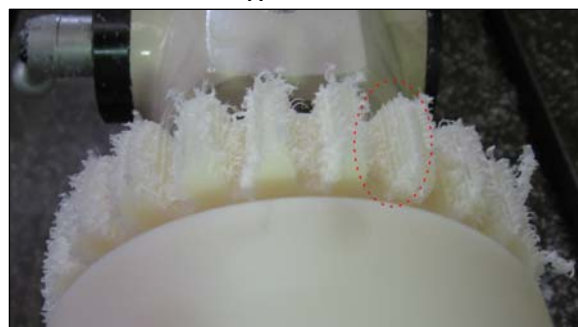
Σχήμα 6.2
Κονδύλι αποπεράτωσης.

εκχονδρισμένο. Για την εξαγωγή των παραμέτρων που θα χαρακτήριζαν την κοπή, πέραν από το είδος της κοπής, έπρεπε να συνυπολογιστεί και ο βαθμός εμπλοκής a_e της κοπτικής ακμής του κονδυλιού. Για τη συγκεκριμένη περίπτωση κατά την αποπεράτωση της πρώτης -κατά Χ- περιφέρειας του τροχού, εμπλέκεται το κονδύλι με το ήμισυ της κυρίας διαμέτρου του επομένως προκειμένου να αποφευχθούν δυσάρεστα ατυχήματα επιλέχθηκε πως για την αποπεράτωση της πρώτης περιφέρειας το κονδύλι βυθίζεται ολόκληρο υπό κλίση σε συμπαγές υλικό. Για αυτό το είδος κοπής η προτεινόμενη τιμή της περιφερειακής ταχύτητας είναι $V_c = 400$ m/min οπότε από τη σχέση (6.1) η ταχύτητα περιστροφής της ατράκτου υπολογίζεται σε 63661 στροφές/min άρα και πάλι επιλέχθηκαν οι 6000 στροφές/min.

Η προτεινόμενη από την κατασκευάστρια εταιρεία πρόωση είναι f_z (mm/δόντι) = $0,005 \cdot D_c = 0,005 \cdot 2 = 0,01$ και άρα από τη σχέση (6.2) η ταχύτητα πρόωσης προκύπτει 120 mm/min. Μετά το πέρας της πρώτης περιφερειακής αποπεράτωσης το κονδύλι κινείται κατά τη διεύθυνση του Χ για διάστημα ίσο με 0,07 της κυρίας διαμέτρου δηλαδή για 0,14 mm. Με την τιμή 0,07 στην μεταβλητή over η ρουτίνα υπέδειξε ύψος εναπομείναντος υλικού ανάμεσα σε δύο πάσα ίσο με 0.00306838 mm το οποίο κρίθηκε αποδεκτό. Από αυτό το σημείο και έπειτα το κονδύλι εκτελεί ουσιαστικά πλευρική κοπή αποπεράτωσης με πλάτος εμπλοκής a_e ίσο με 0,14 mm που αντιστοιχεί στο 0,085 της κυρίας διαμέτρου D_c . Η κατασκευάστρια εταιρεία για αυτό το είδος κοπής και πλάτος εμπλοκής ίσο με το 0,2 της κυρίας διαμέτρου προτείνει $V_c = 600$ m/min και f_z (mm/δόντι) = $0,005 \cdot D_c = 0,005 \cdot 2 = 0,01$ επομένως, με υποδιπλάσιο πλάτος εμπλοκής θα ήταν δυνατό να αυξηθεί τόσο η ταχύτητα περιστροφής όσο και η πρόωση, αλλά και πάλι το άνω όριο περιστροφής του κέντρου κατεργασιών περιόρισε τις συνθήκες κοπής στις ίδιες τιμές που ίσχυαν για την αποπεράτωση της πρώτης περιφέρειας του τροχού.

6.3.2 Κοπή εκχονδρίσματος και σχολιασμός του αποτελέσματος

Ο κώδικας που δημιουργήθηκε μετά την εκτέλεση της ρουτίνας *ekchondrismo.m* ήταν περίπου 1800 γραμμές και για κάθε διάκενο εκτελούνταν 9 διακριτά στάδια επιπεδοποίησης. Το δε μέγεθος του εξαγχθέντος αρχείου ήταν 10 Kbytes με αποτέλεσμα να χωράει στη μνήμη του κέντρου ολόκληρο. Η κοπή διήρκεσε περί τις 2 ώρες και 20 λεπτά και ένα στάδιό της, όπως και το τελικό αποτέλεσμα, φαίνονται στις φωτογραφίες 6.5 και 6.6 αντίστοιχα.



Φωτογραφία 6.6
Πλήρως εκχονδρισμένος τροχός.

Φωτογραφία 6.5
Εκχόνδρισμα τρίτου διακένου.

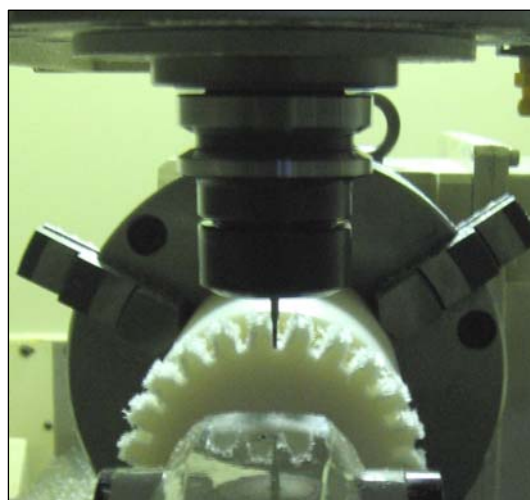
Στη φωτογραφία 6.5 το κέντρο έχει εκχονδρίσει τα δύο πρώτα διάκενα και ολοκληρώνει την επιπεδοποίηση του πρώτου ύψους Z ανάμεσα στις ακμές των δοντιών τρία και τέσσερα. Άμεσα παρατηρείται η τάση που εμφάνισε το απόβλητο να μην αποκολλάται από την ακμή του δοντιού -πιθανά λόγω τοπικής τήξης και επανάπηξής του- και να παραμένει είτε στις ακμές είτε στις κατεργασμένες επιφάνειες. Με το πέρας της κοπής ο τροχός είχε την όψη της φωτογραφίας 6.6 διαθέτοντας ινίδια σε όλη την κατεργασμένη του επιφάνεια. Παρόλα αυτά στη φωτογραφία 6.6 στην περιοχή που σημειώνεται με την κόκκινη έλλειψη είναι εμφανείς οι αναβαθμίδες υλικού που δημιουργούνται πάνω στις επιφάνειες των κατατομών από τις διαδοχικές επιπεδοποιήσεις.

Η δομή του υλικού και η συμπεριφορά που το χαρακτηρίζει κατά την κατεργασία του εμφανίζονται σαν κύρια αίτια για την αποδιδόμενη από το εκχόνδρισμα επιφάνεια. Άλλο πιθανό αίτιο για τη δημιουργία της γεμάτης ίνες επιφάνειας είναι η χαμηλότερη πρόωση (120 mm/min) -από την υπολογισμένη- που χρησιμοποιήθηκε προκειμένου να προστατευθεί το κονδύλι και το κέντρο κατεργασιών στην πρώτη δοκιμαστική κοπή.

6.3.3 Κοπή αποπεράτωσης και σχολιασμός του αποτελέσματος

Ο κώδικας που δημιουργήθηκε μετά την εκτέλεση της ρουτίνας aroperatwsh.m ήταν περίπου 480000 γραμμές και το μέγεθος του εξαγχθέντος αρχείου ήταν 11 Mbytes με αποτέλεσμα να μη χωράει στη μνήμη του κέντρου ολόκληρο. Για το λόγο αυτό επιστρατεύτηκε η δυνατότητα Άμεσου Αριθμητικού Ελέγχου (Direct Numerical Control) που διαθέτει το κέντρο κατεργασιών. Το πρόγραμμα στάλθηκε τμηματικά από ηλεκτρονικό υπολογιστή μέσω καλωδίου στη μονάδα επεξεργασίας του κέντρου η οποία διαθέτει μνήμη προσωρινής αποθήκευσης (Buffer) μεγέθους 128 Kbytes. Η κοπή διήρκεσε περί τις 21 ώρες και 40 λεπτά και ένα στάδιο της φαίνεται στη φωτογραφία 6.7.

Για την κοπή αποπεράτωσης του συγκεκριμένου τροχού υπολογίστηκε πως το κονδύλι θα έπρεπε να διέλθει από 137 σημεία σε κάθε κατατομή. Κατά τη διενέργεια κάποιων δοκιμών χωρίς την ύπαρξη εργαλείου και τεμαχίου, διαπιστώθηκε πως ο κύριος χρόνος της κατεργασίας αναλώνεται στις κινήσεις της μηχανής – και τις επιβεβαιώσεις από τους ελεγκτές ότι οι τελευταίες ολοκληρώθηκαν, για να βρεθεί το κονδύλι στα προκαθορισμένα σημεία. Προκαλεί μεγάλη εντύπωση το γεγονός πως ακόμη και με χρήση της δεκαπλάσιας πρόωσης από αυτή που έγινε η τελική κοπή, ο χρόνος κατεργασίας φάνηκε να μειώνεται ελάχιστα καθ' όσον και πάλι η μονάδα επεξεργασίας είχε να κατευθύνει το κονδύλι και να επιβεβαιώσει ότι έφτασε σε 137 σημεία ανά κατατομή. Τα μόνα σημεία που κερδίσθηκε χρόνος ήταν οι κοπές των κύκλων κεφαλής και ποδός όπου τα σημεία

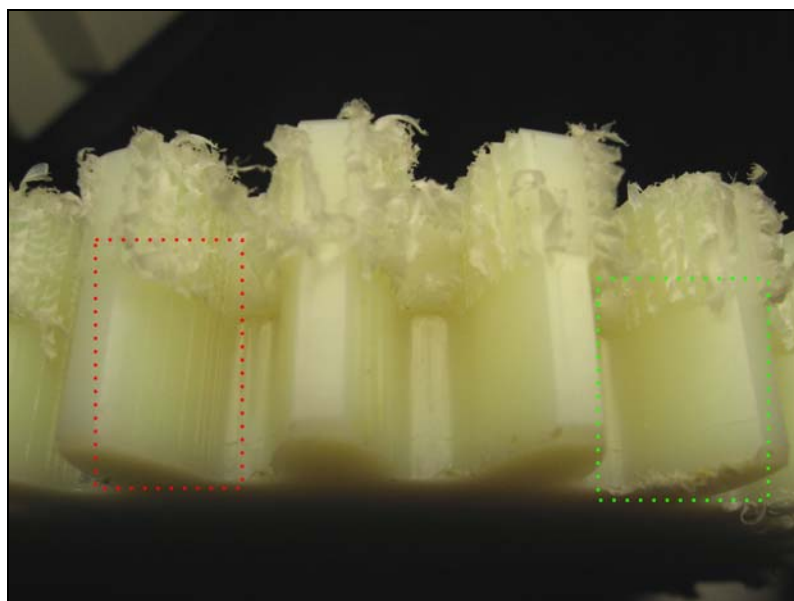


Φωτογραφία 6.7
Πρώτα στάδια διαδικασίας αποπεράτωσης.

αρχής και πέρατος της κίνησης απέχουν αποστάσεις μερικών χιλιοστών και όχι 80 μικρών όπως τα σημεία της κατατομής.

Επειδή, η κοπή αποπεράτωσης ξεκίνησε απόγευμα ημέρας Παρασκευής και τελείωσε εντός του σαββατοκύριακου δεν ήταν δυνατή η λήψη φωτογραφίας σε προχωρημένο στάδιο της αποπεράτωσης παρά μόνο σε αρχικό στάδιο. Κατά τη διάρκεια της η κοπή σταμάτησε δύο φορές λόγω ενεργοποίησης συναγερμού από το πρόγραμμα ελέγχου του κέντρου. Την πρώτη φορά ο λόγος ήταν η προσθήκη αρίθμησης εμπρός από κάθε γραμμή στο κείμενο του g-code που είχε σαν αποτέλεσμα να ξεπερασθεί το όριο των 99999 δεικτών που μπορεί να δεχθεί σαν αρίθμηση ο υπολογιστής του κέντρου κατεργασιών. Όπως αποδείχθηκε στη συνέχεια η λειτουργία του κέντρου ήταν δυνατή και χωρίς την ύπαρξη αρίθμησης πράγμα που και εφαρμόστηκε. Το αποτέλεσμα της επανεκκίνησης της διαδικασίας από συγκεκριμένο πλάτος X είναι ορατό επί του τεμαχίου ως ένα ίχνος που διατρέχει όλη την περιφέρεια του τροχού στο συγκεκριμένο πλάτος. Τη δεύτερη φορά που σταμάτησε η διαδικασία ο λόγος ήταν η παράλειψη προσθήκης κατάλληλης σήμανσης του πέρατος επί του κώδικα. Αποτέλεσμα αυτού ήταν ότι όταν μεταφέρθηκε το τελευταίο πακέτο εντολών να μην μπορεί ο υπολογιστής του κέντρου να “γνωρίζει” πως πρόκειται για το τελευταίο και να σταματήσει την κοπή μερικές γραμμές κώδικα πριν το τέλος της εμφανίζοντας μήνυμα σφάλματος. Το πρόβλημα λύθηκε με την προσθήκη της κατάλληλης σήμανσης επί του κώδικα και την επανεκκίνηση για το τελευταίο πλάτος X.

Το πέρας της κοπής αποπεράτωσης -του μισού πλάτους του τροχού, όπως προαναφέρθηκε- το αποτέλεσμα της οποίας φαίνεται στη φωτογραφία 6.8, ακολούθησε αποκοπή του τροχού από τη μπάρα συμπαγούς υλικού έτσι ώστε να είναι πιο εύκολη η παρατήρησή του και να αποδεσμευτεί το πλεονάζον χρησιμοποιήσιμο υλικό.



Φωτογραφία 6.8

Αποπερατωμένο -κατά το ήμισυ- τμήμα του τροχού. Εντός του κόκκινου τετραπλεύρου σημειώνεται η αριστερή επιφάνεια της κατατομής, όπου το κονδύλι αναρριχήθηκε και εντός του πράσινου η δεξιά, όπου εκτέλεσε καθοδική κίνηση. Εντός της δεξιάς κατατομής είναι εμφανές το ίχνος που άφησε η επανεκκίνηση της διαδικασίας μετά το πρώτο σταμάτημά της.

Παρατηρώντας προσεκτικά τις επιφάνειες της κατατομής των δοντιών γίνεται αμέσως αντιληπτή μια σημαντική διαφορά στην ποιότητα των δεξιών επιφανειών της κατατομής των διακένων σε σχέση με τις αντίστοιχες αριστερές. Οι τελευταίες

παρουσιάζουν εμφανή ίχνη προερχόμενα από την κοπή εκχονδρίσματος σε σχέση με τις δεξιές επιφάνειες. Μάλιστα, τα ίχνη αυτά δεν είναι μόνο οπτικά εμφανή αλλά γίνονται αντιληπτά και μέσω της αφής σε αντίθεση με τις δεξιές επιφάνειες οι οποίες εμφανίζονται λείες και σιλιπνές. Δεδομένης της συμμετρίας των κατατομών και των κοινών συνθηκών κοπής και μετακίνησης και για τα δύο είδη επιφανειών τα αίτια για το αποτέλεσμα αυτό θα πρέπει να αναζητηθούν στη μόνη διαφορά της κατεργασίας της μιας επιφάνειας σε σχέση με την άλλη.

Μέχρι και τη διαπίστωση το προβλήματος αυτού ο κώδικας g-code της αποπεράτωσης όριζε τη διαρκή δεξιόστροφη περιστροφή του τεμαχίου η οποία σε συνδυασμό με την ακτινική τοποθέτηση του περιστρεφόμενου κονδυλιού διέτρεχε όλη την περιφέρεια για κάθε πλάτος X του τροχού. Αυτό σήμαινε πως για την αποπεράτωση κάθε διακένου το κονδύλι εκκινούσε από την κεφαλή της δεξιάς κατατομής και κατερχόταν κόβοντας με την επίπεδη κάτω πλευρά του το πλεονάζον υλικό του εκχονδρίσματος επιτρέποντας έτσι στην καμπύλη πλευρά του να επιτελεί μόνο το έργο της επίτευξης της διαστατικής ακρίβειας της κατατομής. Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί πως η κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής η προκαλούμενη από την πρόωση είχε την αξονική διεύθυνση λόγω της καθοδικής κίνησης σε συνδυασμό με το επίπεδο κάτω άκρο. Τη συγκεκριμένη συνιστώσα παραλαμβάνει ο κορμός αυξανόμενης διαμέτρου του κονδυλιού και κατόπιν η άτρακτος η οποία και εμφανίζει αυξημένη στιβαρότητα εκ κατασκευής.

Μετά και την κοπή του κύκλου ποδός -με περιφερειακό φρεζάρισμα όπως προαναφέρθηκε- το κονδύλι ανερχόταν επί της αριστερής κατατομής κόβοντας ουσιαστικά το μεγαλύτερο όγκο του εναπομείναντος υλικού με την κατακόρυφη ακμή του, που τον συναντούσε πρώτη, και αποδίδοντας την τελική επιφάνεια με το καμπύλο τμήμα του που ακολουθούσε. Μια κοπή αυτού του τύπου που δεν αποτελεί βύθιση, αλλά περιφερειακό φρεζάρισμα εμφανίζει δύναμη κοπής με κύρια συνιστώσα την ακτινική. Ήταν αυτή η συνιστώσα που εικάζεται ότι παραμόρφωνε το λεπτό κονδύλι κατά την κοπή κάθε αναβαθμίδας του εκχονδρίσματος επιτρέποντας τη δημιουργία της συγκεκριμένης κλιμακωτής επιφάνειας.

Η λύση που δόθηκε στο πρόβλημα ήταν η ακόλουθη: αλλάχθηκε ο αλγόριθμος εξαγωγής του g-code αποπεράτωσης έτσι ώστε μετά την βύθιση στη δεξιά κατατομή και την κοπή του κύκλου ποδός μέχρι τη ρίζα της αριστερής κατατομής, το κονδύλι να ανυψώνεται μέχρι το ύψος κεφαλής, το τεμάχιο να περιστρέφεται δεξιόστροφα μέχρι η κεφαλή της αριστερής κατατομής να βρεθεί σε γωνία κοπής και κατόπιν το κονδύλι εκτελεί την κοπή της αριστερής κατατομής βυθιζόμενο από πάνω προς τα κάτω ενώ το τεμάχιο περιστρέφεται αριστερόστροφα. Με αυτό τον τρόπο η αριστερή κατατομή κόβεται με τις ίδιες συνθήκες που κόβεται και η δεξιά και άρα αναμένεται να εμφανίσουν τα ίδια χαρακτηριστικά ποιότητας επιφάνειας. Δυστυχώς, λόγω στενότητας χρόνου δεν έγινε δεύτερη κοπή που να επιβεβαιώνει την ορθότητα της λύσης.

6.3.4 Συμπεράσματα

Οι κατεργασίες των δύο αυτών εξαρτημάτων (της πλάκας του τσικ και του οδοντωτού τροχού) υπήρξαν αναμφίβολα δύο από τα πιο ενδιαφέροντα κομμάτια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας εξαιτίας της ποικιλίας εμπειριών και γνώσεων που προσέφεραν στο γράφοντα.

Η διαδικασία υπολογισμού των διαστάσεων της πλάκας του τσωκ, η εύρεση των κατάλληλων ανοχών για την επίτευξη της οριακά ελεύθερης συναρμογής και ο τελικός σχεδιασμός αποτέλεσαν μια καλή εξάσκηση στο σχεδιασμό απλών εξαρτημάτων. Η διαδικασία της κατασκευής, η αλληλουχία των εργασιών που ακολουθήθηκε και τέλος οι τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν προκειμένου να επιτευχθεί στο ακέραιο η γεωμετρία, προσέφεραν στο γράφοντα πολύτιμη γνώση και εμπειρία πάνω σε πραγματικές συνθήκες κατεργασίας.

Σε ότι αφορά στην κοπή του οδοντωτού τροχού εκτελέστηκαν οι διαδικασίες πρόσδεσης του τεμαχίου στην περιστρεφόμενη τράπεζα και προσαρμόστηκαν τα κατάλληλα εργαλεία στην άτρακτο. Επίσης παρακολουθήθηκε η όλη διαδικασία ορισμού των συστημάτων συντεταγμένων που χρησιμοποιήθηκαν από το κέντρο και της μεθοδολογίας χρήσης της δυνατότητας DNC ελέγχου του κέντρου κατεργασιών.

Αποκορύφωμα της εμπλοκής του γράφοντος υπήρξε η εξακρίβωση των αιτιών που δημιούργησαν τις ανωμαλίες που περιγράφηκαν παραπάνω. Η εύρεση κατάλληλης λύσης για όλα τα προβλήματα που προέκυψαν δεν ήταν εφικτή αφού για το θέμα του μεγάλου χρόνου κατεργασίας η μόνη λύση που θα μπορούσε να ακολουθηθεί θα ήταν η μείωση των σημείων κάθε κατατομής. Άμεση απόρροια αυτής της κίνησης είναι η μείωση της ακρίβειας του τελικού προϊόντος. Η αδυναμία αξιόπιστης επίλυσης του συγκεκριμένου προβλήματος υπήρξε σημαντική εμπειρία για το γράφοντα επαναπροσδιορίζοντας τις έννοιες του προσδοκώμενου αποτελέσματος και των ανοχών που το χαρακτηρίζουν.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

7.1 Εισαγωγή

Την κοπή του οδοντωτού τροχού στο κέντρο κατεργασιών ακολούθησε η μέτρηση των διαστάσεων μιας κατατομής ενός τυχαίου διακένου και η εξαγωγή της πραγματικής του γεωμετρίας της που συγκρίθηκε με την υπολογισμένη από την εφαρμογή, ολοκληρώνοντας με αυτό τον τρόπο την όλη προσπάθεια. Τα αποτελέσματα της μέτρησης αυτής μαζί με τα συνολικά συμπεράσματα που εξήχθησαν από το εγχείρημα αποτελούν το ένα από τα αντικείμενα που πραγματεύεται το παρόν κεφαλαίο.

Καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της συγκεκριμένης εργασίας, μια από τις βασικές μέριμνες του γράφοντος ήταν ο εντοπισμός πιθανών ατελειών είτε στη δομή και τη λειτουργία του αλγορίθμου, είτε στην τεκμηρίωση και την παρουσίαση της εργασίας. Ένα μέρος από αυτές τις ατέλειες διορθώθηκε και οι λύσεις ενσωματώθηκαν στην εργασία, υπάρχει όμως και ένα κομμάτι παρατηρήσεων και βελτιώσεων που λόγω περιορισμών χρονικών και γνωστικού επιπέδου του γράφοντος δεν κατέστη δυνατό να ενσωματωθούν στην εργασία. Όλες αυτές οι προτάσεις αποτελούν το δεύτερο μέρος του κεφαλαίου αυτού.

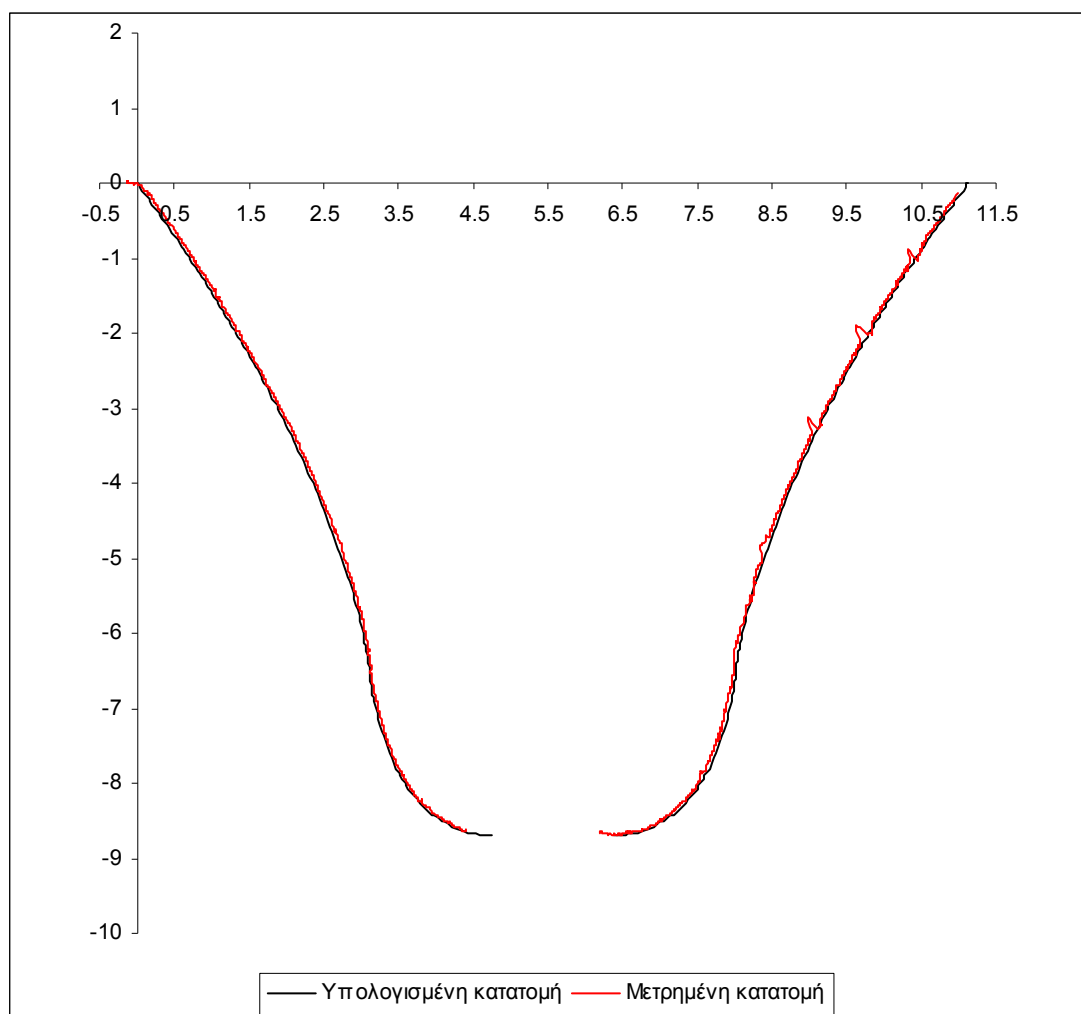
7.2 Μέτρηση διαστάσεων κατατομής και παρατηρήσεις

7.2.1 Μεθοδολογία μέτρησης και παρουσίαση αποτελεσμάτων

Προκειμένου να εξακριβωθεί η διαστατική ακρίβεια της κατατομής που προήλθε από την κοπή του τροχού, επιστρατεύτηκε ένας laser σαρωτής τρισδιάστατων επιφανειών. Πρόκειται για μια συσκευή Hawk 222 της εταιρείας Nextec με κεφαλή Wizprobe της Renishaw που ανήκει στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας της σχολής Ναυπηγών Μηχανικών. Για να σαρωθεί η κατατομή και να έχουμε αξιόπιστα αποτελέσματα θα έπρεπε η κεφαλή να βρίσκεται σε τέτοια θέση ώστε η δέσμη laser να προσπίπτει στην επιφάνεια έχοντας διεύθυνση κάθετη ως προς τον άξονα του τροχού και παράλληλη με τις πλευρικές επιφάνειες του τροχού.

Η πλευρά του τροχού που όρισε την αφετηρία της αποπεράτωσης είχε επιπεδοποιηθεί κατά την κατεργασία του αρχικού κυλινδρικού μπλοκ υλικού στον τόρνο με μετωπική κοπή. Έτσι, οι κατατομές των διακένων του τροχού μπορούν να θεωρηθούν κάθετες ως προς αυτή την επιφάνεια. Επομένως, για να επιτευχθεί αξιόπιστη μέτρηση, θα αρκούσε η τοποθέτηση του τροχού με αυτή την επιφάνεια να εφάπτεται στην τράπεζα του σαρωτή και η περιστροφή της κεφαλής laser κατά 90° έτσι ώστε να εκπέμπει σε διεύθυνση κάθετη ως προς τον κατακόρυφο άξονά της Z (ο οποίος για τη δεδομένη τοποθέτηση θα ήταν παράλληλος με τον άξονα του τροχού). Επειδή το πάχος του τροχού δεν επέτρεπε την απευθείας μέτρηση (λόγω ελλειπούς προς τα κάτω διαδρομής του βραχίονα που έφερε την κεφαλή), χρησιμοποιήθηκαν, σαν αποστάτες από την επιφάνεια της τράπεζας, οι πιστοποιημένες παραλληλεπίπεδες πλάκες που διαθέτει το εργοστάσιο του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών.

Η λήψη απευθείας μέτρησης κατέστη σχετικά δύσκολη αφού η μεγάλη ανακλαστικότητα των κατεργασμένων επιφανειών δεν επέτρεπαν στην κεφαλή να εστιάσει και να λάβει μέτρηση. Για το λόγο αυτό και προκειμένου να μειωθεί το φαινόμενο, η προς σάρωση επιφάνεια βάφτηκε με τη χρήση σκουρόχρωμου μαρκαδόρου με θετικά αποτελέσματα αφού τελικά επετεύχθη εστίαση και μέτρηση. Στο σχήμα 7.1 παρουσιάζονται οι δύο κατατομές που μετρήθηκαν (ανήκουν στο ίδιο διάκενο) μαζί με την κατατομή που προέκυψε από το ASCII αρχείο katat που εξάγει η εφαρμογή.



Σχήμα 7.1

Υπολογισμένη κατατομή και κατατομή τυχαίου διακένου που μετρήθηκε στο σαρωτή laser.

Το αποτέλεσμα της μέτρησης είναι ένα αρχείο κειμένου, με συντεταγμένες του σαρωτή ως προς το εκάστοτε κέντρο συντεταγμένων που του έχει ορισθεί. Λόγω στενότητας χρόνου δεν υπήρχε η δυνατότητα δημιουργίας ιδιοσυσκευής που να επιτρέπει την ακριβή τοποθέτηση του τροχού σε σχέση με το συγκεκριμένο κέντρο του συστήματος συντεταγμένων. Προκειμένου να γίνει η σύγκριση των αποτελεσμάτων της μέτρησης με τα εξαγόμενα από την εφαρμογή έπρεπε να γίνει ταύτισή τους σε πρόγραμμα διαχείρισης αριθμητικών δεδομένων και για αυτό το σκοπό επιλέχθηκε το Microsoft Office Excel 2003. Η μέτρηση των δύο κατατομών αποτελούνταν από 1722 σημεία προσδιοριζόμενα από τις τρεις συντεταγμένες τους. Τα σημεία που είχαν εξαχθεί από την εφαρμογή για τη διενέργεια της κοπής ήταν

266. Επομένως, για να γίνει αριθμητική σύγκριση θα έπρεπε να αντιστοιχηθούν έξι περίπου μετρούμενα σημεία σε κάθε ένα υπολογισμένο σημείο. Επειδή η δημιουργία εφαρμογής που να εκτελεί τη συγκεκριμένη λειτουργία ξεφεύγει από τα πλαίσια του αντικείμενου της διπλωματικής εργασίας, προτιμήθηκε η οπτική σύγκριση των καμπυλών των δύο κατατομών.

Κατά την πρώτη προβολή των αποτελεσμάτων της μέτρησης, και αφού είχε αφαιρεθεί η συνιστώσα της τρίτης διάστασης, παρατηρήθηκε πως για την αριστερή κατατομή είχε ληφθεί νέφος σημείων που κάλυπτε και μέρος του κύκλου κεφαλής. Το σημείο μη λειότητας της καμπύλης της αριστερής κατατομής οριοθετεί το πέρασ της εξειλιγμένης καμπύλης και την αρχή του κύκλου κεφαλής. Αυτό το σημείο επιλέχθηκε για να ταυτιστεί με το κορυφαίο σημείο της υπολογισμένης αριστερής κατατομής δεδομένου ότι για την δεξιά κατατομή δεν είχε ληφθεί ανάλογη μέτρηση. Στη συνέχεια έγινε παράλληλη μετατόπιση επί του επιπέδου των δύο καμπυλών έτσι ώστε το κοινό σημείο τους να συμπίπτει με την αρχή των αξόνων. Τέλος με τη μεθοδολογία που παρουσιάστηκε στο τρίτο κεφάλαιο και τη χρήση μητρώου περιστροφής, περιστράφηκαν τα σημεία της μετρημένης κατατομής έτσι ώστε να ταυτιστεί κατά το δυνατόν καλύτερα το ένα ζεύγος κατατομών με το άλλο.

Στο σχήμα 7.1 παρατηρείται πως με εξαίρεση τις αναβαθμίδες στη δεξιά κατατομή, το επίπεδο ταύτισης της μετρημένης με την υπολογισμένη κατατομή του διακένου μπορεί να χαρακτηριστεί αξιοπρεπές. Οι διαφορές που εντοπίζονται κυμαίνονται από μηδέν μέχρι 40 μικρά περίπου. Βέβαια, η αξιοπιστία της ένθεσης της μιας καμπύλης επί της άλλης δεν είναι σχετικώς αμφισβητήσιμη, όμως σε γενικές γραμμές είναι καλή δεδομένων των δυσκολιών μέτρησης και του ότι πρόκειται για τροχό που είναι ατελής λόγω της αποπεράτωσης που δέχτηκε η δεξιά κατατομή του. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός πως για την πιο πλατιά αναβαθμίδα που μετρήθηκε (η δεύτερη από πάνω δεξιά) το πλάτος της κατά την έννοια του X υπολογίστηκε από τα δεδομένα των μετρήσεων στα 0,2025 mm.

Ένας άλλος παράγοντας που πιθανά να επηρέασε ελάχιστα τη θέση μεταξύ των δύο μετρούμενων κατατομών είναι η μη πάκτωση αλλά η απλή απόθεση του τροχού επί των παραλληλεπίπεδων πλακών. Έτσι κατά τη διενέργεια των, απαραίτητων για τη σάρωση, κινήσεων της τράπεζας η θέση του τροχού μπορεί να άλλαξε ελάχιστα. Παρόλα αυτά η γενικότερη εικόνα είναι απόλυτα θετική αφού η κοπή των αριστερών ειδικότερα κατατομών μπορεί να θεωρηθεί αποδεκτή και λειτουργική.

7.2.2 Παρατηρήσεις

Στο ξεκίνημα εκπόνησης της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας, αναζητήθηκε η ανάγκη ύπαρξης μιας τέτοιας εφαρμογής που να υλοποιεί οδοντωτούς τροχούς κάνοντας χρήση κέντρου κατεργασιών. Μπορεί οι μέθοδοι παραγωγής οδοντωτών τροχών που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 1 να είναι σαφώς πιο αποδοτικοί και από την παρούσα εφαρμογή, όμως στην πλειονότητά τους είτε απαιτούν ειδικό εξοπλισμό για την κοπή των τροχών είτε στην καλύτερη περίπτωση, απαιτούν απλώς εξειδικευμένα εργαλεία για χρήση σε συμβατικές εργαλειομηχανές (φρέζες κατά κύριο λόγο). Και πάλι όμως τα εργαλεία αυτά μπορούν να δημιουργήσουν αποκλειστικά μια οικογένεια οδοντωτών τροχών με συγκεκριμένο module και χαρακτηριστικά κοπτικού κανόνα. Κάνοντας με αυτό τον

τρόπο υποχρεωτική την απόκτηση πολλών ακριβών ως επί το πλείστον εργαλείων προκειμένου να εκτελεστεί η κοπή ακόμη και ενός τροχού.

Από την άλλη πλευρά, οι δυνατότητες που παρέχει στον κάτοχό του ένα κέντρο κατεργασιών τεσσάρων αξόνων είναι ουσιαστικά απεριόριστες. Με τη λέξη απεριόριστες να χαρακτηρίζει τις κατεργασίες κομματιών πρισματικής μορφής (όπως είναι οι οδοντωτοί τροχοί ευθείας οδόντωσης). Κάνοντας μια ανασκόπηση στο σύνολο των ενεργειών που εκτελούνται από την εφαρμογή για την εξαγωγή του τελικού αποτελέσματος μπορούν να παρατηρηθούν τα ακόλουθα σχετικά με τη χρησιμότητα και τα βασικά της πλεονεκτήματα που προσφέρει στο χρήστη μιας τέτοιας μηχανής.

A) Επιτρέπει την κοπή οδοντωτών τροχών με οποιαδήποτε γωνία εξηλιγμένης επιθυμεί ο χρήστης με χρήση συμβατικών κονδυλιών χωρίς να απαιτεί την πολυέξοδη απόκτηση ειδικών εργαλείων (τα οποία για μη τυποποιημένες γωνίες απλώς δεν υπάρχουν). Αυτό σημαίνει πως ο χρήστης μπορεί να έχει στα χέρια του τροχούς που να μπορούν να συνεργαστούν με παλαιούς τροχούς γωνίας εξηλιγμένης $14,5^\circ$ ή τροχούς που ακολουθούν το αμερικάνικο πρότυπο των 25° .

B) Είναι δυνατή η εξομοίωση όλων των κοπτικών κανόνων με όλα τα επιθυμητά χαρακτηριστικά σε ότι αφορά την καμπυλότητα των ακμών τους. Έτσι ο χρήστης δύναται να κατασκευάσει τροχούς με ενισχυμένη ρίζα δοντιού αυξάνοντας την ακτίνα καμπυλότητας που έχει σαν συνέπεια την αύξηση του υλικού του τροχοειδούς. Επίσης αν η αντοχή δεν είναι η βασική προτεραιότητα αλλά η κατασκευασιμότητα, μπορεί να μειώσει τη συγκεκριμένη ακτίνα αυξάνοντας με αυτό τον τρόπο το μήκος του τόξου στον κύκλο ποδός και μαζί του τη δευτερεύουσα διάμετρο του κονδυλιού αποπεράτωσης. Έτσι μπορεί να χρησιμοποιήσει ένα υπάρχον κονδύλι χωρίς να προβεί σε αγορά μικρότερου.

Γ) Συναφής με την παραπάνω δυνατότητα είναι και η ιδιότητα της ρουτίνας αποπεράτωσης να εξάγει κώδικα g-code ακόμη και για κονδύλια με μηδενική ακτίνα καμπυλότητας στα άκρα. Με αυτό τον τρόπο ο χρήστης μπορεί να χρησιμοποιήσει κυλινδρικά κονδύλια εκχονδρίσματος τροχών με μικρό module σαν κονδύλια αποπεράτωσης τροχών με μεγάλο module μειώνοντας ακόμη περισσότερο τα λειτουργικά του έξοδα και αυξάνοντας το βαθμό αξιοποίησης των εργαλείων του.

Συμπερασματικά μπορεί να θεωρηθεί πως το όλο εγχείρημα έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας αξιόπιστης βάσης με δυνατότητες εξέλιξης πάνω στη δημιουργία οδοντωτών τροχών ευθείας οδόντωσης. Οι αυξημένες δυνατότητες παραμετροποίησης των χαρακτηριστικών του κατασκευαζόμενου τροχού υποσκελίζουν το εγγενές μειονέκτημα της χρονοβόρας κατασκευής (που σε μεγάλο βαθμό υπαγορεύεται από τις μειωμένες λόγω παλαιότητας δυνατότητες του κέντρου κατεργασιών) και της χαρίζουν ουσιαστικό λόγο ύπαρξης.

7.3 Προτάσεις βελτίωσης της εφαρμογής

Εξετάζοντας σε βάθος τις πιθανές ανάγκες του δυνητικού χρήστη της εφαρμογής, σε σχέση με τις παρεχόμενες από αυτή δυνατότητες, εντοπίστηκαν κάποιες εγγενείς αδυναμίες. Αυτές χωρίς να είναι πρωτίστου σημασίας, αφήνουν σημαντικό χώρο για βελτιώσεις αλλά και αναβαθμίσεις στην εφαρμογή. Στην

παρούσα ενότητα εντοπίζονται οι προτάσεις που κατά τη γνώμη του γράφοντος μπορούν να προσφέρουν αναβαθμισμένα χαρακτηριστικά στην εφαρμογή.

Πρώτη και πολύ βασική αδυναμία της εφαρμογής είναι η έλλειψη εύχρηστου γραφικού περιβάλλοντος διεπαφής (Graphical User's Interface). Κρίνεται απαραίτητο ένα πιο εμφανίσιμο περιβάλλον εργασίας με προκαθορισμένα πεδία συμπλήρωσης των μεταβλητών εισόδων και πλήκτρα που μέσω μακροεντολών θα ενεργοποιούν τις εκάστοτε απαιτούμενες ρουτίνες. Με αυτό τον τρόπο η εφαρμογή θα γίνει πιο προσβάσιμη για το μέσο -και μη εξοικειωμένο με το περιβάλλον του προγραμματισμού- χρήστη διευρύνοντας με αυτό τον τρόπο το υποψήφιο κοινό που θα χρησιμοποιήσει την εφαρμογή.

Στα πλαίσια της διεπαφής με το χρήστη καλό θα ήταν να ενσωματωθούν επιπλέον έλεγχοι για τα δεδομένα εισόδου. Οι έλεγχοι αυτοί σε συνδυασμό με την εμφάνιση καταλλήλων μηνυμάτων λάθους θα μπορούσαν να καθοδηγήσουν με απλό τρόπο και τον πλέον αδαή στο να χρησιμοποιήσει σωστά την εφαρμογή. Ο όγκος των απαιτούμενων προς απόκτηση γνώσεων από τον γράφοντα για την υλοποίηση των συγκεκριμένων προτάσεων, υπήρξε δυσανάλογα μεγάλος σε σχέση με το χρόνο που διέθετε οπότε υποχρεωτικά αφέθηκε σαν δυνατότητα βελτίωσης της εφαρμογής.

Σε ότι αφορά το υπολογιστικό κομμάτι σε αυτή την έκδοση η εφαρμογή εξάγει κώδικα για τις τροχιές κοπής αποκλειστικά οδοντωτών τροχών ευθείας οδόντωσης. Η σπονδυλωτή δομή που χαρακτηρίζει την εφαρμογή αλλά και κάθε ρουτίνα ξεχωριστά, επιτρέπει -με σχετικά μικρές τροποποιήσεις- την ενσωμάτωση της δυνατότητας κοπής οδοντωτών τροχών με ελικοειδή οδόντωση. Μια τέτοια ενσωμάτωση ουσιαστικά θα διπλασίαζε τις δυνατότητες της εφαρμογής και μαζί τους και το πεδίο των εφαρμογών της. Και πάλι ο διαθέσιμος χρόνος υπήρξε τροχοπέδη στην ενσωμάτωση της συγκεκριμένης δυνατότητας.

Μέσα στις δυνατές αναβαθμίσεις των δυνατοτήτων της εφαρμογής μπορεί να συμπεριληφθεί, όπως προαναφέρθηκε, η εξαγωγή γεωμετρίας για διαμορφώσεις στη ρίζα του δοντιού που θα εξασφαλίζουν αυξημένες επιδόσεις στο θέμα της αντοχής του. Επιπλέον, από την ήδη υπάρχουσα γεωμετρία θα μπορούσε να εκτιμάται και να παρέχεται ως πληροφορία στο χρήστη συνολικό απαιτούμενο ύψος του εργαλείου όπως και το απαιτούμενο ύψος της κοπτικής ακμής του.

Για τον υπολογισμό της τροχιάς των εργαλείων, όπως αναλύθηκε στο πέμπτο κεφάλαιο, το εκάστοτε κάθετο στην επιφάνεια διάνυσμα εξάγεται με αριθμητικό τρόπο. Μια πιθανή βελτίωση που θα αύξανε την ακρίβεια, θα ήταν η εξαγωγή του διανύσματος με αναλυτικό τρόπο όμως έτσι μειώνονται οι δυνατότητες της εφαρμογής για εξαγωγή των τροχιών για διαμορφώσεις άλλες, πέραν των καθιερωμένων. Οπότε μια μερική ενσωμάτωση αναλυτικής λύσης, μόνο για το τμήμα της εξειλιγμένης, και χρήση της υπάρχουσας (ή άλλης με βελτιωμένη ακρίβεια) αριθμητικής λύσης για το κομμάτι του τροχοειδούς αποτελεί κατά τον γράφοντα τον καλύτερο συμβιβασμό μεταξύ ακρίβειας και δυνατοτήτων αναβάθμισης.

Κατά τη διεξαγωγή δοκιμών για την εξακρίβωση ορθής λειτουργίας της περιστρεφόμενης τράπεζας μια από τις προτεινόμενες -από το εγχειρίδιο χρήσης της τράπεζας- δοκιμές ήταν η λειτουργία κατ' επιλογήν σύσφιξης της ατράκτου της τράπεζας και σταθεροποίησής της σε ορισμένη γωνία (clamp – unclamp). Με αυτό τον τρόπο για κατεργασίες που γίνονται βηματικά στην περιφέρεια του τεμαχίου (όπως η διαδικασία του εκχονδρίσματος στην περίπτωση του οδοντωτού τροχού μα

ευθεία οδόντωση), επιτυγχάνεται επιπλέον στιβαρότητα πάκτωσης και μειώνονται οι πιθανότητες εμφάνισης ανεπιθύμητων συντονισμών (chattering). Λόγω κάποιου τεχνικού προβλήματος στο πνευματικό σύστημα του κέντρου κατεργασιών η παροχή αέρα (απαραίτητη για την εκτέλεση της λειτουργίας αυτής) προς την τράπεζα δεν ήταν δυνατή. Έτσι δεν στάθηκε δυνατή η ενσωμάτωση της εντολής δέσμμευσης και αποδέσμμευσης της ατράκτου της τράπεζας, πριν και μετά αντίστοιχα, τη διενέργεια του εκχονδρίσματος σε κάθε ξεχωριστό διάκενο. Είναι όμως μια δυνατότητα που θα ήταν χρήσιμο να ενσωματωθεί μόλις εξακριβωθεί η ικανότητα της τράπεζας να εκτελεί τη συγκεκριμένη λειτουργία.

Ο ελάχιστος αριθμός δοντιών που μπορεί να έχει ένας οδοντωτός τροχός καθορίζεται σαφώς από τη γωνία εξειλιγμένης για την οποία παράγεται. Μια λύση για την μείωση αυτού του αριθμού και την παράλληλη αποφυγή δημιουργίας υποκοπών, είναι η δημιουργία μετατοπισμένων οδοντώσεων. Το ενδεχόμενο ενσωμάτωσης μιας τέτοιας δυνατότητας στην εφαρμογή δεν εξετάστηκε από τον γράφοντα αφού προείχε η δημιουργία μιας εφαρμογής που θα μπορεί με βεβαιότητα να παράγει κατ' αρχάς οδοντωτούς τροχούς κανονικής οδόντωσης. Δεν παύει όμως να αποτελεί μια πιθανή αναβάθμιση για τις δυνατότητες της εφαρμογής.

Μια μετατροπή που θα μπορούσε να δεχτεί η εφαρμογή η οποία στην ουσία θα αξιοποιούσε τη ρουτίνα εξαγωγής της γεωμετρίας και μέρος των αλγορίθμων εξαγωγής των τροχιών του εργαλείου, θα ήταν η τροποποίηση έτσι ώστε να λειτουργήσει σε κέντρο κατεργασιών τριών αξόνων χωρίς τη χρήση περιστροφικής τράπεζας. Μια τέτοια μετατροπή θα επέτρεπε την κοπή οδοντωτών τροχών - αποκλειστικά ευθείας οδόντωσης- χωρίς περιορισμούς προερχόμενους από τη διάμετρο τεμαχίου που μπορεί να προσδεθεί στην περιστροφική τράπεζα. Με αυτό τον τρόπο, θα αυξανόταν σημαντικά το εύρος των εν δυνάμει προϊόντων της εφαρμογής.

Τέλος, επειδή η τεκμηρίωση μέσω της μέτρησης μπορεί να θεωρηθεί σχετικά ελλιπής, θεωρείται σημαντική η διενέργεια κοπής κάνοντας χρήση του κώδικα του προερχόμενου από την τροποποιημένη εφαρμογή, έτσι ώστε να εξακριβωθεί η ορθότητα των συλλογισμών για τις αιτίες που προκάλεσαν τις μικροαποκλίσεις. Μέσα σε αυτό το πλαίσιο θα μπορούσε να ενταχθεί και η δημιουργία μιας μεθοδολογίας μέτρησης των σφαλμάτων των δημιουργούμενων από την εφαρμογή τροχών είτε με τη χρήση ιδιοσυσκευής επί του σαρωτή laser, είτε με τη χρήση του αισθητήρα επαφής που διαθέτει το κέντρο κατεργασιών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Aaron D. Deutschman, Walter J. Michels, Charles E. Wilson. *Machine Design Theory and Practice*. Macmillan Publishing Co. New York (1997).
- [2] Θ. Ν. Κωστόπουλος. *Οδοντώσεις και Μειωτήρες Στροφών*. Εκδόσεις Συμεών. Αθήνα (2005).
- [3] K. D. Bouzakis, E. Lili, N. Michailidis, O. Friderikos. *Manufacturing of cylindrical gears by generating cutting processes: A critical synthesis of analysis methods*. CIRP Annals - Manufacturing Technology 57 (2008).
- [4] B. Karpuschewski, H. J. Knoche, M. Hipke. *Gear finishing by abrasive processes*. CIRP Annals - Manufacturing Technology 57 (2008).
- [5] S. H. Suh, W. S. Jih, H. D. Hong, D.H. Chung. *Sculptured surface machining of spiral bevel gears with CNC milling*. International Journal of Machine Tools & Manufacture 41 (2001).
- [6] Faydor L. Litvin, Alfonso Fuentes. *Gear Geometry and Applied Theory*. Cambridge University Press. Cambridge (2004).
- [7] John J. Craig. *Εισαγωγή Στη Ρομποτική Μηχανική και Έλεγχος*. Εκδόσεις Τζιόλα. Θεσσαλονίκη (2008).
- [8] Γ. Χ. Βοσνιάκος, *Εργαλειομηχανές CNC CAM*. Αθήνα (2003).
- [9] Θ. Ν. Κωστόπουλος. *Διάγνωση Βλαβών και Συντήρηση Περιστρεφόμενων Μηχανών*. Εκδόσεις Συμεών. Αθήνα (2009).
- [10] Bai Hefeng, Michael Savage, Raymond James Knorr. *Computer Modeling of Rack-generated Spur Gears*. Mechanism and Machine Theory Vol. 20. Pergamon Press Ltd. U.S.A. (1985).

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Π.1 Πίνακας 1 Τυποποιημένες Τιμές Module Σε (mm)

0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
1.25	1.5	1.75	2	2.25	2.5	2.75	3
3.25	3.5	3.75	4	4.5	5	5.5	6
6.5	7	7.5	8	9	10	11	12
13	14	15	16	18	20	22	24
27	30	33	36	39	42	45	50

Κωδ.1 Κώδικας ρουτίνας gewmetria.m

Κωδ.1.1 Εισαγωγή δεδομένων και υπολογισμός γεωμετρικών σταθερών

```
clc
```

```
clear all
```

```
%Eisagwgh kyriwn kataskeyastikwn parametrwn toy odontotoy troxoy
```

```
%Arithmos Odontwn
```

```
n=23;
```

```
katat(1,1)=n;
```

```
%module se mm
```

```
m=4;
```

```
katat(1,2)=m;
```

```
%Gwnia ekseiligmenhs se moires
```

```
a0=20;
```

```
katat(2,1)=a0;
```

```
a0r=a0*pi/180;
```

```
%Aktiniki xarh epi tois ekato toy module (0.25-0.3)
```

```
cr=0.25;
```

```
katat(2,2)=cr;
```

```
%Xarh katatomwn epi tois ekato toy arxikoy paxous (0-0.05)
```

```
ct=0.05;
```

```
katat(3,1)=ct;
```

```
%Aktina kampylothtas kanona se mm
```

```
rc=0.8;
```

```
katat(3,2)=rc;
```

```
%Paxos troxoy se mm
```

```
b=20;
```

```
katat(4,1)=b;
```

```
%Orismos parametrwn epeksergasias
```

```
%Orismos ths epi8ymhths apostashs anamesa sta shmeia ths katatomhs san
```

```
%pososto toy module toy odontos
```

```
akrib=0.01952;
```

```
s=m*akrib;
```

```
ds=s/1000;
```

```
%Ypologismos basikwn megethwn toy odontotoy troxoy
```

```
%Gia thn ekseiligmenh
```

```
%Arxikh aktina
```

```
r0=m*n/2;%sxesh(3.8)
```

```
%Aktina kefalhs
```

```

rk=r0+m;%sxesh(3.9)
%Aktina podos
rf=r0-(1+cr)*m;%sxesh(3.10)
%Aktina basikoy kykloy
rg=r0*cos(a0r);%sxesh(3.18)
%Bhma ston arxiko kyklo
t0=2*pi*r0/n;%sxesh(3.6)
%Paxos odontos ston arxiko kyklo
s0=0.5*(1-ct)*t0;%sxesh(3.11)
%Diakeno anamesa se 2 odontes ston arxiko kyklo
l0=t0-s0;%sxesh(3.12)

%Gia to fillet
%Apostash kentroy kampylothtas kanona apo ton arxiko kyklo
B=r0-rf-rc;%sxesh(3.23)
%Apostash kentroy kampylothtas kanona apo ton katakoryfo aksona symmetries
%odonta toy kanona
d1=l0/2-B*tan(a0r)-rc/cos(a0r);%sxesh(3.24)

%Genikes sxeseis
%Gwnia anamesa ston aksona symmetrias toy odontos kai to shmeio ekkinshs ths
%ekseiligmenhs panw sto basiko kyklo
ag=(s0/r0+2*(tan(a0r)-a0r))/2;%sxesh(3.19)
%Gwnia anamesa sthn eytheia poy dierxetai apo to shmeio tomhs ths ekseiligmenhs
%me ton kyklo kefalhs kai toy shmeioy panw sto basiko kyklo poy efaptetai
%eythygrammo tmhma me shmeio ekinshs to parapanw shmeio tomhs
ak=acos(rg/rk);%sxesh(3.20)
%Gwnia anamesa sto shmeio ekkinshs ths ekseiligmenhs panw sto basiko kyklo
%me xri to shmeio tomhs ths me ton kyklo kefalhs
fk=tan(ak)-ak;%sxesh(3.21)
%Gwnia poy grafei h ekseiligmenh mexri thn tomh ths me ton kyklo kefalhs
fik=fk+ak;%sxesh(3.22)
%Gwnia anamesa se 2 diadoxika dontia
ft=2*pi/n;%sxesh(3.25)
%Gwnia anamesa stoys aksones symmetrias katatomhs toy odonta kai toy fillet
w=(ft/2)-(d1/r0);%sxesh(3.26)
%Gwnia anamesa ston aksona symmetrias toy diakenoy 2 diadoxikon odontwn kai
%ton aksona symmetrias toy fillet
v=(ft/2)-w;%sxesh(3.27)
%Gwnia strofhs ths ekseiligmenhs se sxesh me ton aksona symmetrias anamesa se
%2 odontes
fek=(ft/2)-ag;%sxesh(3.43)

```

Κωδ. 1.2 Εύρεση σημείων εξειλιγμένης

```
%Diadikasia eureshs shmeiwn ekseiligmenhs
```



```

fprintf('Τα σημεία της κατατομής θα απέχουν μεταξύ τους ελάχιστη \naπόσταση:
%gmm και μέγιστη απόσταση: %g mm\|n',s,s+ds)
a=0;
i=2;
eks(1,1)=rg*(sin(a)-a*cos(a));%sxesh(3.4)
eks(1,2)=rg+rg*(cos(a)-1+a*sin(a)); %sxesh(3.42)
while a<=fik
    telos=0;
    e=0.5*pi/180;
    while telos~=1
        eks2x=rg*(sin(a+e)-(a+e)*cos(a+e));%sxesh(3.4)
        eks2y=rg+rg*(cos(a+e)-1+(a+e)*sin(a+e));%sxesh(3.42)
        dek12=sqrt((eks2x-eks(i-1,1))^2+(eks2y-eks(i-1,2))^2);%sxesh(5.1)
        if dek12<s
            e=e+(0.00011*pi/180);
        elseif dek12>s+ds
            e=e-(0.0001*pi/180);
        elseif dek12>=s && dek12<=s+ds
            eks(i,1)=eks2x;
            eks(i,2)=eks2y;
            a=a+e;
            telos=1;
        end
    end
    E=i;
    i=i+1;
end
eks(E,1)=rg*(sin(fik)-(fik)*cos(fik));%sxesh(3.4)
eks(E,2)=rg+rg*(cos(fik)-1+(fik)*sin(fik));%sxesh(3.42)

%Peristrofh kata gwnia fek
per=[cos(-fek) sin(-fek)
-sin(-fek) cos(-fek)];%sxesh(3.47)
eks=eks*per;%sxesh(3.44)

```

Κωδ. 1.3 Εύρεση σημείων τροχοειδούς

```
%Diadikasia eureshs shmeiwn fillet
```

```

a=0;
i=1;
fil(1,1)=0;
fil(1,2)=r0-B-rc;
while sqrt((fil(i,1))^2+(fil(i,2))^2)<=r0%sxesh(5.2)
    telos=0;
    e=0.5*pi/180;
    while telos~=1
        fil1x=(a+e)*r0*cos(a+e)-(r0-B)*sin(a+e);%sxesh(3.32)

```

```

fil1y=(r0-B)*cos(a+e)+(a+e)*r0*sin(a+e);%sxesh(3.33)
A=atan((-a+e)*r0*sin(a+e)+
    +B*cos(a+e))/(B*sin(a+e)+(a+e)*r0*cos(a+e));%sxesh(3.35)
filx=fil1x+rc*cos(A);%sxesh(3.36)
fily=fil1y-rc*sin(A);%sxesh(3.37)
dfil12=sqrt((filx-fil(i,1))^2+(fily-fil(i,2))^2);%sxesh(5.3)
if dfil12<s
    e=e+(0.0001*pi/180);
elseif dfil12>s+ds
    e=e-(0.00011*pi/180);
elseif (s+ds)>=dfil12 && s<=dfil12
    fil(i+1,1)=filx;
    fil(i+1,2)=fily;
    a=a+e;
    telos=1;
end
end
G=i;
i=i+1;
end

%Peristrofh toy fillet kata gwnia v
per=[cos(v) -sin(v)
    sin(v) cos(v)]; %sxesh(3.41)
fil=fil*per;%sxesh(3.38)

figure(1)
for i=1:1:G
    hold on
    plot(fil(i,1),fil(i,2),'.b');
end

Κωδ. 1.4 Εύρεση σημείου τομής εξειλιγμένης και τροχοειδούς
%Eyresh twn shmeiwn ekseiligmenhs kai fillet poy briskontai plhsiestera to ena me to
%allo

dx=(eks(1,1)-fil(1,1));
dy=(eks(1,2)-fil(1,2));
mindist=sqrt(dx^2+dy^2);
for i=1:E
    for j=1:G
        dx=(eks(i,1)-fil(j,1));%sxesh(5.4)
        dy=(eks(i,2)-fil(j,2));%sxesh(5.5)
        dist=sqrt(dx^2+dy^2);%sxesh(5.6)
        if dist<mindist
            mindist=dist;
        end
    end
end

```

```

        t=i;
        k=j;
    end
end
end
fprintf('Η ακτίνα μέσα στην οποία τέμνονται τα δύο επιλεχθέντα σημεία η εξελεγμένης
και τροχοειδούς είναι: %g mm\l\l ',mindist)

```

Κωδ.1.5 Δημιουργία και αποθήκευση πίνακα συντεταγμένων κατατομής

%Dhmiourgia pinaka me ta shmeia ths katatomhs

```

tom=E-t+1;
katat(4,2)=tom;
for i=1:tom
    katat(i+4,1)=eks(E+1-i,1);
    katat(i+4,2)=eks(E+1-i,2);
end
l=1;
for i=tom+1:tom+k-1
    katat(i+4,1)=fil(k-l,1);
    katat(i+4,2)=fil(k-l,2);
    l=l+1;
end
L=tom+k-1;

```

Κωδ.1.6 Υπολογισμός διαμέτρων κονδυλίων

%Ypologismos ths megisths diametroy toy kondylioy ksexondrismatos

%thewrwntas pws to kondyli toy finishing dynatai na kopsei metopika ypsos

%ylikoy iso me to hmisi ths megisths diametrou toy

Rdmin=0;

for i=1:L

if sqrt((katat(i+4,1))^2+(katat(i+4,2))^2)-rf<=2*rf*v*0.5%sxesh(5.11)

Rdmin=i-1;

break

end

end

if Rdmin==0

fprintf('Ο δεδομένος συνδυασμός module με την επιλεγείσα ακτίνα ηκαμπυλότητας rc δεν είναι εφικτός\l\l')

Rdmin=L+1;

end

fprintf('Το προτεινόμενο κονδύλι για το εκχόνδρισμα πρέπει να διαθέτει η μέγιστη διάμετρο ίση με: %g mm\l\l ',2*katat(Rdmin+4,1))

```
fprintf('Το προτεινόμενο κονδύλι για την αποπεράτωση πρέπει να διαθέτει/η μέγιστη  
διάμετρο, χωρίς τις εκατέρωθεν ακτίνες καμπυλότητας, λήιση με: %g mm\n  
,2*rf*v)%sxesh(5.7)
```

```
fid=fopen('katatomh','w');
```

```
fclose(fid);
```

```
csvwrite('katatomh',katat);
```

```
fid=fopen('katatomh.xls','w');
```

```
fclose(fid);
```

```
xlswrite('katatomh',katat);
```

```
figure(3)
```

```
for i=5:1:L
```

```
    hold on
```

```
    plot(fil(k,1),fil(k,2),'ob');
```

```
    plot(eks(t,1),eks(t,2),'or');
```

```
    plot(katat(i,1),katat(i,2),'-k');
```

```
    plot(katat(Rdmin,1),katat(Rdmin,2),'+y');
```

```
end
```

```
figure(2)
```

```
for i=1:1:G
```

```
    hold on
```

```
    plot(fil(k,1),fil(k,2),'ob');
```

```
    plot(eks(t,1),eks(t,2),'+r');
```

```
    plot(fil(i,1),fil(i,2),'-b');
```

```
end
```

```
figure(2)
```

```
for i=1:E
```

```
    hold on
```

```
    plot(eks(i,1),eks(i,2),'-r');
```

```
end
```

Κωδ.2 Κώδικας ρουτίνας `ekxondrisma.m`

Κωδ.2.1 Εισαγωγή δεδομένων και υπολογισμός γεωμετρικών σταθερών

```
clc
clear all
fid=fopen('roughgcode.txt','w');
fclose(fid);

%Eisagwgh dedomenwn
katat = dlmread('katatomh');
L= size(katat,1);

%Eisagwgh diastasewn kondylioy
d=4;

%Epitrepomeno ba8os kophs gia slotting ws pososto ths diametroy toy kondylioy
ap=0.38;
zmax=ap*d;%sxesh(5.13)

%Epi8ymhth max anoxh meta to roughing se mm
ofst=0.25;

%Epi8ymhto mege8os epikalypshs tw n paswn ws pososto ths kyrias diametroy toy
%kondylioy
over=0.9;
rov=over*d;%sxesh(5.12)

%Eisagwgh kyriwn kataskeyastikwn parametrwn toy odontotoy troxoy

%Arithmos Odontwn
n=katat(1,1);
%module
m=katat(1,2);
%Gwnia ekseiligmenhs
a0=katat(2,1);
a0r=a0*pi/180;
%Aktiniki xarh epi tois ekato toy module (0.25-0.3)
cr=katat(2,2);
%Xarh katatomwn epi tois ekato toy arxikoy paxous (0-0.05)
ct=katat(3,1);
%Aktina kampylothtas kanona
rc=katat(3,2);
%Paxos troxoy se mm
b=katat(4,1);
```

%Υπολογισμος βασικwn megethwn toy odontotoy troxoy

%Gia thn ekseiligmenh

%Arxikh aktina

$$r_0 = m \cdot n / 2; \%sxesh(3.8)$$

%Aktina kefalhs

$$r_k = r_0 + m; \%sxesh(3.9)$$

%Aktina podos

$$r_f = r_0 - (1 + cr) \cdot m; \%sxesh(3.10)$$

%Aktina basikoy kykloy

$$r_g = r_0 \cdot \cos(a_0 r); \%sxesh(3.18)$$

%Bhma ston arxiko kyklo

$$t_0 = 2 \cdot \pi \cdot r_0 / n; \%sxesh(3.6)$$

%Paxos odontos ston arxiko kyklo

$$s_0 = 0.5 \cdot (1 - ct) \cdot t_0; \%sxesh(3.11)$$

%Diakeno anamesa se 2 odontes ston arxiko kyklo

$$l_0 = t_0 - s_0; \%sxesh(3.12)$$

%Gia to fillet

%Apostash kentroy kampylothtas kanona apo ton arxiko kyklo

$$B = r_0 - r_f - r_c; \%sxesh(3.23)$$

%Apostash kentroy kampylothtas kanona apo ton katakoryfo aksona symmetrias

%odontas toy kanona

$$d_1 = l_0 / 2 - B \cdot \tan(a_0 r) - r_c / \cos(a_0 r); \%sxesh(3.24)$$

%Genikes sxeseis

%Gwnia anamesa ston aksona symmetrias toy odontos kai to shmeio ekinhs ths

%ekseiligmenhs panw sto basiko kyklo

$$a_g = (s_0 / r_0 + 2 \cdot (\tan(a_0 r) - a_0 r)) / 2; \%sxesh(3.19)$$

%Gwnia anamesa sthn eytheia poy dierxetai apo to shmeio tomhs ths ekseiligmenhs

%me ton kyklo kefalhs kai toy shmeioy panw sto basiko kyklo poy efaptetai

%eythygrammo tmhma me shmeio ekinhs to parapanw shmeio tomhs

$$a_k = \arccos(r_g / r_k); \%sxesh(3.20)$$

%Gwnia anamesa sto shmeio ekinhs ths ekseiligmenhs panw sto basiko kyklo

%mexri to shmeio tomhs ths me ton kyklo kefalhs

$$f_k = \tan(a_k) - a_k; \%sxesh(3.21)$$

%Gwnia poy grafei h ekseiligmenh mexri thn tomh ths me ton kyklo kefalhs

$$f_{ik} = f_k + a_k; \%sxesh(3.22)$$

%Gwnia anamesa se 2 diadoxika dontia

$$f_t = 2 \cdot \pi / n; \%sxesh(3.25)$$

%Gwnia anamesa stoys aksones symmetrias katatomhs toy odonta kai toy fillet

$$w = (f_t / 2) - (d_1 / r_0); \%sxesh(3.26)$$

%Gwnia anamesa ston aksona symmetrias toy diakenoy 2 diadoxikon odontwn kai

%ton aksona symmetrias toy fillet

$$v = (f_t / 2) - w; \%sxesh(3.27)$$

```
%Gwnia strofhs ths ekseiligmenhs se sxesh me ton aksona symmetrias anamesa se
%2 odontes
fek=(ft/2)-ag;%sxesh(3.43)
```

Κωδ.2.2 Εύρεση του κατώτατου Z που θα φτάσει το εργαλείο

```
%Eyresh toy katwtatoy Z sto opoio 8a ftasei to ergaleio
for i=L:-1:5
    if katat(i,1)>=d/2
        theshz=i;
        break
    end
end
ymin=d/2;%sxesh(5.14)
zmin=katat(theshz,2)-((katat(theshz,2)-katat(theshz+1,2))/(katat(theshz,1)-
katat(theshz+1,1)))*(katat(theshz,1)-ymin);%sxesh(5.15)
```

Κωδ.2.3 Εύρεση των σημείων που επιτυγχάνουν τα κριτήρια για το πάχος του εναπομένοντος υλικού

```
%Eyresh kai apo8hkeysh ston anoxpos ekeinwn tw n 8esewn ths katatomhs poy sthn
%periptwsh poy anhkoy n sto fillet h diagwniws toy parallhlogrammoy poy
%sxhmatizoy n den kseperna to offset alliws an anhkoy n sthn ekseiligmenh h
%orizontia apostash apo thn kopsh toy ergaleioy den kseperna to offset
```

```
anoxpos(1)=5;
if zmin<katat(katat(4,2),2)
    j=5;
    k=2;
    i=6;
    while i<=katat(4,2)+4
        x1=katat(j,1)-katat(i,1);%sxesh(5.16)
        if x1<=ofst
            i=i+1;
        elseif x1>ofst&&j+1>=i
            fprintf('Η ζητούμενη ανοχή δεν γίνεται να επιτευχθεί με το
συγκεκριμένο\η αριθμό διαμερίσεων\η');
            break
        elseif x1>ofst&&j+1<i
            anoxpos(k)=i-1;
            j=i-1;
            k=k+1;
        end
    end
end
%Apo8hkeysh toy shmeioy tomhs metaksy fillet kai ekseiligmenhs an den exei
%apo8hkeytei
if anoxpos(k-1)~=katat(4,2)+4
    anoxpos(k)=katat(4,2)+4;
    k=k+1;
```



```

    j=katat(4,2)+4;
end
j=katat(4,2)+4;
i=katat(4,2)+5;
while i<=theshz+1
    x1=katat(j,1);%sxesh(5.17)
    x2=katat(i,1);%sxesh(5.18)
    y1=katat(j,2);%sxesh(5.19)
    y2=katat(i,2);%sxesh(5.20)
    check=sqrt((x1-x2)^2+(y1-y2)^2);%sxesh(5.21)
    if check<=ofst
        i=i+1;
    elseif check>ofst&&j+1>=i
        fprintf('Η ζητούμενη ανοχή δεν γίνεται να επιτευχθεί με το
συγκεκριμένο\ηαριθμό διαμερίσεων\η');
        break
    elseif check>ofst&&j+1<i
        anoxpos(k)=i-1;
        j=i-1;
        k=k+1;
    end
end
else
    j=5;
    k=2;
    i=6;
    while i<=theshz+1
        x1=katat(j,1)-katat(i,1);%sxesh(5.16)
        if x1<=ofst
            i=i+1;
        elseif x1>ofst&&j+1>=i
            fprintf('Η ζητούμενη ανοχή δεν γίνεται να επιτευχθεί με το
συγκεκριμένο\ηαριθμό διαμερίσεων\η');
            break
        elseif x1>ofst&&j+1<i
            anoxpos(k)=i-1;
            j=i-1;
            k=k+1;
        end
    end
end
end
L=k-1;
%Theseis toy ergaleioy poy epitygchanoy thn epithymhth anoxh
for i=1:L
    tool(i,1)=katat(anoxpos(i),1);
    tool(i,2)=katat(anoxpos(i),2);

```

```

end
%Apo8hkeysh toy katotatoy shmeioy ypologismenoy apo th sxesh(5.15)
if tool(L,2)~=ymin
    tool(L+1,1)=ymin;
    tool(L+1,2)=zmin;
    L=L+1;
end
for i=2:L
    if tool(i-1,1)-tool(i,1)>zmax
        fprintf('Η ζητούμενη ανοχή δεν γίνεται να επιτευχθεί με το
συγκεκριμένο/ημέγιστο βάθος κοπής που επιτυγχάνει το κονδύλιη');
        break
    end
end
end

```

Κωδ.2.4 Δημιουργία και εγγραφή του g-code στο αρχείο κειμένου roughing.txt

```

%dhmiourgia G - code
fid=fopen('roughgcode.txt','a');
fprintf(fid,'X%-5.3f\n',-(d/2+1));
fprintf(fid,'Y%-5.3f\n',0.0);
fora=1;
for k=0:n-1
    fprintf(fid,'Z%-5.3f\n',rk+1);
    fprintf(fid,'M15A%-6.3f\n',(k*ft+(fek+fk))*180/pi);
    for j=1:L
        fprintf(fid,'Z%-5.3f\n',tool(j,2));
        if mod(2*tool(j,1)-d,rov)==0
            for p=tool(j,1)-d/2:-rov:-tool(j,1)+d/2
                if fora==1
                    fprintf(fid,'Y%-5.3f\n',p);
                    fprintf(fid,'X%-5.3f\n',b+(d/2+1));
                    fora=0;
                elseif fora==0
                    fprintf(fid,'Y%-5.3f\n',p);
                    fprintf(fid,'X%-5.3f\n',-(d/2+1));
                    fora=1;
                end
            end
        end
        elseif mod(2*tool(j,1)-d,rov)~=0
            for p=tool(j,1)-d/2:-rov:-tool(j,1)+d/2+mod(2*tool(j,1)-d,rov)
                if fora==1
                    fprintf(fid,'Y%-5.3f\n',p);
                    fprintf(fid,'X%-5.3f\n',b+(d/2+1));
                    fora=0;
                elseif fora==0

```

```

        fprintf(fid,'Y%-5.3f\n',p);
        fprintf(fid,'X%-5.3f\n',-(d/2+1));
        fora=1;
    end
end
if fora==1
    fprintf(fid,'Y%-5.3f\n',-tool(j,1)+d/2);
    fprintf(fid,'X%-5.3f\n',b+(d/2+1));
    fora=0;
elseif fora==0
    fprintf(fid,'Y%-5.3f\n',-tool(j,1)+d/2);
    fprintf(fid,'X%-5.3f\n',-(d/2+1));
    fora=1;
end
end
end
end
end

fclose(fid);

figure(3)
for i=1:1:L
    hold on
    plot(tool(i,1)-d/2,tool(i,2),'.r');
    plot(-(tool(i,1)-d/2),tool(i,2),'.r');
    axis equal % ΟΡΙΖΕΙ ΙΣΟΥΣ ΤΟΥΣ ΑΞΟΝΕΣ
end
figure(3)
for i=5:size(katat,1)-4
    hold on
    plot(katat(i,1),katat(i,2),'.b');
    plot(-katat(i,1),katat(i,2),'.b');
    plot(katat(katat(4,2)+4,1)-d/2,katat(katat(4,2)+4,2),'.k');
    plot(-katat(katat(4,2)+4,1)+d/2,katat(katat(4,2)+4,2),'.k');
end

```

Κωδ.3 Κώδικας ρουτίνας aroperatwsh.m

Κωδ.3.1 Εισαγωγή δεδομένων και υπολογισμός γεωμετρικών σταθερών

```

clc
clear all
fid=fopen('finishgcode.txt','w');
fclose(fid);

%Eisagwgh dedomenwn

katat = dlmread('katatomh');
L= size(katat,1);
tool=zeros(L-4,2);

%Eisagwgh diastasewn kondylioy

D=2;
r=0.2;
d=D-2*r;%sxesh(5.18)

%Epi8ymhto mege8os allhlokalyphs twn paswn ws pososto ths kyrias diametroy toy
%kondylioy
over=0.07;
rov=over*D;%sxesh(5.12)
cusp=(d/2)-sqrt(((d/2)^2)-(rov/2)^2);%sxesh(5.19)
fprintf('Το εναπομένον υλικό ανάμεσα σε δύο διαδοχικά πάσα έχει ύψος: %g
mm\n',cusp)

%Eisagwgh kyriwn kataskeyastikwn parametrwn toy odontotoy troxoy

%Arithmos Odontwn
n=katat(1,1);
%module
m=katat(1,2);
%Gwnia ekseiligmenhs
a0=katat(2,1);
a0r=a0*pi/180;
%Aktiniki xarh epi tois ekato toy module (0.25-0.3)
cr=katat(2,2);
%Xarh katatomwn epi tois ekato toy arxikoy paxous (0-0.05)
ct=katat(3,1);
%Aktina kampylothtas kanona
rc=katat(3,2);
%Paxos troxoy se mm
b=katat(4,1);

```

%Υπολογισμος βασικwn megethwn toy odontotoy troxoy

%Gia thn ekseiligmenh

%Arxikh aktina

$$r_0 = m \cdot n / 2; \%sxesh(3.8)$$

%Aktina kefalhs

$$r_k = r_0 + m; \%sxesh(3.9)$$

%Aktina podos

$$r_f = r_0 - (1 + cr) \cdot m; \%sxesh(3.10)$$

%Aktina basikoy kykloy

$$r_g = r_0 \cdot \cos(a_0 r); \%sxesh(3.18)$$

%Bhma ston arxiko kyklo

$$t_0 = 2 \cdot \pi \cdot r_0 / n; \%sxesh(3.6)$$

%Paxos odontos ston arxiko kyklo

$$s_0 = 0.5 \cdot (1 - ct) \cdot t_0; \%sxesh(3.11)$$

%Diakeno anamesa se 2 odontes ston arxiko kyklo

$$l_0 = t_0 - s_0; \%sxesh(3.12)$$

%Gia to fillet

%Apostash kentroy kampylothtas kanona apo ton arxiko kyklo

$$B = r_0 - r_f - r_c; \%sxesh(3.23)$$

%Apostash kentroy kampylothtas kanona apo ton katakoryfo aksona symmetrias

%odontas toy kanona

$$d_1 = l_0 / 2 - B \cdot \tan(a_0 r) - r_c / \cos(a_0 r); \%sxesh(3.24)$$

%Genikes sxeseis

%Gwnia anamesa ston aksona symmetrias toy odontos kai to shmeio ekinhs ths

%ekseiligmenhs panw sto basiko kyklo

$$a_g = (s_0 / r_0 + 2 \cdot (\tan(a_0 r) - a_0 r)) / 2; \%sxesh(3.19)$$

%Gwnia anamesa sthn eytheia poy dierxetai apo to shmeio tomhs ths ekseiligmenhs

%me ton kyklo kefalhs kai toy shmeioy panw sto basiko kyklo poy efaptetai

%eythygrammo tmhma me shmeio ekinhs to parapanw shmeio tomhs

$$a_k = \arccos(r_g / r_k); \%sxesh(3.20)$$

%Gwnia anamesa sto shmeio ekinhs ths ekseiligmenhs panw sto basiko kyklo

%mexri to shmeio tomhs ths me ton kyklo kefalhs

$$f_k = \tan(a_k) - a_k; \%sxesh(3.21)$$

%Gwnia poy grafei h ekseiligmenh mexri thn tomh ths me ton kyklo kefalhs

$$f_{ik} = f_k + a_k; \%sxesh(3.22)$$

%Gwnia anamesa se 2 diadoxika dontia

$$f_t = 2 \cdot \pi / n; \%sxesh(3.25)$$

%Gwnia anamesa stoys aksones symmetrias katatomhs toy odonta kai toy

%fillet

$$w = (f_t / 2) - (d_1 / r_0); \%sxesh(3.26)$$

%Gwnia anamesa ston aksona symmetrias toy diakenoy 2 diadoxikon odontwn kai

%ton aksona symmetrias toy fillet

$$v = (f_t / 2) - w; \%sxesh(3.27)$$

```
%Gwnia strofhs ths ekseiligmenhs se sxesh me ton aksona symmetrias anamesa se
%2 odontes
fek=(ft/2)-ag;%sxesh(3.43)
```

Κωδ.3.2 Προσδιορισμός συντεταγμένων εργαλείου και γωνία στροφής του τροχού για κοπή κάθε σημείου

```
%Eyresh ths gwnias twn shmeiwn ths katatomhs ws pros thn katakoryfo pou
%dierxetai apo ton aksona toy troxoy
for i=5:L
    katcor(i-4)=atan(katat(i,1)/katat(i,2));%sxesh(5.20)
end
```

```
%Eyresh ths klishs toy kathetoy ws pros thn epifaneia dianysmatos me mhkos r se
%kathe thesh ths katatomhs thewrontas prwta oti to shmeio sto opoio briskoyme thn
%klisn exei peristrafei etsi wste na brisketai panw ston katakoryfo aksona pou
%dierxetai apo to kentro toy troxoy
```

```
for i=5:L-1
    x1=katat(i,1)*cos(katcor(i-4))-katat(i,2)*sin(katcor(i-4));%sxesh(5.21)
    x2=katat(i+1,1)*cos(katcor(i-4))-katat(i+1,2)*sin(katcor(i-4));%sxesh(5.22)
    y1=katat(i,1)*sin(katcor(i-4))+katat(i,2)*cos(katcor(i-4));%sxesh(5.23)
    y2=katat(i+1,1)*sin(katcor(i-4))+katat(i+1,2)*cos(katcor(i-4));%sxesh(5.24)
    if x1==x2
        A=0;
    else
        A=pi/2-atan((y2-y1)/(x2-x1));%sxesh(5.25)
    end
    tool(i-4,1)=x1-r*cos(A);%sxesh(5.26)
    tool(i-4,2)=y1+r*sin(A);%sxesh(5.27)
end
tool(L-4,1)=0;
tool(L-4,2)=rf+r;
```

Κωδ.3.3 Δημιουργία κοινόχρηστων -για όλα τα διάκενα- πινάκων με συντεταγμένες κοπής

```
%ypologismos syntetagmenwn ergaleiow
```

```
%gia thn deksia katatomh
for i=1:L-4
    tool1(i,1)=tool(i,2);
    tool1(i,2)=((katcor(1)-katcor(i))*180/pi);
    tool1(i,3)=(d/2)+abs(tool(i,1));
end
%gia th symmetrikh ths
for i=1:L-4
    tool2(L-4+1-i,1)=tool1(i,1);
    tool2(L-4+1-i,2)=(2*(fek+fk)*180/pi)-tool1(i,2);
```

```

    tool2(L-4+1-i,3)=-tool1(i,3);
end

```

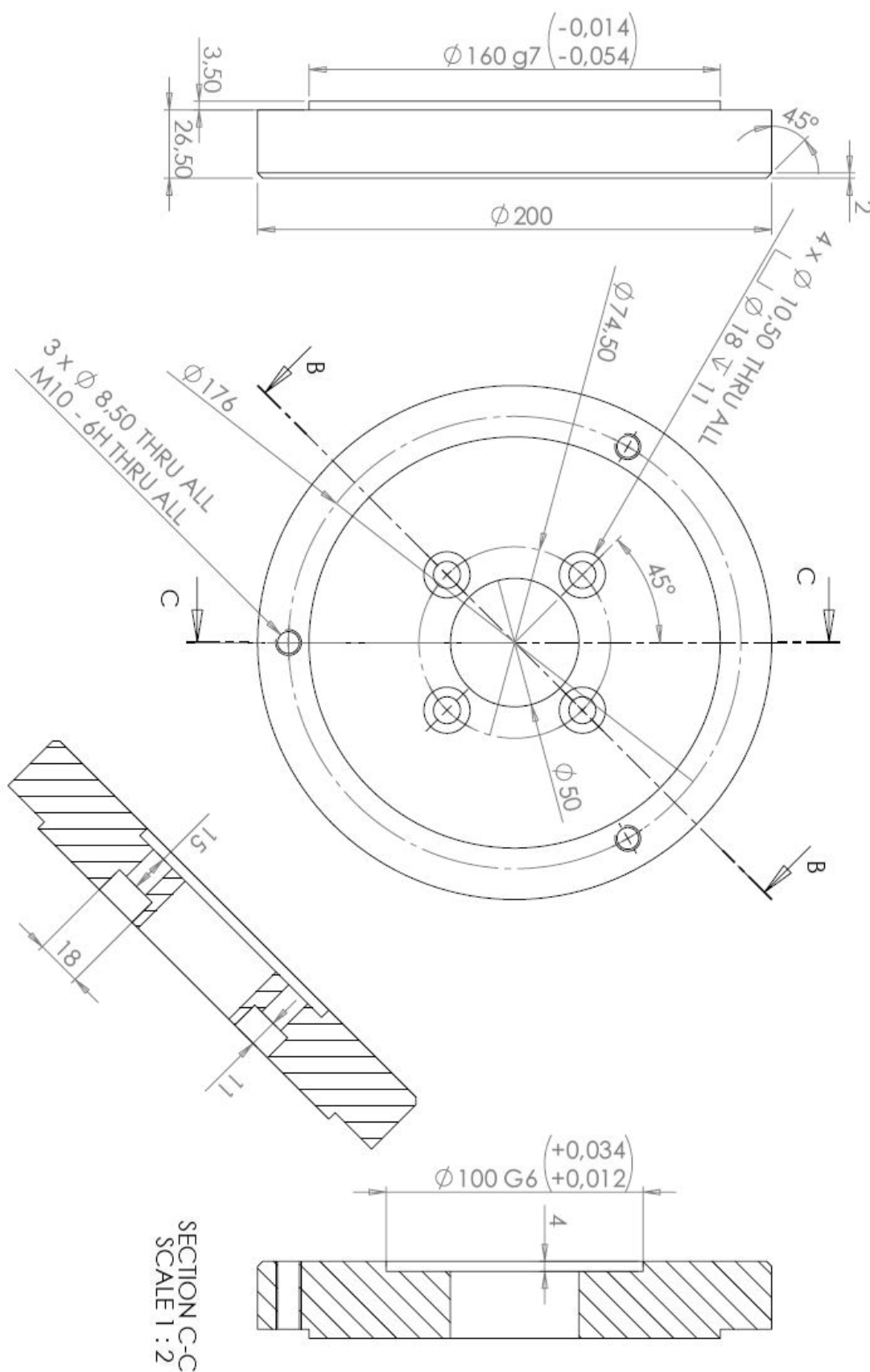
Κωδ.3.4 Δημιουργία και εγγραφή του g-code στο αρχείο κειμένου finishgcode.m

```

%dhmioyrgia G - code
fid=fopen('finishgcode.txt','a');
xinc=ceil(b/rov);
for k=0:xinc
    fprintf(fid,'Z%-5.3fX%-7.3f\n',rk+r,k*rov);
    for j=0:n-1
        fprintf(fid,'Y%-7.3f\n',d/2);
        for i=1:L-4
            fprintf(fid,'Z%-5.3fY%-4.3fM15A%-6.3f\n',tool1(i,1),tool1(i,3),tool1(i,2)+
+j*ft*180/pi);
        end
        fprintf(fid,'Z%-5.3fY%-4.3fM15A%-6.3f\n',tool2(1,1),tool2(1,3),tool2(1,2)+
+j*ft*180/pi);
        fprintf(fid,'Z%-5.3f\n',rk+r);
        fprintf(fid,'M15A%-6.3f\n',tool2(L-4,2)+j*ft*180/pi);
        for i=L-4:-1:1
            fprintf(fid,'Z%-5.3fY%-4.3fM16A%-6.3f\n',tool2(i,1),tool2(i,3),tool2(i,2)+
+j*ft*180/pi);
        end
        fprintf(fid,'Z%-5.3f\n',rk+r);
        fprintf(fid,'M15A%-6.3f\n',tool2(L-4,2)+2*(ag-fk)*180/pi+j*ft*180/pi);
    end
end
fclose(fid);

```


Σ. 1 Σχέδιο της ενδιάμεσης πλάκας μεταξύ τσωκ και τράπεζας



Φωτογραφίες δημιουργίας πλάκας τσωκ



φωτ.6.1



φωτ.6.2



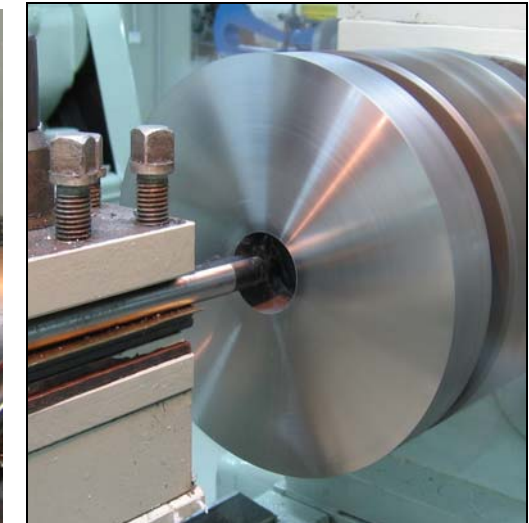
φωτ.6.3



φωτ.6.4



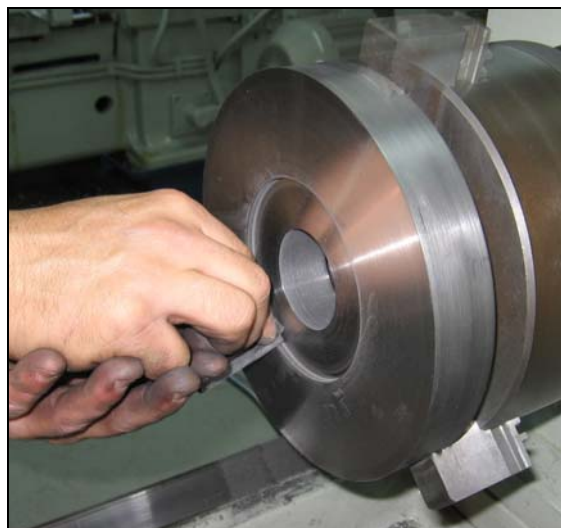
φωτ.6.5



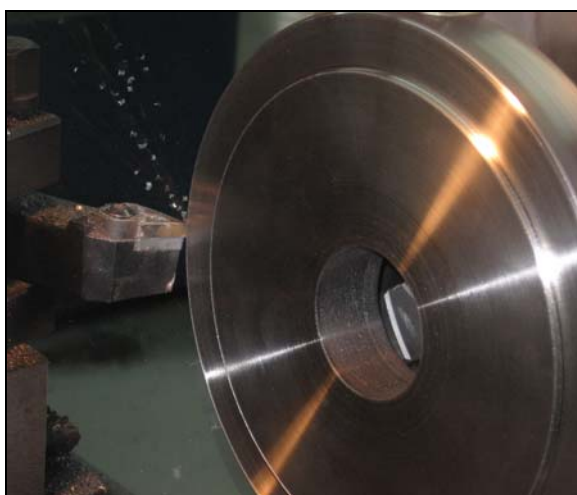
φωτ.6.6



φωτ.6.7



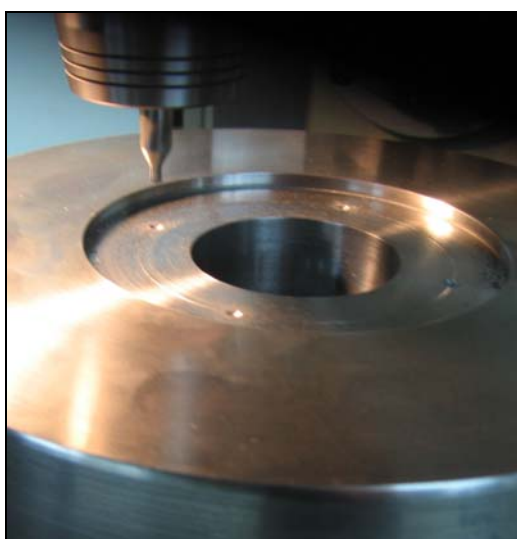
φωτ.6.8



φωτ.6.9



φωτ.6.10



φωτ.6.11



φωτ.6.12



φωτ.6.13



φωτ.6.14



φωτ.6.15



φωτ.6.16



φωτ.6.17