



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ**

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΩΝΙΚΟΥ ΟΔΟΝΤΩΤΟΥ ΤΡΟΧΟΥ ΜΕ ΣΠΕΙΡΟΕΙΔΗ ΟΔΟΝΤΩΣΗ**



Κούβελης Ιωάννης

---

**Επιβλέπων:** Νικόλαος Χρ. Τσουρβελούδης, Καθηγητής

**Συνεπιβλέπων:** Πολυχρόνης Σπανουδάκης, ΕΔΙΠ

**ΧΑΝΙΑ 2022**

Αφιερώνεται στους γονείς μου  
Κωνσταντίνο και Γαρυφαλιά

## Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, κ. Νικόλαο Τσουρβελούδη, για την καθοδήγηση και τις συμβουλές του για την υλοποίηση της παρούσας διπλωματικής. Η εμπιστοσύνη του προς το πρόσωπο μου, μου έδωσε τη δυνατότητα να ασχοληθώ με ενδιαφέροντα θέματα καθ' όλη τη διάρκεια της φοίτησης μου στο Πολυτεχνείο Κρήτης. Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον διδάκτορα της Σχολής Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης και ιδρυτικό μέλος της ερευνητικής ομάδας Daedalus, κ. Πολυχρόνη Σπανουδάκη, για την καθοδήγηση κατά την υλοποίηση της εργασίας καθώς και για την εμπιστοσύνη προς το πρόσωπο μου στα τέσσερα χρόνια που συνεργαστήκαμε.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τους φίλους μου για την στήριξη τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Κλείνοντας θα ήθελα να ευχαριστήσω όλα τα μέλη της ομάδας Daedalus καθώς η τριετής συνεργασία μαζί τους με βοήθησε να εξελιχθώ σε όλους τους τομείς και να αποκτήσω υπέροχες αναμνήσεις από τα φοιτητικά μου χρόνια.

## Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται η διαδικασία ανάπτυξης ενός προϊόντος πολύπλοκης γεωμετρίας κάνοντας χρήση προγραμματιζόμενων εργαλειομηχανών (cnc). Συγκεκριμένα εξετάζεται η κατασκευή ενός κωνικού οδοντωτού τροχού με σπειροειδή οδόντωση για συστήματα κορώνα-πινιόν, τα οποία απαιτούν σημαντικό χρόνο προγραμματισμού και κατεργασίας. Αρχικά, χρησιμοποιείται εξειδικευμένο λογισμικό τρισδιάστατης μοντελοποίησης (cad) για τη σχεδίαση του προϊόντος και εν συνεχεία λογισμικό κατεργασίας (cam) για τη δημιουργία/παραμετροποίηση των διαφορετικών κατεργασιών που απαιτούνται. Επιπλέον πραγματοποιείται μελέτη σχετικά με τη χρήση διαφορετικών κοπτικών εργαλείων ώστε να υπολογιστεί η καλύτερη δυνατή στρατηγική κατεργασίας, με στόχο την ελαχιστοποίηση του χρόνου. Κατασκευάζονται δύο δοκίμια από διαφορετικά υλικά και πραγματοποιούνται μετρήσεις διαστασιολόγησης για να εντοπιστούν τυχόν αποκλίσεις ανάμεσα στα ψηφιακά μοντέλα και τα δοκίμια που κατασκευάστηκαν. Η κατασκευή υλοποιείται στο κέντρο κατεργασίας (cnc) του διατμηματικού εργαστηρίου εργαλειομηχανών. Εξετάζεται επίσης η δυνατότητα θερμικής επεξεργασίας (βαφή) των δοκιμίων καθώς και η δυνατότητα μέτρησης των παραμορφώσεων που έχουν υποστεί οι οδοντώσεις κατά τη θερμική επεξεργασία.

## Abstract

The main scope of this diploma thesis is the development of a complex geometrical product by using computer numerical control machine (CNC). Specifically the construction of spiral bevel gear for crown pinion systems is being studied, which require time consuming processes as computer programming and machining. Initially, a dedicated 3D modeling software is used to design the product and then a computer aided manufacturing (CAM) software is used in order to setup and simulate the different machining processes. Furthermore, the use of different cutting tools is explored, in order to select the optimal machining strategy targeting time reduction. Two helical bevel gear workpieces are developed from different materials and dimension measurements are executed to identify any differences between the digital models and the real parts. The construction of the parts is carried out in the machining center (CNC) of the Machine Tools Laboratory. Finally, the possibility of heat treatment (quenching) on the workpieces is examined, as also the ability of measuring thermal deformations –as a change in dimensions- after this process.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Ευχαριστίες .....	3
Περίληψη .....	4
Abstract.....	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. Εισαγωγή .....	7
1.1 Είδη Οδοντωτών τροχών .....	7
1.1.1 Μετωπικοί οδοντωτοί τροχοί.....	7
1.1.2 Κωνικοί οδοντωτοί τροχοί .....	7
1.1.3 Σύστημα ατέρμονα κοχλία-κορώνας.....	8
1.2 Χαρακτηριστικά μεγέθη οδοντωτών τροχών .....	8
1.3 Βασικός νόμος της Οδόντωσης .....	10
1.4.1 Κυκλοειδής οδόντωση .....	11
1.4.2 Οδόντωση εξελιγμένης.....	13
1.5 Υλικά και μέθοδοι κατασκευής .....	14
1.5.1 Υλικά οδοντωτών τροχών .....	14
1.5.2 Μέθοδοι κατασκευής οδοντώσεων .....	16
1.5.2.1 Κατασκευή οδοντώσεων με χύτευση .....	16
1.5.2.2 Κατασκευή οδοντώσεων με κοπή σε παντογράφο.....	17
1.5.2.3 Κατασκευή οδοντώσεων σε εργαλειομηχανή .....	19
1.5.2.4 Κατασκευή οδοντώσεων με αφαίρεση υλικού (Broaching) .....	24
1.5.2.4 Κατασκευή οδοντωτών τροχών με Κονιομεταλλουργία (Sintering) .....	25
1.6 Μέθοδοι αποπεράτωσης οδοντωτών τροχών .....	25
1.6.1 Λείανση (Grinding-Honing).....	26
1.6.1.1 Λείανση με ίσιο λειαντικό τροχό.....	26
1.6.1.2 Λείανση με κυλινδρικό λειαντικό τροχό .....	27
1.6.1.3 Λείανση με κοχλιωτό λειαντικό τροχό .....	27
1.6.2 Απόξεση (Shaving) .....	28
1.6.3 Υγρή υπερλείανση (Lapping) .....	28
1.7 Θερμικές κατεργασίες σκλήρυνσης .....	29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. Σχεδιασμός ψηφιακού μοντέλου και καθορισμός συνθηκών κατεργασίας.....	30
2.1 Μεθοδολογία προσομοίωσης κατεργασιών.....	30
2.3 Χρήση βοηθητικών εξαρτημάτων .....	33
2.4 Προγραμματισμός κατεργασίας σε λογισμικό CAM .....	34
2.4.1 Προγραμματισμός τριαξονικής κατεργασίας.....	34
2.4.2 Προγραμματισμός τριαξονικής κατεργασίας με τη χρήση πολυαξονικού προγράμματος Cam .....	42

2.4.3 Προγραμματισμός πενταξονικής κατεργασίας .....	47
2.5 Προσομοίωση κατεργασιών .....	49
2.6 Εξαγωγή G κώδικα .....	53
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. Πειραματική διαδικασία .....	54
3.1 Καθορισμός συνθηκών κοπής .....	54
3.2 Σχεδιασμός πειραμάτων .....	57
Κεφάλαιο 4. Συνθήκες και χρόνοι κατεργασιών σε πραγματικές συνθήκες .....	62
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. Θερμική επεξεργασία και έλεγχος ποιότητας .....	68
5.1 Θερμική επεξεργασία οδοντωτών τροχών .....	68
5.2 Έλεγχος ποιότητας .....	68
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. Συμπεράσματα .....	71
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7. Βιβλιογραφία .....	72

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. Εισαγωγή

### 1.1 Είδη Οδοντωτών τροχών

Οι οδοντωτοί τροχοί χρησιμοποιούνται για την ακριβή μετάδοση κίνησης και ισχύος μεταξύ παράλληλων αξόνων (μετωπικοί, τοξοειδείς), τεμνόμενων αξόνων (κωνικοί) και ασύμβατων αξόνων (υποειδείς) [14].

#### 1.1.1 Μετωπικοί οδοντωτοί τροχοί

Όλες οι κατηγορίες μετωπικών οδοντωτών τροχών έχουν κυλινδρική μορφή με τα δόντια να βρίσκονται στην εξωτερική περιφέρεια του σώματος. Το χαρακτηριστικό με το οποίο διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες είναι ανάλογα με τη μορφή της οδόντωσης τους. Οι μετωπικοί οδοντωτοί τροχοί μπορούν να έχουν ευθεία, ελικοειδή και σπειροειδή οδόντωση. Στην ευθεία οδόντωση τα δόντια είναι ίσια, παράλληλα μεταξύ τους και παράλληλα με τον άξονα περιστροφής. Στην ελικοειδή οδόντωση τα δόντια είναι ίσια και παράλληλα μεταξύ τους. Στην σπειροειδή οδόντωση τα δόντια είναι τμήματα έλικας. Οι τροχοί με την τοξοειδή οδόντωση επιλέγονται σε περιπτώσεις που απαιτούνται υψηλότερες στροφές και υψηλότερα φορτία. Αυτό συμβαίνει επειδή για το ίδιο πάχος τροχού τα δόντια έχουν μεγαλύτερο μήκος σε σχέση με τα ίσια. Αυτό όμως έχει ως αποτέλεσμα περισσότερη τριβή και έτσι ανάπτυξη υψηλότερης θερμοκρασίας. (Εικόνα 1.1).



Εικόνα 1.1: Μετωπικοί οδοντωτοί τροχοί με ευθεία οδόντωση (αριστερά), με ελικοειδή οδόντωση (κέντρο) και με σπειροειδή οδόντωση (δεξιά).

#### 1.1.2 Κωνικοί οδοντωτοί τροχοί

Όλες οι κατηγορίες κωνικών οδοντωτών τροχών έχουν κωνική μορφή με τα δόντια να βρίσκονται στην εξωτερική παράπλευρη επιφάνεια του σώματος. Το χαρακτηριστικό με το οποίο διακρίνονται σε τέσσερις κατηγορίες είναι ανάλογα με τη μορφή της οδόντωσης τους. Οι κωνικοί οδοντωτοί τροχοί μπορούν να έχουν ευθεία, Zero, σπειροειδή και υποειδή οδόντωση. Στην ευθεία οδόντωση τα δόντια είναι ίσια, παράλληλα μεταξύ τους και παράλληλα με το βασικό τμήμα του κώνου. Στη Zero οδόντωση τα δόντια είναι παράλληλα μεταξύ τους και με το βασικό τμήμα του κώνου και κυρτά. Στην σπειροειδή οδόντωση τα δόντια δημιουργούνται κατά μήκος των σπειροειδών γραμμών και είναι κυρτά. Στις παραπάνω τρεις περιπτώσεις οι άξονες τέμνονται. Στην υποειδή οδόντωση τα δόντια έχουν μεγαλύτερη κλίση ελίκωσης σε σχέση με τα δόντια στην σπειροειδή

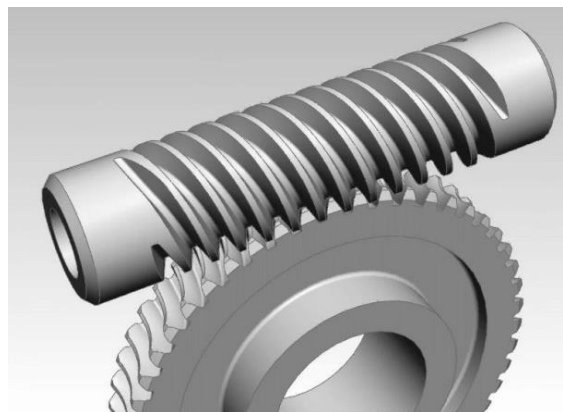
οδόντωση. Επιπλέον, στους υποειδείς κωνικούς οδοντωτούς τροχούς οι άξονες δεν τέμνονται, κάτι που δεν ισχύει στις υπόλοιπες κατηγορίες κωνικών οδοντωτών τροχών (Εικόνα 1.2).



Εικόνα 1.2: Κωνικοί οδοντωτοί τροχοί με ευθεία οδόντωση (αριστερά), με σπειροειδή οδόντωση (κέντρο) και με υποειδή οδόντωση (δεξιά).

### 1.1.3 Σύστημα ατέρμονα κοχλία-κορώνας

Η κορώνα είναι ένα ελικοειδές γρανάζι και ο κοχλίας με το σπείρωμα του, δίνει την κίνηση στην κορώνα. Το βασικό πλεονέκτημα του συγκεκριμένου συστήματος είναι η μεγάλη σχέση μετάδοσης που έχει, όμως έχει μικρό βαθμό απόδοσης. Για να επιτευχθεί ακόμα μεγαλύτερη σχέση μετάδοσης υπάρχουν κοχλίες που έχουν 1, 2 ή 3 αρχές. Όταν ο κινητήριος τροχός είναι ο κοχλίας τότε το σύστημα χρησιμοποιείται για μείωση στροφών, ενώ όταν ο κινητήριος τροχός είναι η κορώνα τότε το σύστημα χρησιμοποιείται για αύξηση στροφών. Οι άξονες των συνεργαζόμενων τροχών τις περισσότερες φορές είναι κάθετοι αν και είναι εφικτό να σχηματίσουν διαφορετική γωνία (Εικόνα 1.3).



Εικόνα 1.3: Σύστημα ατέρμονα κοχλία-κορώνας.

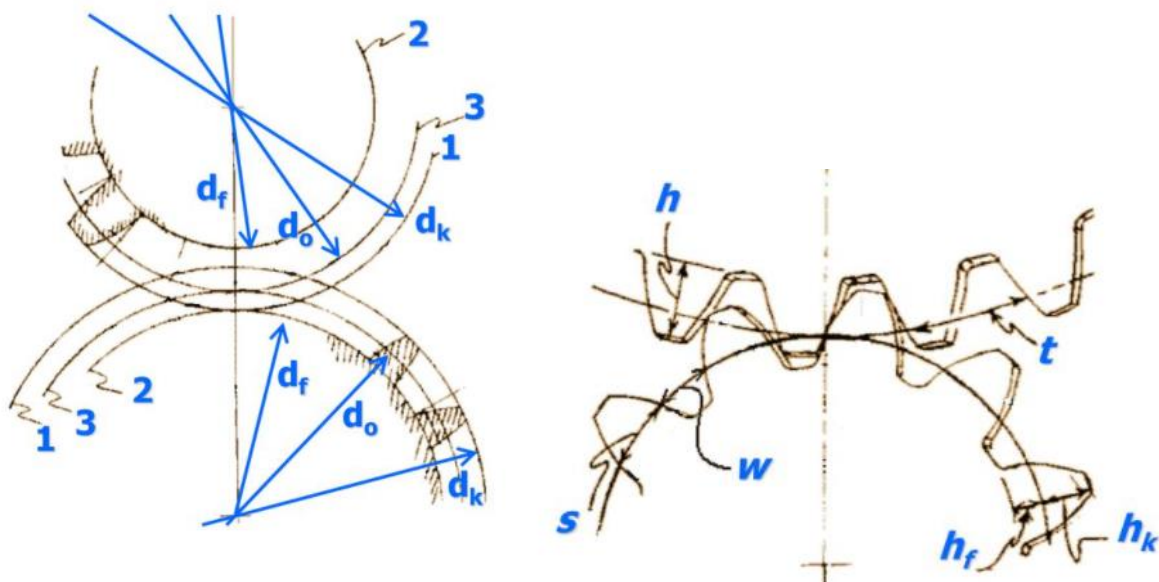
## 1.2 Χαρακτηριστικά μεγέθη οδοντωτών τροχών

Η ανάλυση για τα χαρακτηριστικά μεγέθη των οδοντωτών τροχών θα γίνει βάση των μετωπικών οδοντωτών τροχών με ευθεία οδόντωση για να μπορέσουν να γίνουν κατανοητά [9] (Εικόνα 1.4).

1. Δεξιόστροφοι οδόντες είναι αυτοί των οποίων η κλίση σε σχέση με τον άξονα του τροχού είναι όπως η ωρολογιακή φορά.



2. Αριστερόστροφοι είναι οι όδοντες των οποίων η κλίση σε σχέση με τον άξονα του τροχού είναι ανάποδα από την ωρολογιακή φορά.
3. Διάμετρος κεφαλής ( $d_k$ ) ονομάζεται η διάμετρος του κύκλου που δημιουργείται από τις κεφαλές των οδόντων .
4. Αρχική διάμετρος ( $d_o$ ) ονομάζεται η διάμετρος του κύκλου στον οποίο εφάπτεται ο ένας κύλινδρος πάνω στον άλλο.
5. Διάμετρος Ποδός ( $d_f$ ) ονομάζεται η διάμετρος του κύκλου που διέρχεται εσωτερικά τους οδόντες.
6. Βήμα ( $t$ ) ονομάζεται η απόσταση ανάμεσα σε 2 γειτονικά δόντια σε αντίστοιχα σημεία πάνω στην αρχική περιφέρεια.
7. Ύψος κεφαλής( $h_k$ ) ονομάζεται το τμήμα του δοντιού που βρίσκεται έξω από την αρχική περιφέρεια.
8. Ύψος ποδιού ( $h_f$ ) ονομάζεται το τμήμα του δοντιού που βρίσκεται μέσα από την αρχική περιφέρεια.
9. Ύψος δοντιού ( $h$ ) ονομάζεται το άθροισμα του ύψους κεφαλής και του ύψους ποδιού.
10. Αριθμός δοντιών ( $z$ ) είναι το πλήθος των δοντιών
11. Διάκενο ( $w$ ) ονομάζεται η ελάχιστη απόσταση ανάμεσα σε 2 γειτονικά δόντια στην αρχική περιφέρεια
12. Πάχος δοντιού ( $s$ ) είναι η διαφορά του βήματος με το διάκενο  $s=t-w$
13. Modul ( $m$ )ορίζεται ο λόγος της αρχικής διαμέτρου προς το πλήθος των δοντιών  $m=d_o/z$  ή  $m=t/\pi$
14. Circular Pitch (**CP**) είναι αντίστοιχο του modul αλλά χρησιμοποιείται στις χώρες με το Αγγλοσαξωνικό σύστημα μονάδων, υπολογίζεται  $Cp=t/\pi$  όπου το  $t$  είναι σε ίντσες.
15. Diametrical Pitch (**DP**) εκφράζει το πλήθος των δοντιών που αντιστοιχούν στο μήκος μίας ίντσας της αρχικής διαμέτρου.



Εικόνα 1.4: Χαρακτηριστικά μεγέθη μετωπικών οδοντωτών τροχών [9].

Στους κωνικούς οδοντωτούς τροχούς ο κώνος έχει δύο αρχικές διαμέτρους, την εξωτερική ( $d_a$ ) και την εσωτερική ( $d_e$ ). Για αυτό το λόγο υπάρχει για κάθε διάμετρο ένα διαμετρικό βήμα modul,

με το modul της εξωτερικής διαμέτρου να είναι αυτό που τυποποιείται και μέσω αυτού να προσδιορίζεται το άλλο.

Στους σπειροειδείς οδοντωτούς τροχούς υπάρχει το μετωπικό βήμα ( $t_s$ ) που μετριέται σε κάθετο επίπεδο ως προς τον άξονα του τροχού και το κάθετο βήμα ( $t_n$ ) που μετριέται σε κάθετο επίπεδο ως προς το ίχνος του όδοντα. Προφανώς για κάθε βήμα υπάρχει το αντίστοιχο μετωπικό και κάθετο modul με το κάθετο να είναι αυτό που χρησιμοποιείται για τη χάραξη των σπειροειδών οδοντώσεων

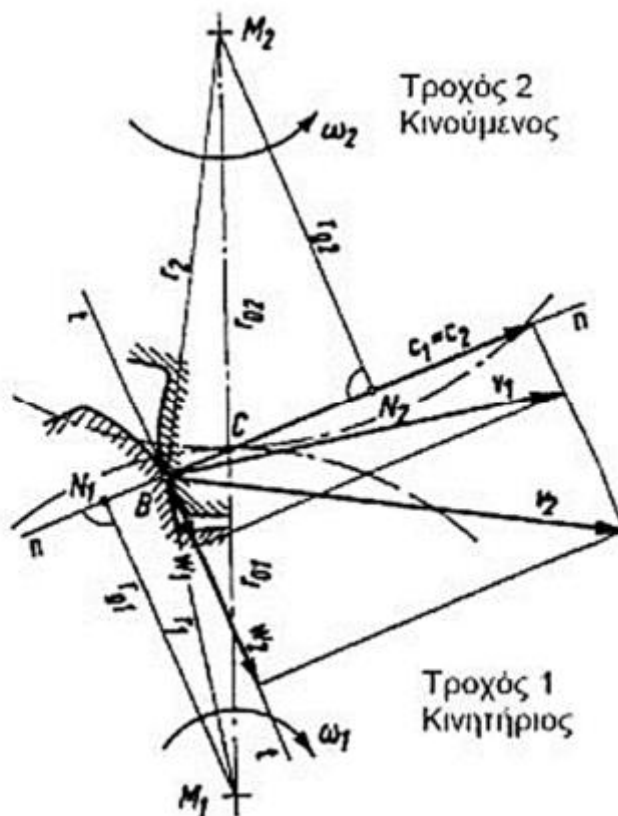
### 1.3 Βασικός νόμος της Οδόντωσης

Η επιστημονική μελέτη των οδοντωτών τροχών ξεκίνησε από τον 17ο αιώνα με τον De la Hire, του οποίου το έργο μετέπειτα συνέχισαν οι Euler, Willis και Reuleaux. Όμως το 1870 ο Saalschutz διατύπωσε το βασικό νόμο της οδόντωσης [19] ο οποίος εκφράζεται ως εξής:

*Θα υπάρχει ομοιόμορφη μετάδοση της κίνησης ανάμεσα σε δύο συνεργαζόμενους οδοντωτούς τροχούς, εφόσον η κάθετος στο εκάστοτε σημείο επαφής των δύο συνεργαζόμενων κατατομών διέρχεται από το σημείο κύλισης C σε οποιοδήποτε σημείο επαφής των πλευρών.*

Απαραίτητη προϋπόθεση για ομοιόμορφη μετάδοση κίνησης των οδοντωτών τροχών είναι να έχουν μία σταθερή σχέση των γωνιακών τους ταχυτήτων. Για να βρίσκονται σε επαφή οι κατατομές είναι απαραίτητο να είναι ίσες οι συνιστώσες των περιφερειακών ταχυτήτων ( $C_1 = C_2$ ). Έτσι για τις σχέσεις μετάδοσης ισχύει [11]:

$$i = \frac{n_1}{n_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{d_{o1}}{d_{o2}} = \frac{r_{o1}}{r_{o2}}$$



Εικόνα 1.5: Κατατομές οδοντών (βασικός νόμος οδόντωσης) [10].

Από το παραπάνω σχήμα προκύπτει πως  $C_1 = \omega_1 \cdot r_{g1}$ ,  $C_2 = \omega_2 \cdot r_{g2}$  και πρέπει να ισχύει  $C_1 = C_2$ . Επιπλέον τα τρίγωνα  $CM_1N_1$  και  $CM_2N_2$  είναι όμοια και προκύπτει:

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{r_{02}}{r_{01}} \quad \text{και} \quad \frac{r_{g2}}{r_{g1}} = \frac{r_{02}}{r_{01}}$$

Από τις δύο παραπάνω εξισώσεις προκύπτει ότι η κάθετος στο σημείο επαφής περνάει πάντα από το σημείο κύλισης δηλαδή το σημείο C που είναι το σημείο επαφής των αρχικών κύκλων. Αν ο κύκλος κύλισης διαφέρει από τον αρχικό κύκλο του τροχού, θα πρέπει να διέρχεται από το σημείο επαφής των κύκλων η κοινή κάθετος N-N για να ισχύει ο βασικός νόμος της οδόντωσης.

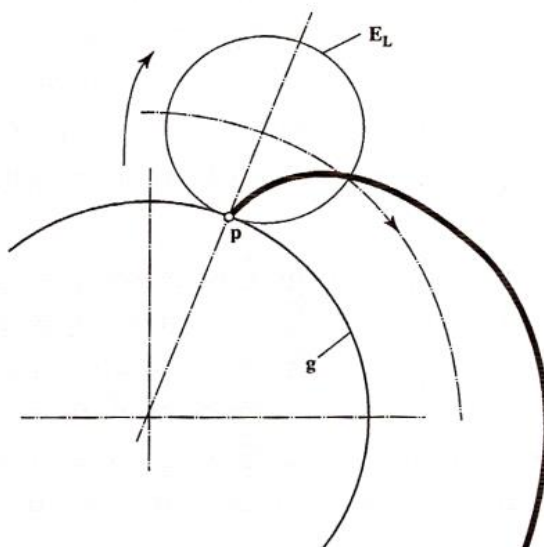
## 1.4 Είδη οδοντώσεων

Κατά την κατασκευή των οδοντώσεων επιλέγονται κάποιες γεωμετρικές καμπύλες, τις οποίες ακολουθούν οι μορφές των κατατομών των οδοντών.

### 1.4.1 Κυκλοειδής οδόντωση

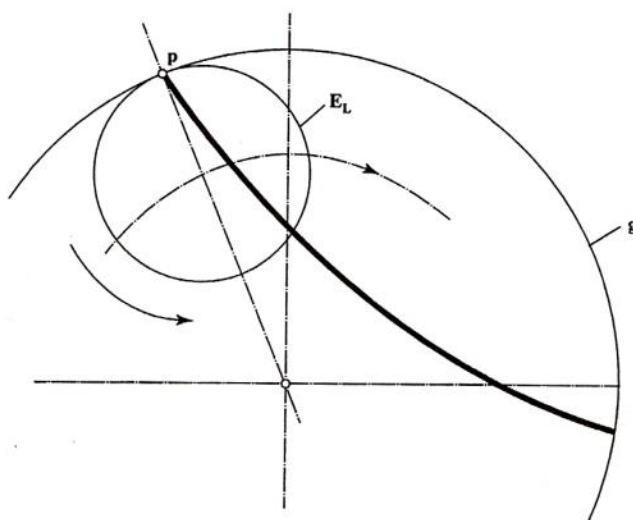
Κυκλοειδής είναι η καμπύλη που διαγράφεται από κάποιο συγκεκριμένο σημείο ενός κύκλου που κυλίετέ χωρίς να ολισθαίνει, πάνω σε μια τροχιά. Ανάλογα με το είδος της τροχιάς που κυλίετέ ο κύκλος, παράγονται τα παρακάτω είδη κυκλοειδών καμπυλών [12].

**Επικυκλοειδής** είναι η καμπύλη που δημιουργείται από την κύλιση ενός κύκλου ( $E_L$ ) πάνω στην περιφέρεια ενός άλλου κύκλου ο οποίος καλείται ο βασικός κύκλος ( $g$ ) (Εικόνα 1.6).



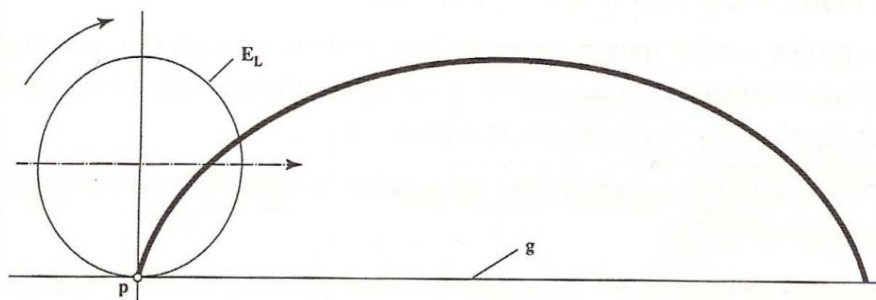
Εικόνα 1.6: Κατασκευή επίκυκλοειδούς καμπύλης [11].

**Υποκυκλοειδής** είναι η καμπύλη που δημιουργείται από την κύλιση ενός κύκλου ( $E_L$ ) μέσα στην περιφέρεια ενός άλλου κύκλου ο οποίος καλείται ο βασικός κύκλος ( $g$ ) (Εικόνα 1.7)



Εικόνα 1.7: Κατασκευή υποκυκλοειδούς καμπύλης [11].

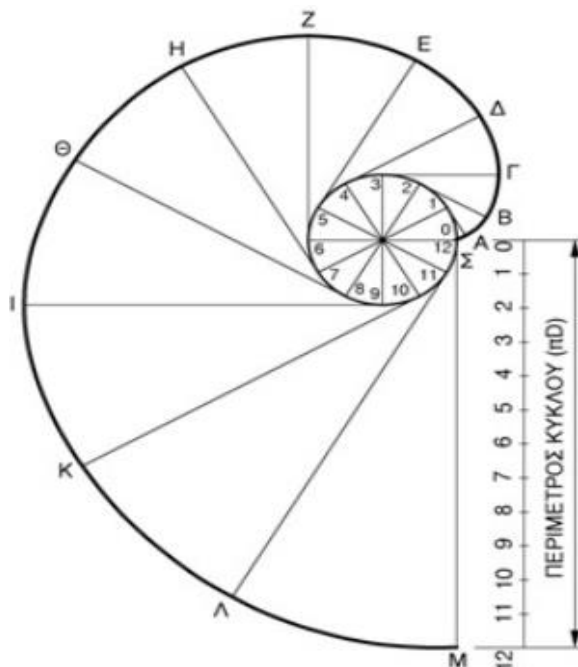
Ορθοκυκλοειδής είναι η καμπύλη που δημιουργείται από την κύλιση ενός κύκλου ( $E_L$ ) πάνω σε μία ευθεία ( $g$ ) (Εικόνα 1.8).



Εικόνα 1.8: Κατασκευή ορθοκυκλοειδούς καμπύλης [11].

#### 1.4.2 Οδόντωση εξελιγμένης

Εξελιγμένη ονομάζεται η καμπύλη που διαγράφεται από το άκρο ενός σχοινιού το οποίο ξετυλίγεται από ένα κύκλο. Για την κατασκευή της εξελιγμένης καμπύλης πρέπει πρώτα να χωριστεί ο κύκλος σε κάποια ίσια τμήματα. Στα σημεία αυτά σχεδιάζονται οι εφαπτόμενες ευθείες τους οι οποίες έχουν μήκος όσο και το πλήθος των τόξων. Δηλαδή στο σημείο 4, για παράδειγμα, το μήκος της εφαπτόμενης ευθείας θα έχει μήκος 3 φορές το μήκος του τόξου και έτσι θα προσδιοριστεί το σημείο Δ. Ακολουθώντας τον ίδια διαδικασία προσδιορίζονται όλα τα σημεία της καμπύλης [11] (Εικόνα 1.9).



Εικόνα 1.9: Κατασκευή εξελιγμένης καμπύλης [12].

Για τα σημεία πάνω στην περιφέρεια του κύκλου μπορούμε να βρούμε τις συντεταγμένες (X,Y) από τις συναρτήσεις (1), (2) οι οποίες προκύπτουν από τη χρήση τριγωνομετρίας.

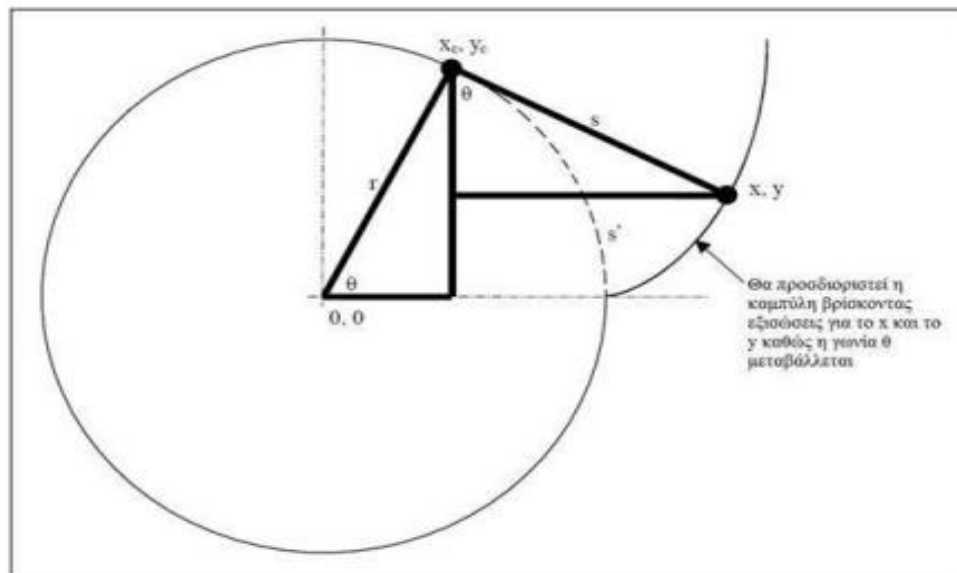
$$X_c = r \cdot \cos\theta \quad (1)$$

$$Y_c = r \cdot \sin\theta \quad (2)$$

Για τα σημεία πάνω στην καμπύλη μπορούμε να βρούμε τις συντεταγμένες (X,Y) από τις συναρτήσεις (3), (4) οι οποίες προκύπτουν από τη χρήση τριγωνομετρίας.

$$X = X_c + s \cdot \sin\theta \quad (3)$$

$$Y = Y_c - s \cdot \cos\theta \quad (4)$$



Εικόνα 1.10 Προσδιορισμός της εξελιγμένης καμπύλης [12].

## 1.5 Υλικά και μέθοδοι κατασκευής

### 1.5.1 Υλικά οδοντωτών τροχών

Ένα σημαντικό θέμα που προκύπτει κατά τη δημιουργία ενός οδοντωτού τροχού είναι το υλικό κατασκευής που θα χρησιμοποιηθεί. Οι κυριότεροι παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψιν για την επιλογή υλικού είναι η αντοχή, η ανθεκτικότητα και το κόστος που αφορά το κόστος κατασκευής και το κόστος υλικού. Έτσι κατά την επιλογή του γίνεται επιλογή του συνδυασμού που καλύπτει καλύτερα τις φυσικές ιδιότητες που απαιτούνται με το μικρότερο δυνατό κόστος. Οι οδοντωτοί τροχοί κατασκευάζονται από μία ευρεία γκάμα υλικών όπως χάλυβα, ανοξείδωτο χάλυβα, ορείχαλκο, χαλκό, χυτοσίδηρο, όλκιμο σίδηρο, αλουμίνιο, κονιοποιημένα μέταλλα και πλαστικά. Ο χάλυβας αποτελεί το υλικό που χρησιμοποιείται στις περισσότερες περιπτώσεις μιας και τις περισσότερες φορές καλύπτει όλες τις απαιτήσεις στο μικρότερο δυνατό κόστος [9].

Ο χυτοσίδηρος είναι ένα υλικό το οποίο χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο στα εξαρτήματα των μηχανών, λόγω της ανθεκτικότητας του στη σκουριά, του χαμηλού κόστους αγοράς και του χαμηλού κόστους κατά την κατεργασία του. Ο χυτοσίδηρος είναι ένα κράμα σιδήρου με άνθρακα του οποίου η περιεκτικότητα είναι μεγαλύτερη από 2,1% κατά βάρος. Ανάλογα με την περιεκτικότητα σε άνθρακα μεταβάλλεται η αντοχή και η ανθεκτικότητά του. Το μειονέκτημα του χυτοσιδήρου είναι ότι

επειδή δεν αποτελείται από καθαρό σίδηρο η κάθε παρτίδα διαφέρει από τις άλλες, ως προς τη σύσταση σε ένα μικρό βαθμό.

Ο ανοξείδωτος χάλυβας χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο στη χύτευση οδοντωτών τροχών. Είναι ένα κράμα σιδήρου, χρωμίου και άνθρακα με ελάχιστη περιεκτικότητα χρωμίου 10,5% κάτι που τον καθιστά εξαιρετικά ανθεκτικό στην οξείδωση. Για αυτό το λόγο σε μηχανήματα επεξεργασίας τροφίμων χρησιμοποιούνται οδοντωτοί τροχοί από ανοξείδωτο χάλυβα . Και σε αυτό το κράμα ανάλογα με τη σύσταση του μεταβάλλεται η αντοχή του και η ανθεκτικότητα του. Λόγω της υψηλής ανθεκτικότητας τους και της μεγάλης μηχανικής αντοχής τους είναι πιο σκληροί από τους κοινούς χάλυβες, κάτι που τους καθιστά δυσκατέργαστους.

Ο χάλυβας και τα κράματα του είναι τα πιο συνηθισμένα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή οδοντωτών τροχών. Αυτό συμβαίνει επειδή ο χάλυβας έχει υψηλή αντοχή και ανθεκτικότητα με χαμηλό κόστος αγοράς και σε πλήθος κραμάτων του χαμηλό κόστος κατεργασίας. Ο χάλυβας αποτελεί τη βάση για ένα μεγάλο πλήθος κραμάτων τα οποία κατατάσσονται σε διάφορες κατηγορίες με βάση την χημική τους σύσταση και την κρυσταλλική τους δομή.

#### **Ανθρακούχοι ή κοινοί χάλυβες**

Είναι οι χάλυβες οι οποίοι περιέχουν άνθρακα έως 2,06% , μαγγάνιο έως 1,65%, χαλκό έως 0,6% και πυρίτιο έως 0,6% κατά βάρος. Ανάλογα με την περιεκτικότητα σε άνθρακα οι ανθρακούχοι χάλυβες διακρίνονται στις παρακάτω υποκατηγορίες.

- Χάλυβες χαμηλού άνθρακα με περιεκτικότητα σε άνθρακα μικρότερη από 0,30% κατά βάρος
- Χάλυβες μέτριου άνθρακα με περιεκτικότητα σε άνθρακα από 0,31% έως 0,60% κατά βάρος
- Χάλυβες υψηλού άνθρακα με περιεκτικότητα σε άνθρακα από 0,61% έως 1,00% κατά βάρος
- Χάλυβες πολύ υψηλού άνθρακα με περιεκτικότητα σε άνθρακα από 1,01% έως 2,06% κατά βάρος

#### **Κραματωμένοι χάλυβες**

Είναι οι χάλυβες που είναι κράματα με βάση το σίδηρο και άλλα μέταλλα σε σημαντική περιεκτικότητα. Μερικοί από αυτούς τους χάλυβες είναι:

- Χάλυβες χαμηλής κραμάτωσης που περιέχουν συνήθως μολυβδαίνιο, χρώμιο, βανάδιο, νικέλιο και αλουμίνιο σε διάφορες περιεκτικότητες που όλες μαζί αθροιστικά δεν ξεπερνάνε το 10% κατά βάρος.
- Χάλυβες υψηλής κραμάτωσης που περιέχουν συνήθως μολυβδαίνιο, χρώμιο, άνθρακα, νικέλιο, βανάδιο και βολφράμιο σε διάφορες περιεκτικότητες που όλες μαζί αθροιστικά ξεπερνάνε το 10% κατά βάρος.

Ανάλογα τις απαιτήσεις που υπάρχουν σε κάθε περίπτωση γίνεται η επιλογή του υλικού. Για ένα σύστημα με μικρή ισχύ και μικρό αριθμό στροφών γίνεται επιλογή χυτοσίδηρου ή κάποιου μαλακού χάλυβα. Για περισσότερη ισχύ και αριθμό στροφών γίνεται επιλογή χυτοσίδηρου και χάλυβα αλλά με μεγαλύτερη αντοχή στην καταπόνηση. Τέλος για υψηλές απαιτήσεις σε στρόφες και αντοχή γίνεται χρήση χαλύβων οι οποίοι έχουν τεθεί σε θερμική επεξεργασία (βαφή). Σε περιπτώσεις που είναι απαραίτητη η ελαχιστοποίηση του βάρους επιλέγονται κράματα αλουμινίου παρά το αυξημένο κόστος. Σε περιπτώσεις που είναι απαραίτητη η μικρή ηχορύπανση χωρίς μεγάλες μηχανικές αντοχές γίνεται χρήση πλαστικού για την κατασκευή των τροχών. Τέλος σε οξειδωτικό και

διαβρωτικό περιβάλλον γίνεται χρήση οδοντωτών τροχών από σύνθετες ρητίνες και κεραμικά. Για την κατασκευή μεγάλων οδοντωτών τροχών πολλές φορές η στεφάνη επίστεψης κατασκευάζεται από υλικό χαμηλής ποιότητας σε αντίθεση με το χάλυβα της οδόντωσης που είναι υψηλής ποιότητας με δυνατότητα θερμικής επεξεργασίας. Όσον αφορά τα πινιόν, το υλικό από το οποίο κατασκευάζονται είναι υψηλής αντοχής λόγω των πολλών στροφών και του μεγάλου φορτίου για αυτό πάντα έχουν μεγαλύτερη αντοχή σε σχέση με την κορώνα.

### 1.5.2 Μέθοδοι κατασκευής οδοντώσεων

Οι μέθοδοι κατασκευής οδοντώσεων διαφέρουν ανάλογα με το υλικό κατασκευής αλλά και τις απαιτήσεις που υπάρχουν. Κατά κύριο λόγο κατασκευάζονται σε εργαλειομηχανές με διάφορους τρόπους που θα παρουσιαστούν παρακάτω.

#### 1.5.2.1 Κατασκευή οδοντώσεων με χύτευση

##### **Χύτευση σε άμμο**

Η χύτευση σε άμμο ενδείκνυται για οδοντωτούς τροχούς από χυτοσίδηρο το μέγεθος των οποίων είναι από μεσαίο έως πολύ μεγάλο. Το μειονέκτημα κατά τη χύτευση σε άμμο είναι ότι δεν υπάρχει ακρίβεια στις διαστάσεις, όμως τις περισσότερες φορές το χυτό κατεργάζεται σε εργαλειομηχανές για να του δοθούν οι διαστάσεις που απαιτούνται. Το πλεονέκτημα είναι το μικρό κόστος της μεθόδου για αυτό επιλέγεται για την παραγωγή μικρού αριθμού τεμαχίων (Εικόνα 1.11).



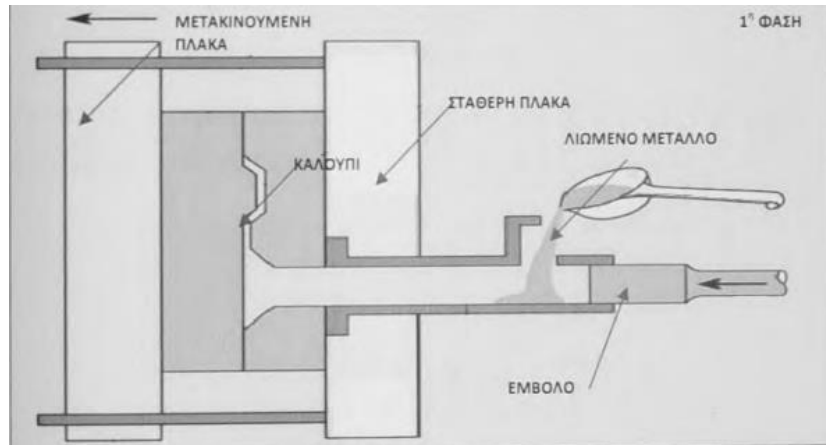
Εικόνα 1.11 Κατασκευή οδοντωτού τροχού με χύτευση σε άμμο.

##### **Χύτευση υπό πίεση (Die Casting – Injection Molding)**

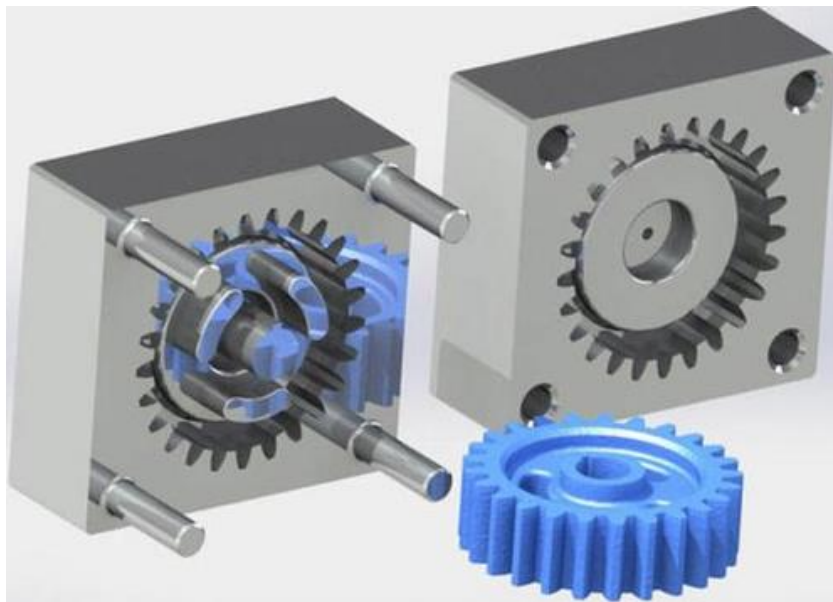
Κατά τη χύτευση υπό πίεση κατασκευάζονται οδοντωτοί τροχοί από χυτοσίδηρο, αλουμίνιο αλλά και χάλυβες κραμάτων που περιέχουν νικέλιο, μολυβδαίνιο, κασσίτερο και χρώμιο. Αν και το αποτέλεσμα στη συγκεκριμένη διαδικασία είναι πολύ καλύτερο σε σχέση με το αποτέλεσμα από τη χύτευση σε άμμο, σε μερικές περιπτώσεις στα χυτά πρέπει να πραγματοποιηθούν διαδικασίες αποπεράτωσης για τη βελτίωση τους. Η μηχανή για τη χύτευση υπό πίεση αποτελείται από δύο πλάκες, μία σταθερή και μία που μετακινείται, οι οποίες αποτελούν το καλούπι στο οποίο εισέρχεται το υλικό και αποκτά το σχήμα του ενώ παράλληλα το συμπιέζει το έμβολο (Εικόνα 1.12). Η συγκεκριμένη διαδικασία χύτευσης είναι



αρκετά οικονομική ειδικά όταν πρόκειται για μεγάλο πλήθος παραγόμενων τεμαχίων και αυτό γιατί με το ίδιο καλούπι μπορούν να διαμορφωθούν πολλοί οδοντωτοί τροχοί. Η συγκεκριμένη διαδικασία έχει ακόμα μεγαλύτερη επιτυχία για την κατασκευή οδοντωτών τροχών από πλαστικό μιας και σε αυτή την περίπτωση τα τεμάχια που παράγονται δημιουργούν μηδενική φθορά στο καλούπι και το αποτέλεσμα είναι τέτοιο που δε χρειάζεται κατεργασία σε κάποια εργαλειομηχανή(Εικόνα1.13).



Εικόνα 1.12 Κατασκευή οδοντωτού τροχού με χύτευση υπό πίεση [13].



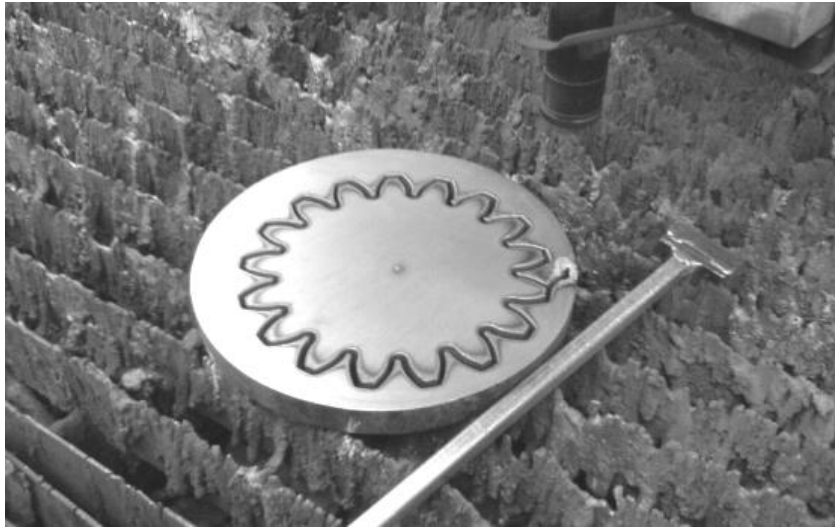
Εικόνα 1.13 Καλούπι για πλαστικό οδοντωτό τροχό με χυτόπρεσα.

#### 1.5.2.2 Κατασκευή οδοντώσεων με κοπή σε παντογράφο

##### Με τη χρήση πλάσματος

Η κατασκευή οδοντώσεων με τη χρήση πλάσματος σε παντογράφο έχει χρήση στους μετωπικούς οδοντωτούς τροχούς με ευθεία οδόντωση. Χρησιμοποιείται σε μεγάλους οδοντωτούς τροχούς που δεν απαιτούν μεγάλη ακρίβεια στις διαστάσεις χωρίς να χρειάζεται

κάποια επιπλέον επεξεργασία. Σε μικρότερες διαστάσεις χρειάζεται αποπεράτωση σε κάποια εργαλειομηχανή αν και λόγω της κοπής με το πλάσμα στα σημεία της κοπής το μέταλλο έχει υποστεί επιφανειακή βαφή και είναι αρκετά δύσκολη η κατεργασία του (Εικόνα 1.14).



Εικόνα 1.14 Κατασκευή οδοντωτού τροχού με χρήση πλάσματος σε παντογράφο.

### **Με τη χρήση νερού**

Η συγκεκριμένη διαδικασία έχει πολλά κοινά με την προηγούμενη. Η κατασκευή οδοντώσεων με χρήση της μεθόδου της υδροκοπής σε παντογράφο έχει χρήση στους μετωπικούς οδοντωτούς τροχούς με ευθεία οδόντωση. Χρησιμοποιείται σε μεγάλους και μεσαίους οδοντωτούς τροχούς που δεν απαιτούν μεγάλη ακρίβεια στις διαστάσεις χωρίς να χρειάζεται κάποια επιπλέον κατεργασία. Σε μικρότερες διαστάσεις χρειάζεται αποπεράτωση σε κάποια εργαλειομηχανή όμως σε αντίθεση με την προηγούμενη διαδικασία τα άκρα δεν έχουν υποστεί επιφανειακή βαφή και έτσι η αποπεράτωση είναι εύκολη. Επιπλέον η χρήση αυτής της μεθόδου μπορεί να γίνει σε όλα τα είδη μετάλλων και σε ένα μεγάλο πλήθος υλικών (Εικόνα 1.15).



Εικόνα 1.15 Κατασκευή οδοντωτού τροχού με χρήση νερού σε παντογράφο.

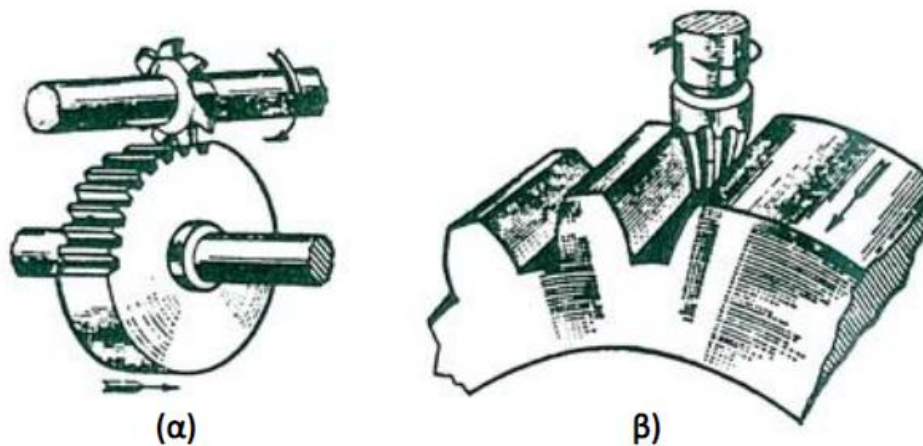
#### 1.5.2.3 Κατασκευή οδοντώσεων σε εργαλειομηχανή

Οι οδοντώσεις κατασκευάζονται, κατά κύριο λόγο, σε εργαλειομηχανές με τη μέθοδο της αφαίρεσης υλικού. Κατασκευάζοντας τις οδοντώσεις σε εργαλειομηχανές παράγονται οδοντωτοί τροχοί με μεγάλη ακρίβεια στις διαστάσεις τους και σε μικρό χρονικό διάστημα σε μερικές μεθόδους.

##### **Κατασκευή οδοντώσεων σε φρέζα με εργαλείο μορφής και διαιρέτη (Gear Milling)**

Σε αυτή τη διαδικασία η κατεργασία γίνεται σε κάθε αυλάκωση ξεχωριστά και όχι παράλληλα σε πολλές. Το κοπτικό εργαλείο έχει ίδια καμπύλη με αυτή που έχει ο οδοντωτός τροχός για να μπορεί να επιτευχθεί η επιθυμητή καμπύλη της οδόντωσης. Η μορφή που μπορεί να έχει είναι είτε δισκοειδής είτε κονδυλίου. Κατά τη διάρκεια της περιστροφής του, το κοπτικό αφαιρεί υλικό από το δοκίμιο μέχρι να σχηματίσει ολόκληρη την οδόντωση ενώ το δοκίμιο παραμένει ακίνητο. Αφού πραγματοποιηθεί η κοπή της πρώτης αυλάκωσης γίνεται περιστροφή του δοκιμίου από το διαιρέτη και ξεκινάει η κοπή της δεύτερης αυλάκωσης. Αυτό επαναλαμβάνεται για όλες τις αυλακώσεις του τροχού.

Αυτή η διαδικασία κατεργασίας είναι η πιο απλή και η πιο γνωστή από παλιά γιατί μπορεί να γίνει σε φρέζα. Το μειονέκτημα της συγκεκριμένης διαδικασίας είναι ο χρόνος μιας και είναι αρκετά αργή στην παραγωγή για αυτό το λόγο επιλέγεται για την παραγωγή μικρού αριθμού οδοντωτών τροχών. Επιπλέον οδοντωτοί τροχοί με το ίδιο module μπορούν να έχουν διαφορετικό πλήθος οδόντων και κατ' επέκταση διαφορετικό διάκενο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να χρειάζονται διαφορετικά κοπτικά εργαλεία για κάθε module και αριθμό οδόντων έτσι καθιστά αρκετά δαπανηρή αυτή τη διαδικασία (Εικόνα 1.16).



Εικόνα 1.16 Κατασκευή οδοντωτού τροχού με εργαλείο μορφής και διαιρέτη.

### **Κατασκευή με εργαλειομηχανή CNC**

Οι εργαλειομηχανές χωρίζονται ως προς το βαθμό αυτοματισμού σε τρεις μεγάλες κατηγορίες, τις συμβατικές, τις ημιαυτόματες και τις αυτόματες. Στις συμβατικές οι κινήσεις και η τροφοδοσία γίνεται χειροκίνητα, στις ημιαυτόματες οι κινήσεις γίνονται αυτοματοποιημένα ενώ στις αυτόματες κινήσεις και τροφοδοσία γίνονται αυτόματα. Τις τελευταίες δεκαετίες οι ημιαυτόματες και οι αυτόματες εργαλειομηχανές εξελίσσονται με ραγδαίους ρυθμούς και αντικαθιστούν τις συμβατικές. Οι εργαλειομηχανές χωρίζονται και βάση των αξόνων κατεργασίας στους οποίους μπορούν να κινούνται στο χώρο.

### **Μηχανές 2 και 2.5 αξόνων**

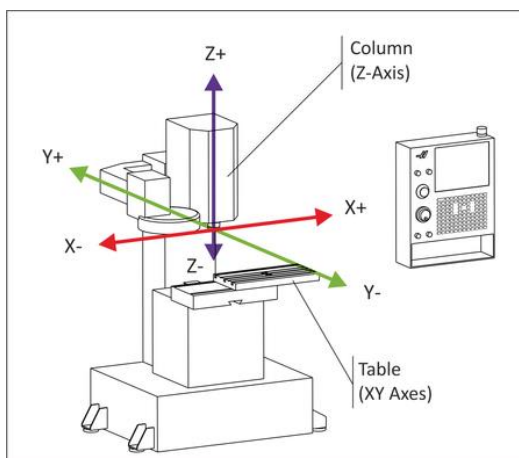
Στις εργαλειομηχανές 2 αξόνων είναι εφικτή η κίνηση σε δύο άξονες ταυτόχρονα. Είναι οι πιο απλές CNC εργαλειομηχανές και σε αυτές ανήκουν και οι παντογράφοι που έγινε αναφορά πιο πάνω. Στις εργαλειομηχανές 2.5 αξόνων είναι εφικτή η κίνηση στους τρεις άξονες X,Y και Z όμως μόνο οι X,Y μπορούν να πραγματοποιήσουν ταυτόχρονη κίνηση (Εικόνα 1.17).



Εικόνα 1.17 Ημιαυτόματη εργαλειομηχανή 2 αξόνων.

### **Μηχανές 3 αξόνων**

Στις μηχανές τριών αξόνων είναι εφικτή η κίνηση στους 3 άξονες X,Y και Z ταυτόχρονα. Αυτές οι μηχανές αποτελούν την πιο συχνή επιλογή διότι μπορούν να κατασκευάσουν μεγάλο εύρος αντικειμένων και πάνω σε αυτές μπορούν να προστεθούν εξαρτήματα για να τις κάνουν πολυαξονικές (Εικόνα 1.18) .



Εικόνα 1.18 Εργαλειομηχανή τριών αξόνων.

#### **Μηχανές άνω των 4 αξόνων**

Οι εργαλειομηχανές των τεσσάρων και άνω αξόνων έχουν τη δυνατότητα ταυτόχρονης κίνησης στους άξονες X, Y και Z. Επιπλέον μπορούν να εκτελέσουν περιστροφή γύρω από τον κάθε άξονα ανάλογα με τους βαθμούς ελευθερίας που έχουν. Οι άξονες που μπορούν να εκτελέσουν περιστροφή είναι οι A, B, C που αντιστοιχούν στους X, Y και Z. Πλέον κάποια προηγμένα κέντρα κατεργασίας έχουν μέχρι και 12 άξονες που μπορούν να κινηθούν. Προφανώς αυτές οι εργαλειομηχανές περιορίζονται στην κατασκευή πολύπλοκων αντικειμένων λόγω του υψηλού κόστους απόκτησης που έχουν.

Οι εργαλειομηχανές πέντε αξόνων αποτελούν κέντρα κατεργασίας τα οποία μπορούν να κατασκευάσουν αντικείμενα με πολύπλοκη γεωμετρία και έχουν εξ' αρχής ελευθερία κινήσεων στους πέντε άξονες. Όμως είναι συχνό φαινόμενο σε εργαλειομηχανές τριών αξόνων να προσαρμόζουν κάποια εξαρτήματα για να τις κάνουν 5 αξόνων. Σε αυτές τις περιπτώσεις προκύπτουν εργαλειομηχανές είτε με (3+2) άξονες δηλαδή μπορεί να γίνεται ταυτόχρονη κίνηση στους 3 ή στους 2 άξονες τότε σε όλους ταυτόχρονα είτε να γίνεται ταυτόχρονη κίνηση και στους πέντε άξονες. Μία τέτοια εργαλειομηχανή είναι αυτή που υπάρχει στο Διατμηματικό εργαστήριο του Πολυτεχνείου Κρήτης η οποία χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση των κατεργασιών που θα παρουσιαστούν στα επόμενα κεφάλαια (Εικόνα 1.19).



Εικόνα 1.19 Κέντρο κατεργασίας Haas VF-2 πέντε αξόνων.

### **Κατασκευή οδοντώσεων σε γραναζοκόπτη**

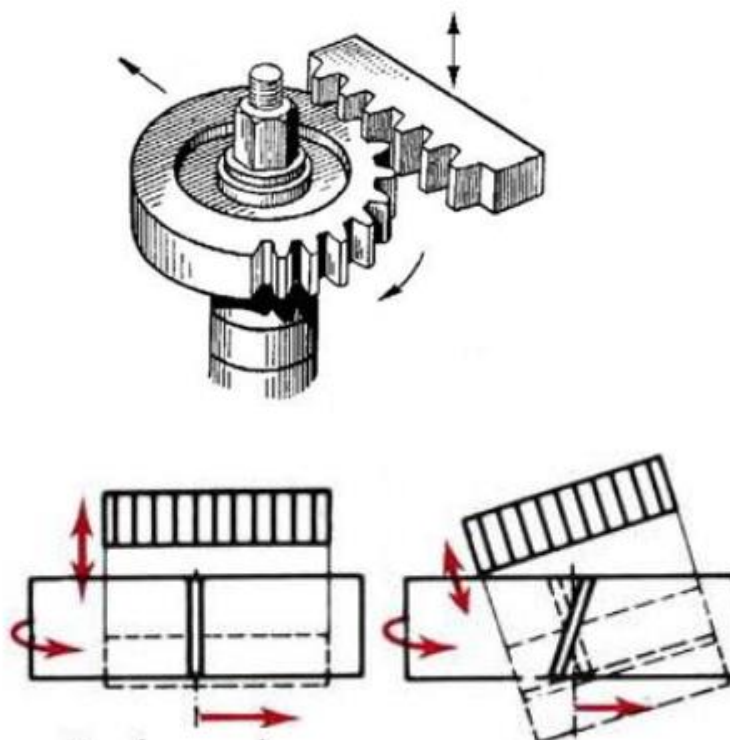
Η κατασκευή οδοντωτών τροχών σε γραναζοκόπτες είναι η πιο συνηθισμένη τακτική επειδή επιτυγχάνεται μεγάλη ακρίβεια σε σύντομο χρονικό διάστημα. Το κόστος απόκτησης για την απόκτηση κοπτικών είναι μικρότερο σε σχέση με τις φρέζες επειδή τα κοπτικά διαφέρουν μόνο ως προς το module ανεξάρτητα από το πλήθος των οδόντων [17].

### **Με τη μέθοδο Maag**

Στη συγκεκριμένη μέθοδο το κοπτικό έχει τη μορφή οδοντωτού κανόνα και πραγματοποιεί ευθύγραμμη παλινδρομική κίνηση. Σε αυτή τη μέθοδο όπως και στην προηγούμενη δεν πραγματοποιείται ταυτόχρονη κίνηση στο κοπτικό και στο δοκίμιο. Το κοπτικό πραγματοποιεί την ευθύγραμμη του κίνηση και όταν την ολοκληρώσει πραγματοποιείται περιστροφή του δοκιμίου. Η βασική διαφορά με την προηγούμενη μέθοδο είναι ότι η κοπή των οδόντων γίνεται σε ομάδες και έτσι δημιουργούνται οι κατατομές της εξελιγμένης. Επιπλέον απαιτείται ένας κανόνας για κάθε modul ανεξάρτητα από το πλήθος των δοντιών που θα έχει ο τροχός. Για την κατασκευή ελικοειδούς οδόντωσης πρέπει να τοποθετηθεί με την κατάλληλη κλίση το δοκίμιο.

Το κοπτικό εργαλείο είναι κατασκευασμένο από χάλυβα ο οποίος έχει υποστεί ολική βαφή και οι ακμές του έχουν τις ιδιότητες κοπτικού εργαλείου. Αυτό καθιστά τον κοπτήρα αρκετά οικονομικό στην αγορά του και τροχίζεται αρκετά εύκολα όταν οι ακμές του έχουν φθαρεί από τη χρήση. Το βασικό μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι κατασκευάζονται μόνο εξωτερικές οδοντώσεις (Εικόνα 1.12).





Εικόνα 1.20 Κατασκευή οδοντωτού τροχού με τη μέθοδο Maag [13].

### Με τη μέθοδο Fellows

Η μέθοδος Fellows έχει παρόμοια μέθοδο κοπής με την προηγούμενη, με τη διαφορά ότι το κοπτικό εργαλείο είναι οδοντωτός τροχός και όχι κανόνας. Το κοπτικό εκτελεί ευθύγραμμη παλινδρομική κίνηση και περιστρέφεται με την ίδια γωνιακή ταχύτητα που περιστρέφεται ο οδοντωτός τροχός. Έτσι αφαιρεί υλικό από τον τροχό και δημιουργεί τις αυλακώσεις. Το διαφορετικό σχήμα που έχει το κοπτικό εργαλείο δίνει τη δυνατότητα κατασκευής και εσωτερικών οδοντώσεων (Εικόνα 1.21).

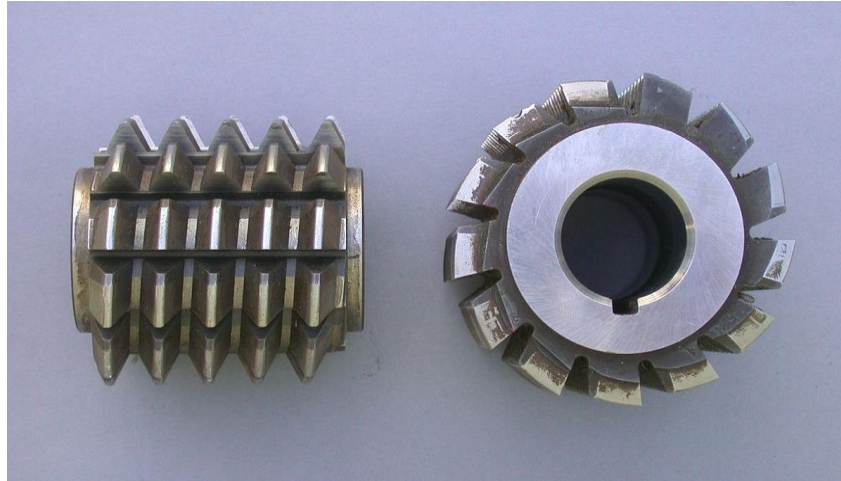


Εικόνα 1.21 Κατασκευή οδοντωτού τροχού με τη μέθοδο Fellows.

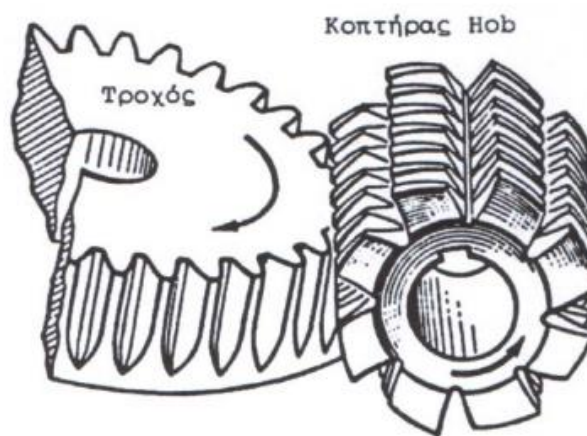
### Μέθοδος Hobbing

Η κατασκευή οδοντωτού τροχού με τη χρήση κοπτήρα Hob είναι η πιο διαδεδομένη από όλες τις μεθόδους. Η κοχλιοειδής φρέζα ή hob είναι ένα είδος ατέρμονα κοχλία που στην περιφέρεια του φέρει αύλακες και όδοντες. Οι όδοντες είναι αυτοί που πραγματοποιούν την αφαίρεση του υλικού από τον τροχό ενώ οι αύλακες βοηθούν τη

διείσδυση του υγρού κοπής και την απομάκρυνση των αποβλήτων (Εικόνα 1.22). Έχουν μία ή περισσότερες αρχές και είναι κατασκευασμένοι από ταχυάλυβα ή καρβίδιο. Ο κοπτήρας πραγματοποιεί δύο κινήσεις, μία γύρω από τον άξονα συμμετρίας του και μία παράλληλη με τον άξονα που ορίζουν οι ακμές των οδόντων ενώ παράλληλα κινείται ο τροχός γύρω από τον άξονα συμμετρίας του. Έτσι ο οδοντωτός τροχός και ο κοπτήρας hob κατά τη διάρκεια της κατεργασίας περιστρέφονται με σταθερή σχέση μετάδοσης (Εικόνα 1.23).



Εικόνα 1.22 Κοπτήρας Hob.



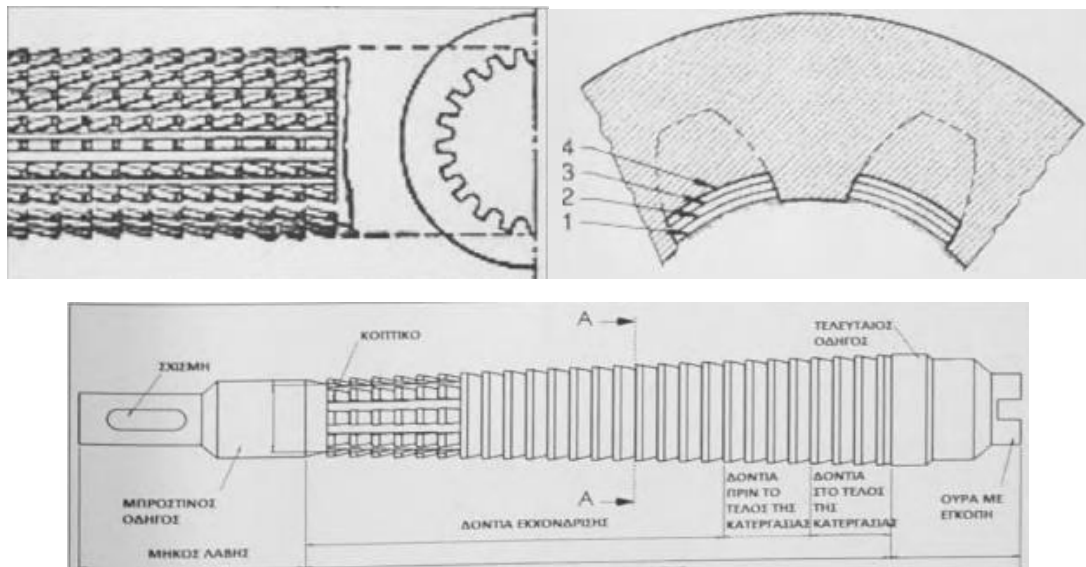
Εικόνα 1.23 Κατασκευή οδοντωτού τροχού με τη μέθοδο Hobbing [13].

#### 1.5.2.4 Κατασκευή οδοντώσεων με αφαίρεση υλικού (Broaching)

Αυτή η διαδικασία είναι αρκετά διαδεδομένη για τη διάνοιξη εσωτερικών οδοντώσεων σε τροχούς μικρής διαμέτρου και είναι από τις λίγες διαδικασίες με τις οποίες μπορεί να δημιουργηθεί μικρή εσωτερική οδόντωση. Από την οπή που έχει ο τροχός εισέρχεται και εξέρχεται το κοπτικό εργαλείο και έτσι δίνει τη μορφή του στον τροχό. Όλοι οι όδοντες κατεργάζονται ταυτόχρονα, γεγονός που αυξάνει ραγδαία την παραγωγικότητα για



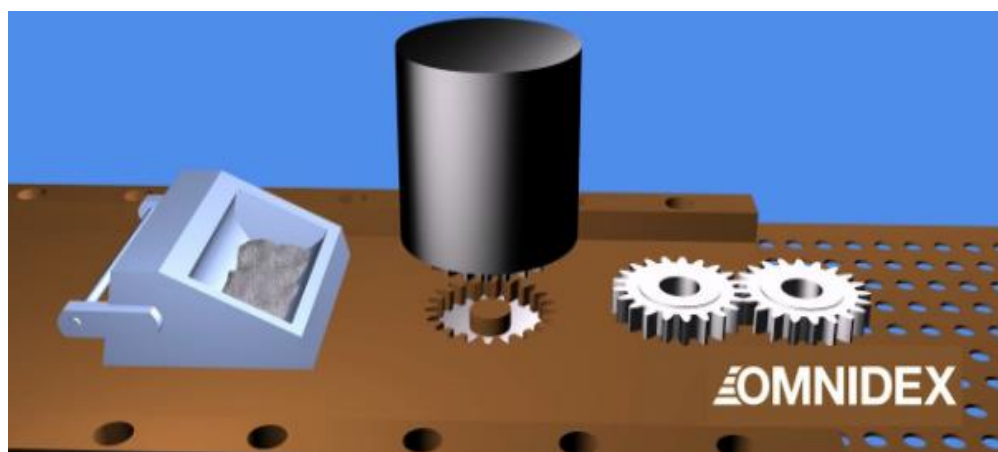
αυτό το λόγο αυτή η μέθοδος ενδείκνυται για την κατασκευή πολλών τεμαχίων (Εικόνα 1.24).



Εικόνα 1.24 Κατασκευή οδοντωτού τροχού με τη μέθοδο Broaching [13].

#### 1.5.2.4 Κατασκευή οδοντωτών τροχών με Κονιομεταλλουργία (Sintering)

Σε αυτή τη μέθοδο αναμειγνύεται σκόνη από διάφορα υλικά μαζί με υγρό και αφού τοποθετηθεί σε καλούπι με σχήμα οδοντωτού τροχού συμπιέζεται από πρέσα και θερμαίνεται σε κλίβανο σε υψηλή θερμοκρασία. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η σκόνη από τα υλικά να γίνεται ένα σώμα με υψηλή αντοχή. Με αυτή τη μέθοδο μπορούν να φτιαχτούν όλων των ειδών οι οδοντωτοί τροχοί αλλά λόγω του μεγάλου κόστους χρησιμοποιείται μόνο για παραγωγή μεγάλου πλήθους οδοντωτών τροχών (Εικόνα 1.25).



Εικόνα 1.25 Κατασκευή οδοντωτού τροχού με τη μέθοδο της κονιομεταλλουργίας [16].

### 1.6 Μέθοδοι αποπεράτωσης οδοντωτών τροχών

Οι οδοντωτοί τροχοί που κατασκευάζονται με τις παραπάνω μεθόδους έχουν αρκετά καλές επιφάνειες. Όμως σε κάποιες περιπτώσεις που οι τροχοί περιστρέφονται με μεγάλες ταχύτητες, δέχονται μεγάλα φορτία ή συμβαίνουν και τα 2, είναι απαραίτητο μετά την κατασκευή του τροχού να υποβληθεί σε ακόμα μία κατεργασία για να μειωθεί η τραχύτητα της επιφάνειας του. Επιπλέον σε κάποιες περιπτώσεις που οι οδοντωτοί τροχοί δέχονται θερμική επεξεργασία (σκλήρυνση), παραμορφώνονται και είναι απαραίτητη η λείανση τους με κάποια από τις παρακάτω μεθόδους [13]

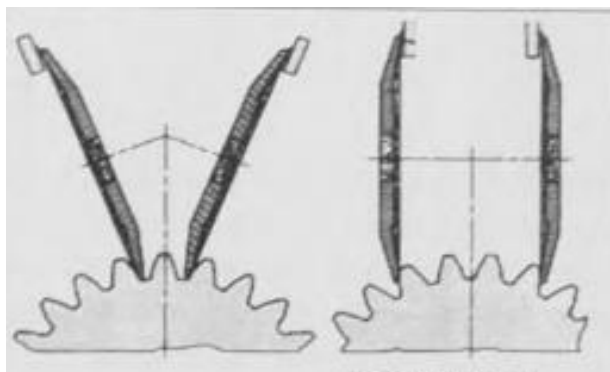
### 1.6.1 Λείανση (Grinding-Honing)

Η λείανση είναι μία κατεργασία η οποία χρησιμοποιείται για να αποκτήσουν οι όδοντες τις κατάλληλες διαστάσεις καθώς και για τη μείωση της τραχύτητας. Όταν υπάρχουν μεγάλες διαφορές από το τελικό προϊόν όσον αφορά τις διαστάσεις χρησιμοποιείται αυτή η διαδικασία μιας και είναι η μόνη που μπορεί να αφαιρέσει αρκετό υλικό. Σημαντική χρήση έχει σε μεγάλους τροχούς που έχουν υποστεί θερμική επεξεργασία, αφού όσο μεγαλύτερος είναι ο οδοντωτός τροχός τόσο μεγαλύτερες είναι οι παραμορφώσεις του. Όμως επειδή αυτές οι κατεργασίες απαιτούν αρκετό χρόνο κατεργασίας και λόγω του αυξημένου κόστους γίνεται προσπάθεια για όσο το δυνατόν περισσότερη αφαίρεση υλικού στις εργαλειομηχανές. Υπάρχουν τρεις μέθοδοι λείανσης σε οδοντωτούς τροχούς στις οποίες θα γίνει ανάλυση παρακάτω.

#### 1.6.1.1 Λείανση με ίσιο λειαντικό τροχό

Σε αυτή τη μέθοδο η λείανση επιτυγχάνεται μέσω ενός λεπτού δίσκου του οποίου η περιφέρεια είναι υπό κλίση και βρίσκει εφαρμογή σε οδοντωτούς τροχούς με ευθεία ή ελικοειδή οδόντωση. Ο τροχός περιστρέφεται με μεγάλη ταχύτητα γύρω από τον άξονα συμμετρίας του και όταν ολοκληρωθεί η λείανση στη μία αυλάκωση τότε ο οδοντωτός τροχός περιστρέφεται και συνεχίζεται η λείανση στην επόμενη. Η μέθοδος αυτή θεωρείται ασυνεχής και για αυτό το λόγο είναι χρονοβόρα. Επιπλέον για αύξηση της παραγωγής γίνεται λείανση με 2 τροχούς οι οποίοι είναι σε γωνία εργασίας σε σχέση με τον οδοντωτό τροχό κατά  $15^\circ$  ή  $20^\circ$  αλλιώς είναι παράλληλοι μεταξύ τους. Η πορεία του τροχού λείανσης είναι ευθύγραμμη και παλινδρομική, παρόμοια με την κίνηση που ακολουθεί το κοπτικό στην κατασκευή του οδοντωτού τροχού (Εικόνα 1.26).





Εικόνα 1.26 Λείανση οδοντωτού τροχού με δισκοειδή λειαντικό τροχό [13].

#### 1.6.1.2 Λείανση με κυλινδρικό λειαντικό τροχό

Σε αυτή τη μέθοδο η λείανση επιτυγχάνεται μέσω ενός λεπτού δίσκου του οποίου το σχήμα είναι κυλινδρικό, είναι υπό κλίση και βρίσκει εφαρμογή σε οδοντωτούς τροχούς με σπειροειδή οδόντωση. Ο τροχός περιστρέφεται με μεγάλη ταχύτητα γύρο από τον άξονα συμμετρίας του και όταν ολοκληρωθεί η λείανση στη μία αυλάκωση τότε ο οδοντωτός τροχός περιστρέφεται και συνεχίζεται η λείανση στην επόμενη (Εικόνα 1.27). Η μέθοδος αυτή θεωρείται ασυνεχής όπως και η προηγούμενη και για αυτό το λόγο είναι χρονοβόρα.



Εικόνα 1.27 Λείανση οδοντωτού τροχού με σπειροειδή οδόντωση.

#### 1.6.1.3 Λείανση με κοχλιωτό λειαντικό τροχό

Σε αυτή τη μέθοδο η λείανση επιτυγχάνεται μέσω ενός κοχλιωτού λεπτού δίσκου του οποίου η περιφέρεια είναι υπό κλίση και βρίσκει εφαρμογή σε οδοντωτούς τροχούς με ευθεία και ελικοειδή οδόντωση. Ο τροχός περιστρέφεται με μεγάλη ταχύτητα γύρο από τον άξονα συμμετρίας του και παράλληλα με τον άξονα του οδοντωτού τροχού. Σε αυτή τη μέθοδο σε αντίθεση με τις δύο προηγούμενες ο λειαντικός και ο οδοντωτός τροχός κινούνται ταυτόχρονα κάτι που έχει σαν αποτέλεσμα η μέθοδος αυτή να θεωρείται συνεχής και έτσι να έχει μεγαλύτερη παραγωγή (Εικόνα 1.28). Η πορεία του τροχού λείανσης είναι ευθύγραμμη και είναι παρόμοια με την κίνηση που ακολουθεί το σύστημα κοπτικό-δοκίμιο στην κατασκευή του οδοντωτού τροχού με τη μέθοδο Hobbing.



Εικόνα 1.28 Λείανση οδοντωτού τροχού με ελικοειδή οδόντωση.

#### 1.6.2 Απόξεση (Shaving)

Με τη διαδικασία της απόξεσης γίνεται αφαίρεση των μικρών τριχοειδών υπολειμμάτων από την επιφάνεια της οδόντωσης του τροχού. Γίνεται χρήση της πριν από τη θερμική επεξεργασία των τροχών οι οποίοι μπορεί να έχουν ίσια ή ελικοειδή οδόντωση. Το μέσο λείανσης έχει τη μορφή οδοντωτού τροχού όπου πάνω στις κατατομές του έχει εγκοπές, οι οποίες λειτουργούν σαν τις αιχμές ενός κοπτικού εργαλείου. Με τη βοήθεια αυτών των αιχμών γίνεται η αφαίρεση των υπολειμμάτων από την επιφάνεια του τροχού (Εικόνα 1.29).



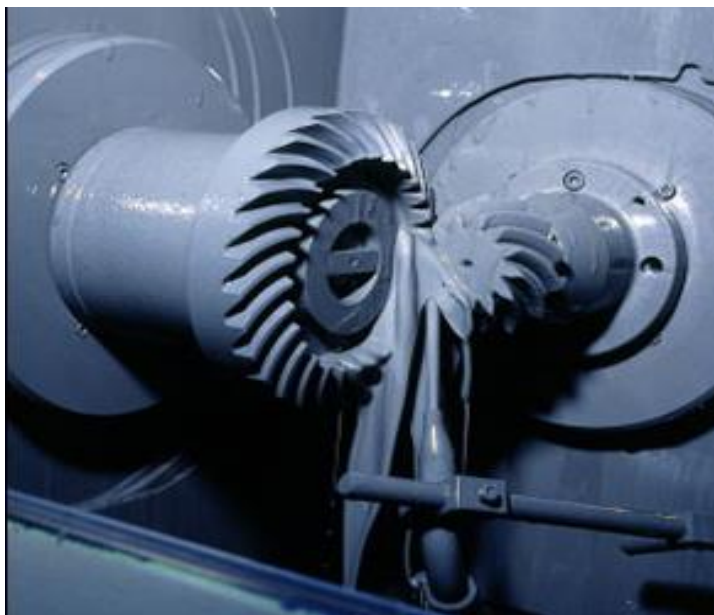
Εικόνα 1.29 Κατασκευή οδοντωτού τροχού με εργαλείο μορφής και διαιρέτη.

#### 1.6.3 Υγρή υπερλείανση (Lapping)

Η υγρή υπερλείανση είναι μία διαδικασία που εφαρμόζοντας ένα λειαντικό υγρό μεταξύ των δύο οδοντωτών τροχών που είναι σε κίνηση γίνεται αφαίρεση πολύ μικρών σωματιδίων. Χρησιμοποιείται σε οδοντωτούς τροχούς που έχουν υποστεί θερμική επεξεργασία και κατά κύριο λόγο είναι κωνικοί σπειροειδής και υποειδείς τροχοί. Σε αυτή τη μέθοδο οι οδοντωτοί τροχοί είναι σε επαφή και περιστρέφονται ταυτόχρονα. Το πινιόν αποτελεί τον οδηγό-κινητήριο τροχό ενώ ο μεγάλος τροχός-κορώνα είναι το οδηγούμενο μέλος (Εικόνα 1.30). Μέσα στο λειαντικό υγρό υπάρχουν κόκκοι από οξείδιο του πυριτίου ή αλουμινίου, οι οποίοι πραγματοποιούν τη λείανση των τροχών. Ανάλογα το μέγεθος των κόκκων πραγματοποιείται διαφορετική λείανση, έτσι μικρότεροι κόκκοι δημιουργούν πιο



λεία επιφάνεια. Συνήθως στους υποειδείς οδοντωτούς τροχούς χρησιμοποιείται υγρό με αρκετά λεπτούς κόκκους. Μετά από τη κατεργασία τους οι οδοντωτοί τροχοί κατά τη χρήση τους δουλεύουν σε χαμηλότερα επίπεδα θορύβου.



Εικόνα 1.30 Υγρή υπερλείανση οδοντωτού τροχού με ελικοειδή οδόντωση.

### 1.7 Θερμικές κατεργασίες σκλήρυνσης

Οι οδοντωτοί τροχοί αφού κατασκευαστούν σε μία εργαλειομηχανή υπόκεινται σε θερμική σκλήρυνση για να αυξήσουν την αντοχή τους. Υπάρχουν τρεις κατηγορίες σκλήρυνσης όπου ανάλογα με το υλικό γίνεται χρήση της αντίστοιχης μεθόδου. Όλες οι μέθοδοι ακολουθούν τον ίδιο θερμικό κύκλο δηλαδή από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος το δοκίμιο θερμαίνεται και αφού παραμείνει σε μία συγκεκριμένη θερμοκρασία για ορισμένο χρονικό διάστημα μετά ψύχεται άμεσα μέχρι τη θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Η βαφή είναι μία διαδικασία όπου το δοκίμιο θερμαίνεται μέχρι τους 800 °C και αφού παραμείνει σε αυτή τη θερμοκρασία για λίγα λεπτά ψύχεται βίαια σε ψυκτικό μέσο το οποίο είναι αλατόνερο, νερό, λάδι ή αέρας. Με αυτή τη μέθοδο ο χάλυβας από σκληρότητα 150-200 HV αποκτάει σκληρότητα 700-800 HV. Αυτή η μέθοδος γίνεται για ολική βαφή του τροχού δηλαδή για σκλήρυνση του από 3mm έως τον πυρήνα του αναλόγως το μέταλλο. Ύστερα από τη βαφή ο τροχός αποκτά υψηλή αντοχή όμως είναι αρκετά ψαθυρός και υπάρχει κίνδυνος θραύσης του.

Η ενανθράκωση αποτελεί μία επιφανειακή βαφή γιατί το βάθος της ενανθρακωμένης στιβάδας μπορεί να φτάσει μέχρι το 1 mm. Το δοκίμιο θερμαίνεται μέχρι τους 700 °C σε περιβάλλον ενανθρακωτικού μέσου το οποίο μπορεί να είναι είτε αερίου είτε υγρού είτε στερεού. Το ενανθρακωτικό μέσο απελευθερώνει άνθρακα ο οποίος εισέρχεται στις εξωτερικές στιβάδες του δοκιμίου. Αφού παραμείνει σε αυτό το περιβάλλον για πάνω από μία ώρα ψύχεται απότομα σε νερό.

Η εναζώτωση αποτελεί μία επιφανειακή βαφή με το βάθος της εναζωτωμένης στιβάδας να μπορεί να φτάσει μέχρι τα 0,3 mm. Το δοκίμιο θερμαίνεται μέχρι τους 600 °C σε περιβάλλον αέριας αμμωνίας και ύστερα ψύχεται σε λάδι. Το πλεονέκτημα της εναζώτωσης είναι ότι η βαφή γίνεται σε μικρή θερμοκρασία και για αυτό το λόγο δεν παρατηρείται μεγάλη παραμόρφωση του δοκιμίου.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. Σχεδιασμός ψηφιακού μοντέλου και καθορισμός συνθηκών κατεργασίας

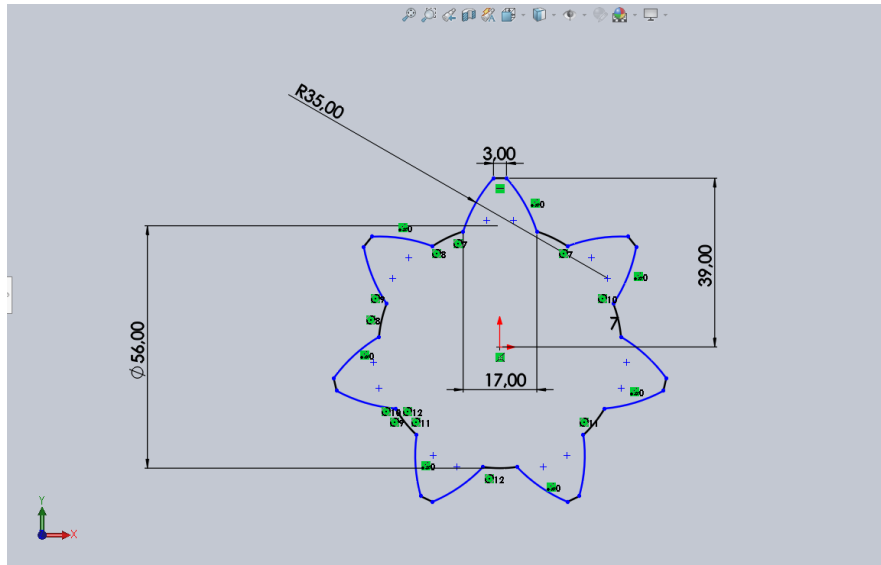
### 2.1 Μεθοδολογία προσομοίωσης κατεργασιών

Για τη δημιουργία κάθε τεμαχίου σε ένα αυτοματοποιημένο μηχάνημα είναι απαραίτητη η χρήση μίας μεθοδολογίας μέσω της οποίας θα επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα. Σε πρώτη φάση πρέπει να δημιουργηθεί το ψηφιακό τρισδιάστατο μοντέλο του τεμαχίου καθώς και το αρχικό κομμάτι του υλικού (stock) σε λογισμικό Cad. Ύστερα σε λογισμικό Cam εισάγονται όλες οι παράμετροι που απαιτούνται για τις κατεργασίες και γίνεται η επιλογή του μηχανήματος και των κοπτικών μέσων που απαιτούνται. Αφού ολοκληρωθούν όλες οι τροποποιήσεις και δημιουργηθεί το κατάλληλο toolpath μέσω του Post Process θα γίνει η εξαγωγή του G κώδικα. Αφού εισαχθεί ο κώδικας στο μηχάνημα μπορούν πλέον να υλοποιηθούν οι κατεργασίες.

### 2.2 Σχεδίαση οδοντωτού τροχού

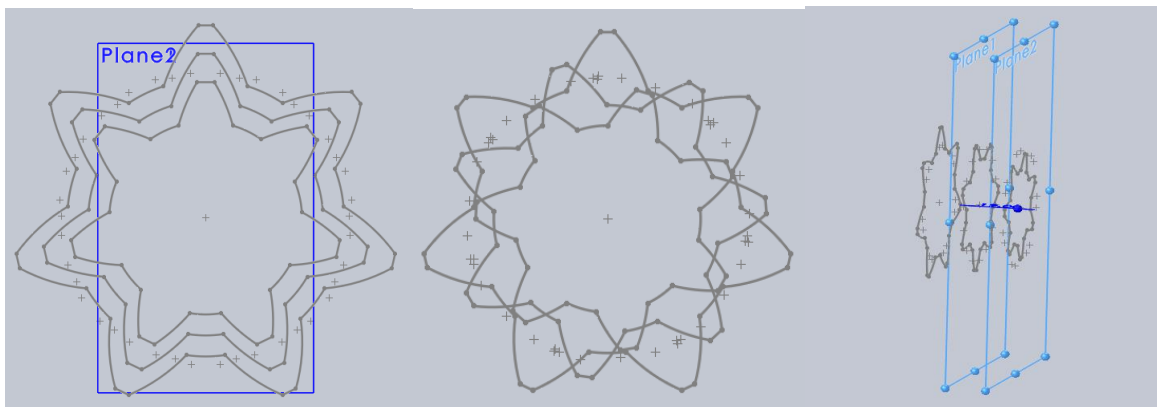
Κατά τη διαδικασία της σχεδίασης ο πρώτος παράγοντας που λαμβάνεται υπόψιν είναι οι μέγιστες διαστάσεις που μπορεί να κατεργαστεί το CNC κέντρο κατεργασίας. Η μέγιστη διάμετρος που μπορεί να κατεργαστεί είναι όσο το πλάτος του 4ου άξονα δηλαδή τα 160 mm ενώ για να βρεθεί το μέγιστος ύψος ακολουθήθηκε μια συγκεκριμένη διαδικασία. Αφού έγινε περιστροφή του 5ου άξονα κατά 90ο έγινε μετακίνηση του τραπεζιού προς τα θετικά του Y άξονα μέχρι να τερματίσει. Ύστερα έγινε μετακίνηση της ατράκτου μέχρι να έρθει στο ίδιο επίπεδο με το πλάτος του 4ου άξονα. Εκτελώντας την παραπάνω διαδικασία μετρήθηκε η απόσταση, η οποία είναι 79 mm. Σχετικά με τη διάμετρο του δοκιμίου δεν υπάρχει κανένα πρόβλημα όμως για το ύψος τα 79 mm είναι αρκετά μικρή απόσταση, για αυτό το λόγο θα χρησιμοποιηθεί μια ειδική πλάκα εφαρμογής για τη συγκράτηση του δοκιμίου, της οποίας θα γίνει περιγραφή αργότερα.

Για τη σχεδίαση του πινιόν έγινε χρήση των σχεδίων της KHK STOCK GEARS μιας και πληροί τις παραπάνω προϋποθέσεις. Επιλέχθηκε οδοντωτός τροχός με διάμετρο 78 mm και ύψος 38 mm. Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε είναι το Solidworks Premium της εταιρείας Dassault Systems γιατί κάλυπτε τις ανάγκες για τη σχεδίαση του τροχού. Η σχεδίαση πραγματοποιήθηκε σε 3 στάδια. Σε πρώτη φάση ορίστηκε το πρώτο plane όπου σχεδιάστηκε το Sketch. Το κυριότερο είναι η κλίση που θα έχει ο όδοντας μιας και θα πρέπει να ακολουθεί τη καμπύλη της εξελιγμένης. Στη βάση του ο όδοντας είναι 17 mm και με κλίση 35° καταλήγει στην κορυφή του στα 3 mm. Με τη χρήση της εντολής circular parrent γίνεται αντιγραφή του όδοντα στο επιθυμητό πλήθος. Στο τέλος γίνεται χρήση της εντολής Trim Entities και έτσι δημιουργείτε το πρώτο Sketch (Εικόνα 2.2).



Εικόνα 2.2 Σχεδίαση του πρώτου sketch σε περιβάλλον τρισδιάστατης σχεδίασης.

Αφού έχει ολοκληρωθεί το πρώτο στάδιο της σχεδίασης ορίζεται το 2ο plane το οποίο βρίσκεται στο μέσο του ύψους του οδοντωτού τροχού. Αφού ολοκληρωθεί το Sketch στο Plane 2 , δημιουργείται το Plane 3 σε απόσταση 38 mm από το Plane 1 και δημιουργείται το τελευταίο Sketch. Στο τελευταίο στάδιο της σχεδίασης γίνεται χρήση της εντολής Rotate για να περιστραφούν τα Sketch 2 και 3 κατά 20° σε σχέση με το Sketch 1 (Εικόνα 2.3)



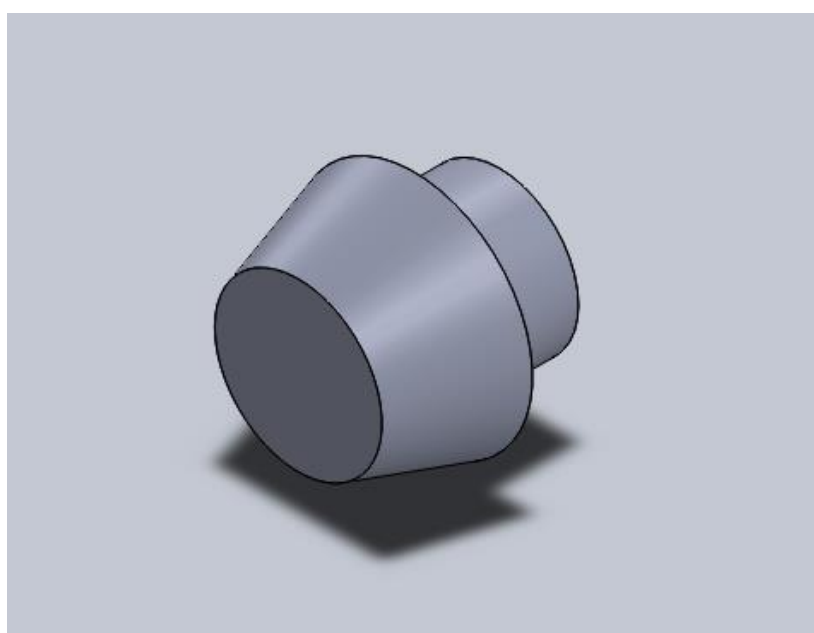
Εικόνα 2.3 Ολοκληρωμένα τα sketch σε περιβάλλον τρισδιάστατης σχεδίασης.

Σε αυτή τη φάση είναι έτοιμα όλα τα Sketch και έχει δοθεί το τελικό σχήμα στο πινιόν. Το μόνο που μένει είναι να δοθεί το σώμα και αυτό γίνεται με τη χρήση της εντολής Loft και με επιλογή του ίδιου σημείου σε κάθε Sketch. Στο τέλος γίνεται σχεδίαση του πίσω μέρους του τροχού για να αποκτήσει το τελικό του σχήμα. (Εικόνα 2.4)



Εικόνα 2.4 Τελική μορφή του οδοντωτού τροχού.

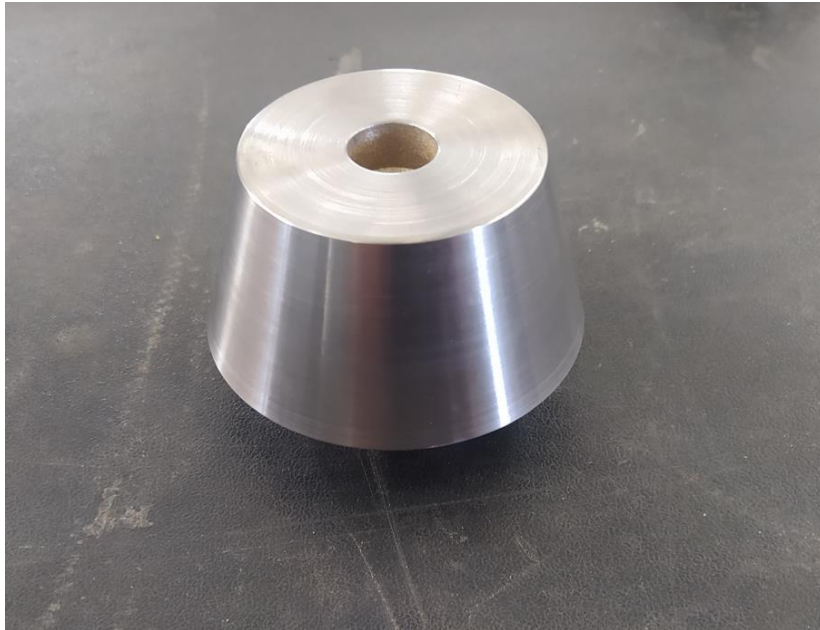
Αφού ολοκληρωθεί η σχεδίαση του οδοντωτού τροχού σειρά έχει η σχεδίαση της πρώτης ύλης που θα χρησιμοποιηθεί. Δε μπορεί να γίνει χρήση έτοιμου stock μέσα από το λογισμικό CAM γιατί δε μπορούν να αποδοθούν όλες οι επιφάνειες. Η σχεδίαση του είναι εξαιρετικά απλή μιας και το τεμάχιο έχει 2 επιφάνειες που πρέπει να αποδοθούν (Εικόνα 2.5)



Εικόνα 2.5 Ψηφιακή απεικόνιση της πρώτης ύλης.

Για να αποκτήσει η πρώτη ύλη το σχήμα που έχει το τρισδιάστατο μοντέλο έγινε χρήση συμβατικού τόρνου του εργαστηρίου. Με αυτό τον τρόπο μειώθηκε αρκετά ο χρόνος κατεργασιών στη CNC εργαλειομηχανή (Εικόνα 2.6).





Εικόνα 2.6 Πρώτη ύλη του οδοντωτού τροχού.

### 2.3 Χρήση βοηθητικών εξαρτημάτων

Τις περισσότερες φορές η συγκράτηση των δοκιμών γίνεται με τη χρήση μέγγενης εκτός εάν πρόκειται για τεμάχια κυκλικής διατομής όπου γίνεται χρήση τσοκ. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η ιδανική επιλογή είναι το τσοκ όμως ενώ η διάμετρος του είναι 160 mm όσο είναι και το πλατό του 4ου άξονα το πρόβλημα είναι με το ύψος του τσόκ το οποίο είναι 65mm. Ο χώρος που απομένει είναι ελάχιστος, κάτι που κάνει αδύνατη τη χρήση του τσόκ για αυτό το λόγο θα γίνει χρήση μίας πλάκας εφαρμογής (Εικόνα 2.7).



Εικόνα 2.7 Βάση συγκράτησης δοκιμίου.

Πρόκειται για μία πλάκα εφαρμογής κατασκευασμένη από ανθρακούχο χάλυβα ( St-37) της οποίας η διάμετρος είναι 160 mm όσο και το πλάτος του 4ου άξονα και το πάχος της 13 mm. Έτσι το ύψος που μένει είναι αρκετό για την κατασκευή του οδοντωτού τροχού. Η πλάκα έχει και άλλη μία επιφάνεια με διάμετρο 38mm όσο και η οπή που έχει το πλάτος του 4ου άξονα με ανοχή h6. Με αυτό τον τρόπο ο άξονας της πλάκας έρχεται σε απόλυτη ευθεία με τον 4ο άξονα. Επιπλέον στην επάνω πλευρά της πλάκας υπάρχει άλλη μία επιφάνεια με διάμετρο 25 mm και ύψος 1 mm μέσω της οποίας ο άξονας της πλάκας έρχεται στην ίδια ευθεία με τον άξονα του δοκιμίου.

Στο κέντρο της πλάκας υπάρχει μία διαμπερή οπή με σπείρωμα 12 mm μέσω της οποίας γίνεται η συγκράτηση του δοκιμίου πάνω στην πλάκα. Η συγκράτηση της πλάκας πάνω στο πλάτος του τέταρτου άξονα γίνεται με 6 βίδες με φρεζαρίσματα για να μην προεξέχουν από την επιφάνεια της βάσης (Εικόνα 2.8)



Εικόνα 2.8 Συγκράτηση δοκιμίου στην εργαλειομηχανή.

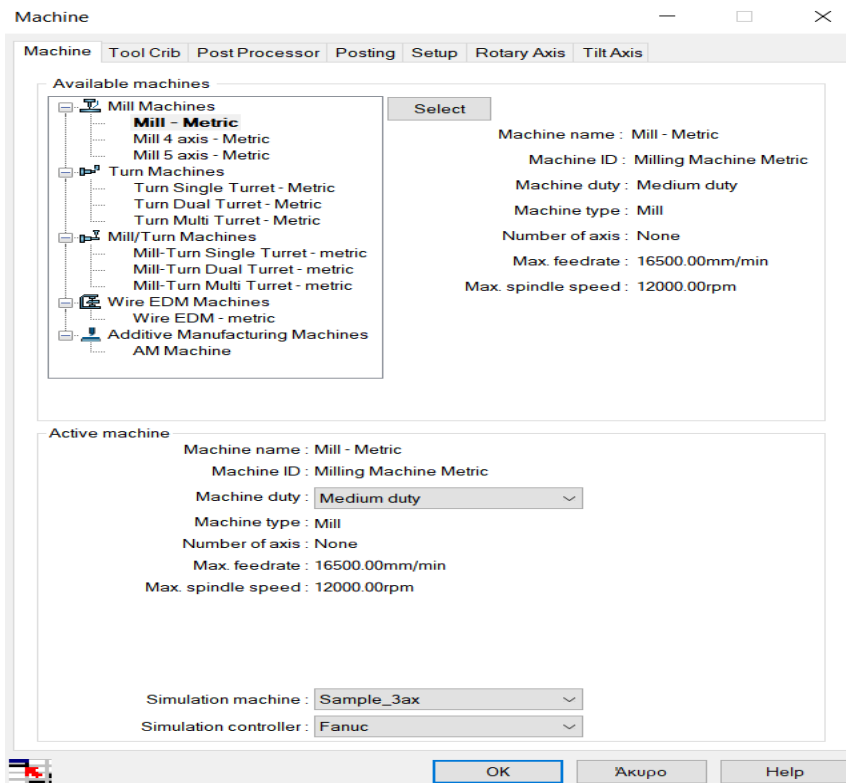
## 2.4 Προγραμματισμός κατεργασίας σε λογισμικό CAM

Το λογισμικό Cam που χρησιμοποιήθηκε είναι το CAMWorks γιατί είναι το μόνο πολυαξονικό πρόγραμμα που συνδέεται άμεσα με το Solidworks. Με αυτό το λογισμικό θα γίνουν οι προσομοιώσεις των κατεργασιών και η εξαγωγή του κώδικα. Η κατασκευή των οδοντωτών τροχών θα γίνει με τριαξονική κατεργασία , με τριαξονική κατεργασία σε συνδυασμό με πολυαξονικό Cam και με πενταξονική κατεργασία.

### 2.4.1 Προγραμματισμός τριαξονικής κατεργασίας

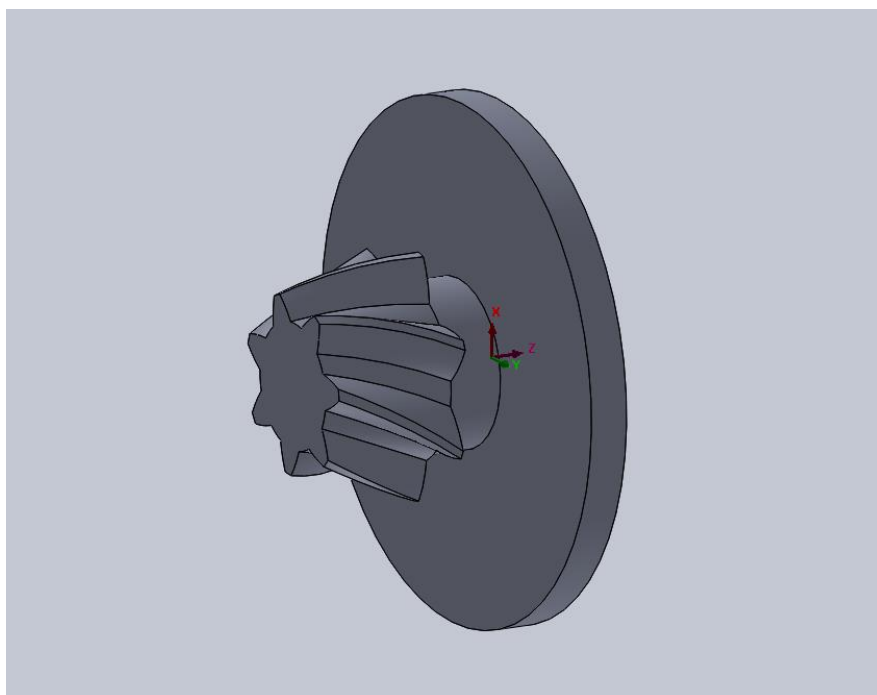
Ο κώδικας ο οποίος θα δημιουργηθεί θα είναι για μία εργαλειομηχανή 3 αξόνων. Πρώτα απ' όλα, επιλέγονται όλοι οι παράμετροι σχετικά με το μηχάνημα από το Define Machine. Στην καρτέλα Machine επιλέγετε το είδος του μηχανήματος, που στην περίπτωση μας είναι ένα κέντρο κατεργασίας 3 αξόνων και ο controller που είναι της εταιρείας Fanuc (Εικόνα 2.9). Ύστερα στο Tool Crib εισάγονται τα κοπτικά που έχει ο μύλος του μηχανήματος με όλα τους τα χαρακτηριστικά καθώς και τον αριθμό

θέσης που έχουν μέσα σε αυτόν. Στην καρτέλα Post Processor γίνεται η επιλογή του post processor που αντιστοιχεί στο μηχάνημα. Στις καρτέλες Posting, Setup, Rotary Axis και Tilt Axis δε θα γίνει καμία αλλαγή για την 3αξονική κατεργασία. Αυτές οι καρτέλες έχουν να κάνουν με τον τέταρτο και πέμπτο άξονα που στην συγκεκριμένη φάση του πειράματος θα παραμείνουν ακίνητοι.



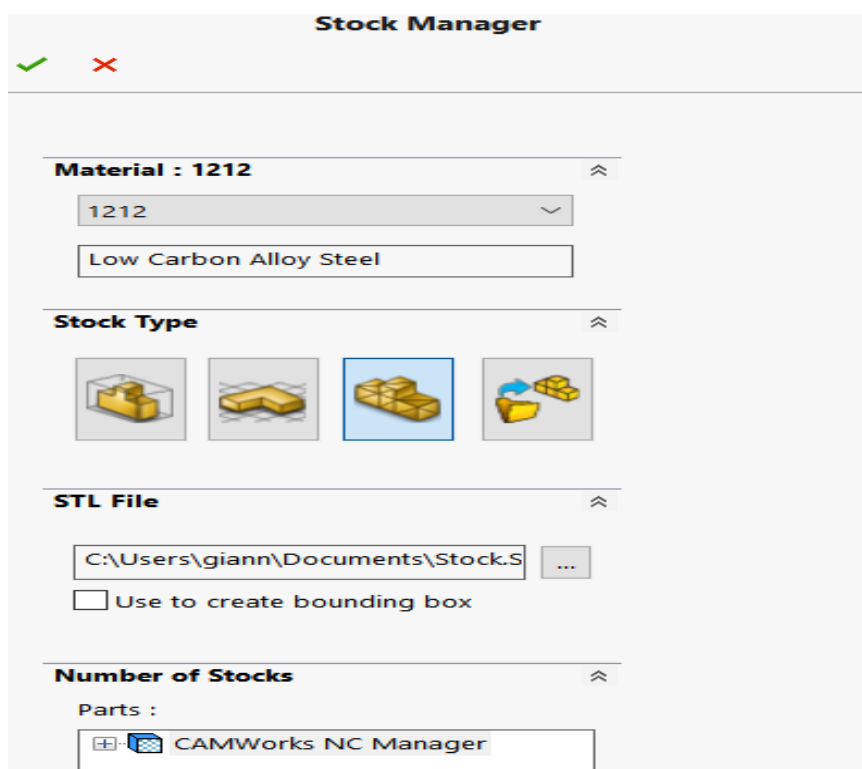
Εικόνα 2.9 Καρτέλα επιλογής χαρακτηριστικών μηχανήματος.

Ένας σημαντικός παράγοντας είναι το σύστημα συντεταγμένων μιας και θα πρέπει να συμβαδίζουν οι άξονες που έχει το stock με τους άξονες που έχει το ψηφιακό μοντέλο και τους άξονες που έχει το μηχάνημα. Σε μια μηχανή τριών αξόνων είναι σχετικά εύκολο να ταιριάξουν σωστά όλοι οι άξονες αλλά και να εντοπιστεί τυχόν λάθος. Ως αρχή των αξόνων σε όλες τις περιπτώσεις ορίζεται το κέντρο του οδοντωτού τροχού και η επιφάνεια που έρχεται σε επαφή με την πλάκα συγκράτησης του δοκιμίου. Όμως για να είναι εφικτή η τριαξονική κατεργασία έγινε χρήση του Α άξονα ο οποίος περιστρέφεται στις 90 μοίρες (Εικόνα 2.10).



Εικόνα 2.10 Το σημείο μηδέν του δοκιμίου στην εργαλειομηχανή.

Η τρίτη καρτέλα είναι το “Stock Manager” στο οποίο δίνονται όλες οι παράμετροι για την πρώτη ύλη που θα χρησιμοποιηθεί. Πρώτα απ’ όλα επιλέγεται ο τύπος του υλικού από το οποίο είναι η πρώτη ύλη. Ύστερα είναι απαραίτητη η σχεδίαση του stock σε λογισμικό Cad και να γίνει αποθήκευση του με τη μορφή STL. Έτσι στο πεδίο Stock Type επιλέγεται η μορφή STL και γίνεται επιλογή του αρχείου από τη μνήμη του υπολογιστή (Εικόνα 2.11)

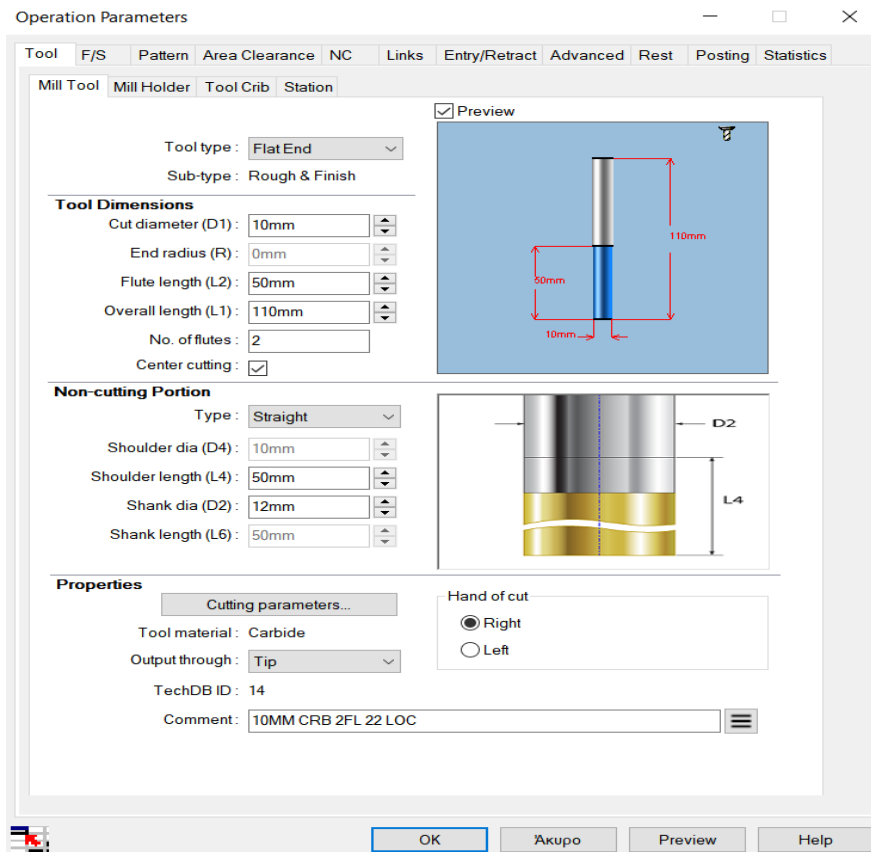


Εικόνα 2.11 Καρτέλα επιλογής στοιχείων της πρώτης ύλης.

Αφού γίνουν όλες οι παραπάνω ενέργειες τότε δημιουργείτε το Mill Part Setup και πλέον μένει η δημιουργία του Toolpath, το οποίο αποτελείται από τρία στάδια, δύο για την εκχόνδριση και ένα για την αποπεράτωση. Η διαδικασία της εκχόνδρισης πραγματοποιείτε από δύο διαφορετικά κοπτικά ενώ η αποπεράτωση από ένα.

Για τη δημιουργία του πρώτου Toolpath δημιουργούμε ένα path από την κατηγορία Area Clearance το οποίο χρειάζεται ένα πλήθος παραμετροποιήσεων για να έχει το απαιτούμενο αποτέλεσμα. Στο Operation Parameters υπάρχουν όλες οι καρτέλες οι οποίες καθορίζουν τους παράγοντες

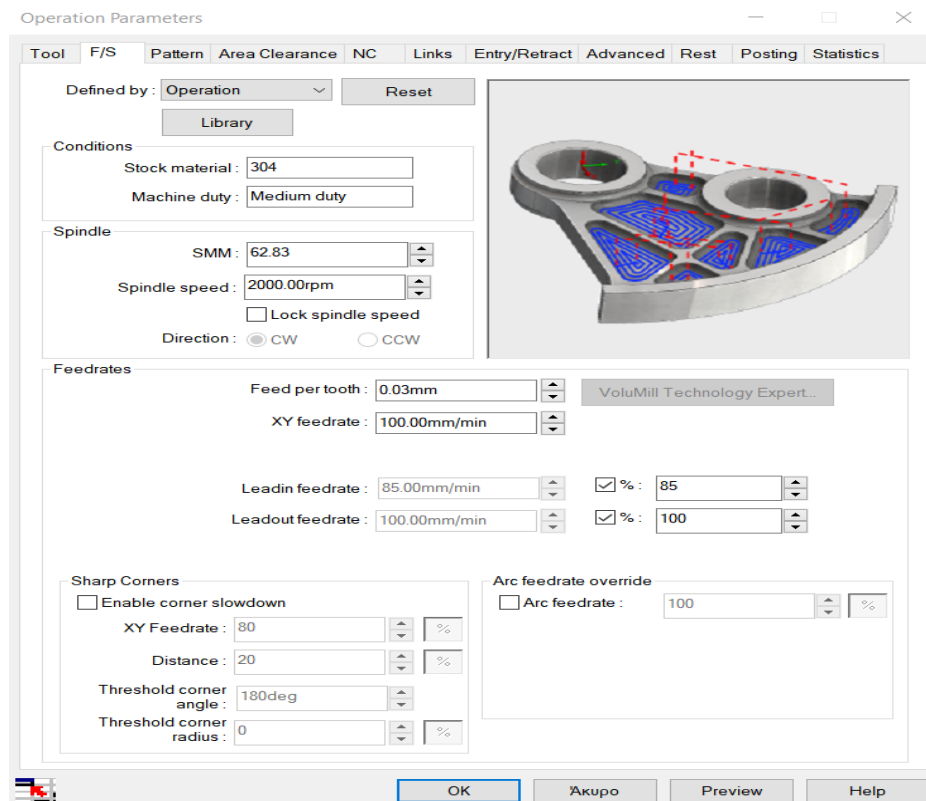
Στην καρτέλα Tool δίνονται όλα τα χαρακτηριστικά σχετικά με το κοπτικό εργαλείο, το μέσο συγκράτησης του και τις θέσεις που έχει στο μύλο του μηχανήματος. Σε πρώτη φάση γίνεται χρήση ενός ίσιου κοπτικού (Flat End) με διάμετρο 10 mm και μήκος 110 mm. Όλα τα χαρακτηριστικά του κοπτικού δίνονται στο υποπαράθυρο Mill Tool, ενώ στο υποπαράθυρο Mill Holder δίνονται όλα τα χαρακτηριστικά για το μέσο συγκράτησης του κοπτικού. Στο τέλος ορίζεται ότι το συγκεκριμένο κοπτικό είναι το εργαλείο 2 και θα βρίσκεται στη θέση 2 του μύλου του μηχανήματος (Εικόνα 2.12).



Εικόνα 2.12 Καρτέλα επιλογής χαρακτηριστικών για τα κοπτικά εργαλεία.

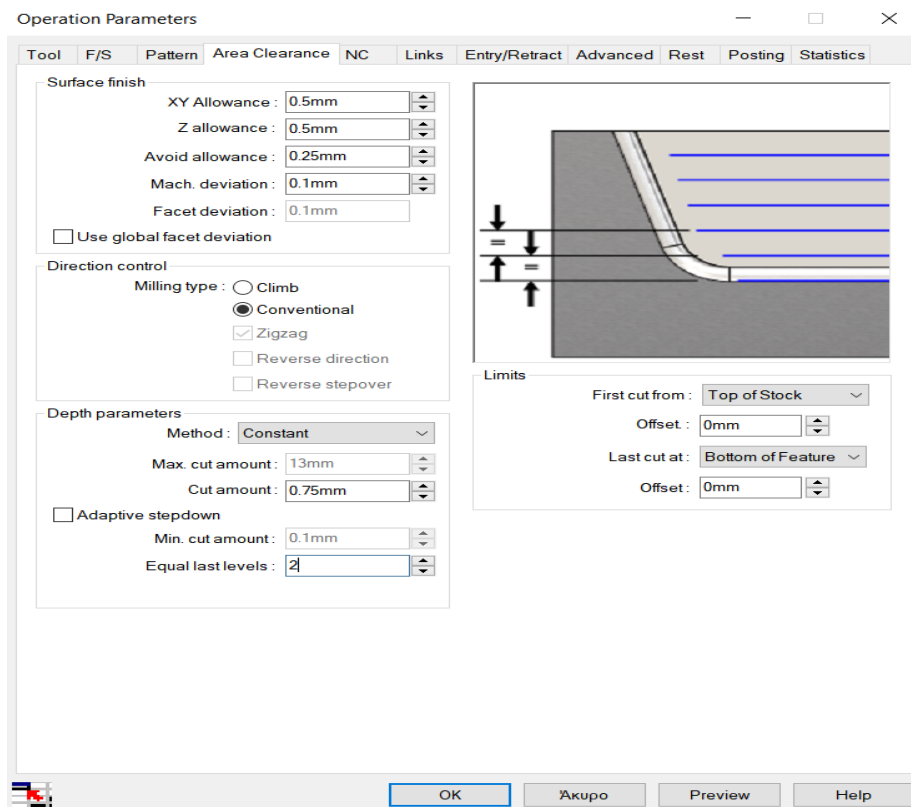
Στην καρτέλα F/S ρυθμίζονται η πρόωση κατά την κατεργασία και οι στροφές περιστροφής του κοπτικού εργαλείου. Στο Defined by επιλέγεται το operation καθώς έτσι δίνεται η δυνατότητα να ρυθμιστούν πρόωση και στροφές από τον χειριστή αν και με την επιλογή Library γίνεται αυτόματη επιλογή όλων των παραμέτρων βάσει έτοιμων πινάκων που έχει το πρόγραμμα. Επιπλέον γίνεται η επιλογή για την πρόωση γρήγορης μετακίνησης και η πρόωση κατά την εισαγωγή του κοπτικού στο

δοκίμιο. Αυτή η καρτέλα είναι σημαντική γιατί βάσει των προώσεων υπάρχουν μεταβολές στο χρόνο κατεργασίας (Εικόνα 2.13).



Εικόνα 2.13 Καρτέλα επιλογής χαρακτηριστικών για τις προώσεις.

Στην καρτέλα Pattern επιλέγεται ο τρόπος με τον οποίο θα κινείται το κοπτικό κατά την κατεργασία καθώς και η απόσταση που θα έχουν δύο διαδοχικά περάσματα του κοπτικού. Στην καρτέλα Area Clearance επιλέγονται παράμετροι οι οποίες έχουν να κάνουν με το βάθος κοπής, τα όρια ως προς τον άξονα Z καθώς και το κενό που μένει ανάμεσα στο κοπτικό και στην τελική επιφάνεια του τροχού. Στο Surface finish επιλέγεται ως απόσταση ανάμεσα στην τελική επιφάνεια και το κοπτικό τα 0,5 mm στους άξονες X και Y και η απόσταση 0,25mm στον άξονα Z. Έτσι με αυτές τις αποστάσεις θα γίνει η μεγαλύτερη δυνατή εκχόνδριση του τεμαχίου χωρίς όμως να υπάρξει κάποια φθορά της τελικής επιφάνειας. Επιπλέον στο Depth Parameters επιλέγεται η μέθοδος Constant και το βάθος κοπής ορίζεται στα 0,75mm μιας και είναι ένα βάθος κοπής στο οποίο το κοπτικό μπορεί να αποδώσει χωρίς να υπάρχει σημαντική φθορά (Εικόνα 2.14).



Εικόνα 2.14 Καρτέλα που επιλέγονται οι ανοχές και τα βάθη κοπής.

Στις καρτέλες NC, Links, Entry/Retract, Advanced, Rest και Posting γίνονται μικρές αλλαγές μιας και στη τριαξονική κατεργασία οι περισσότερες παράμετροι είναι σωστά προεπιλεγμένες και δε χρειάζονται διορθώσεις. Τέλος στην καρτέλα Statistics φαίνονται όλα τα στοιχεία σχετικά με τους χρόνους και τα μήκη του path που έχει δημιουργηθεί. Γίνεται ανάλυση για το χρόνο κίνησης στον κάθε άξονα και το συνολικό χρόνο κατεργασιών (Εικόνα 2.15).



Operation Parameters

Tool	F/S	Pattern	Area Clearance	NC	Links	Entry/Retract	Advanced	Rest	Posting	Statistics
Toolpath analysis										
		Segments	Length %			Min	Max			
Lines :	2491	100			X :	-27.27mm	13.84mm			
Arcs :	0	0			Y :	-5.49mm	43.48mm			
Total :	2491	100			Z :	15.75mm	64mm			
Estimated machining time										
		Toolpath Length	Time ( min )							
Feed :	3258.82mm	34.85								
Rapid :	1510.29mm	0.06								
Non Cutting		0.06								
Total :	4769.11mm	34.97								
TechDB										
		TechDB ID :		-1						
		Operation Parameters :		Save As Defaults...						
				Load Defaults...						
		3 axis toolpath generation method :		Advanced method						

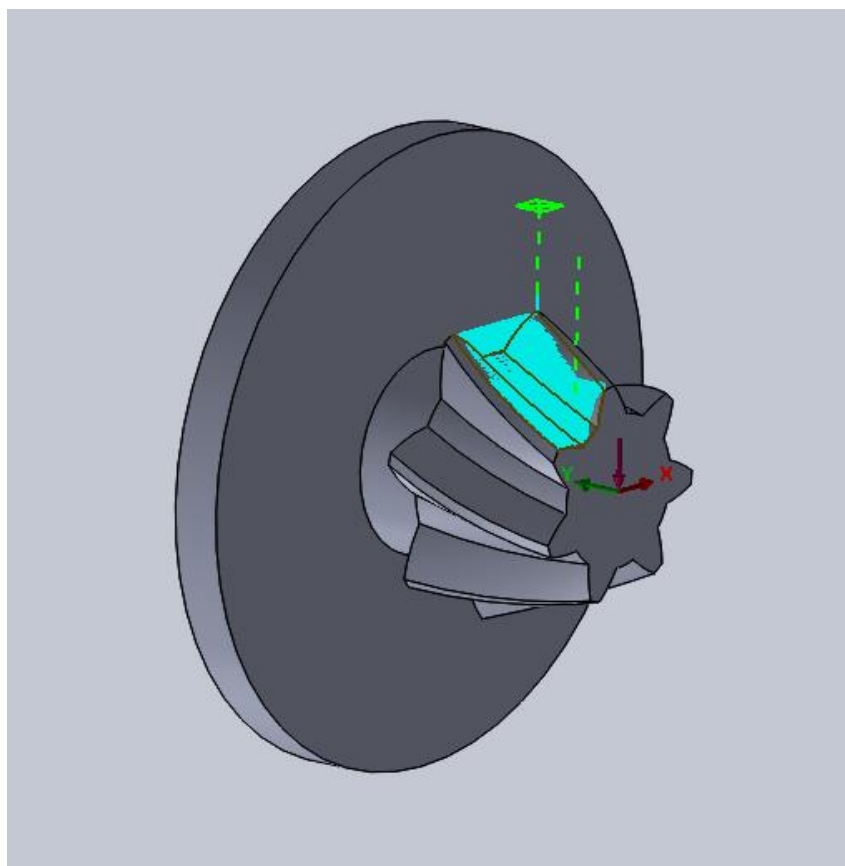
OK Άκυρο Preview Help

Εικόνα 2.15 Καρτέλα παρουσίασης στατιστικών για την προσομοίωση.

Στη δεύτερη φάση της εκχόνδρισης χρησιμοποιείται κοπτικό εργαλείο τύπου Ball Nose με το οποίο θα μπορέσει να αφαιρέσει υλικό από μεγαλύτερο βάθος και θα ετοιμάσει το δοκίμιο για τη φάση της αποπεράτωσης. Σε αυτή τη φάση κατεργασιών επιλέγεται το path να δημιουργηθεί από την κατηγορία Z Level μιας και ενδείκνυται για τριαξονική κατεργασία. Κατά τη δημιουργία του path στο operation parameters υπάρχει ένα πλήθος καρτελών από τις οποίες οι περισσότερες είναι ίδιες με αυτές στο Area Clearance.

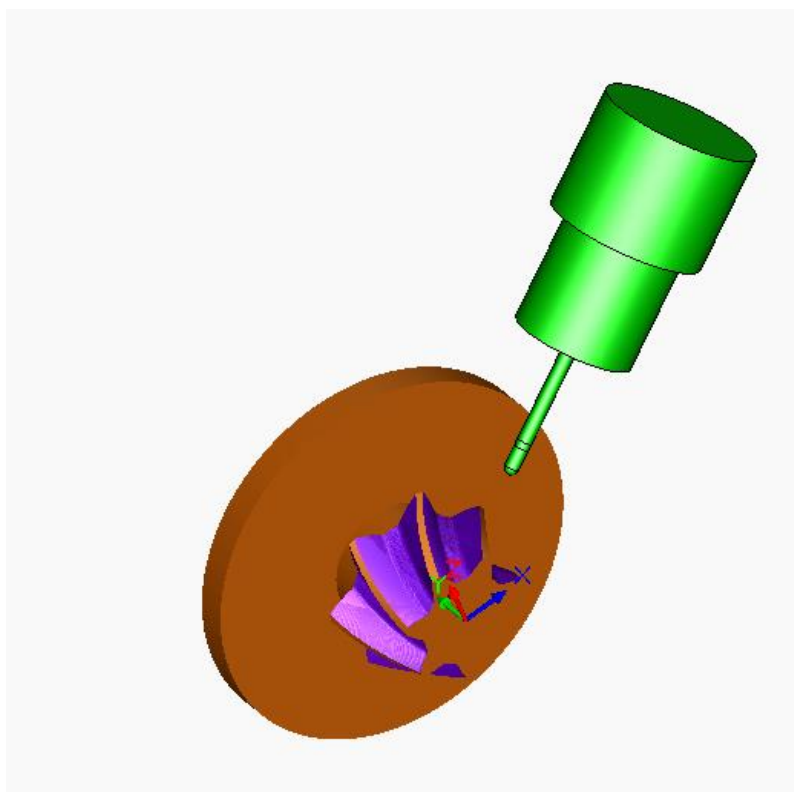
Στην καρτέλα Tool εισάγεται το κοπτικό το οποίο είναι ένα δίπτερο Ball Nose με μήκος 100 mm , διάμετρο 8mm και καμπυλότητα 4 mm. Όπως και στο προηγούμενο path εισάγονται όλες οι πληροφορίες για το Tool , για το μέσο συγκράτησης του κοπτικού με το μηχάνημα και για τη θέση του εργαλείου στο μύλο του μηχανήματος, το οποίο είναι το νούμερο 3 και βρίσκεται στη θέση 3 του μύλου. Οι καρτέλες που υπάρχουν στο Z Level είναι ίδιες με αυτές του Area Clearance, έτσι ακολουθείται η ίδια λογική με το προηγούμενο path για όλες τις καρτέλες (Εικόνα 2.16)





Εικόνα 2.16 Το Toolpath κατά τη δεύτερη φάση της εκχόνδρισης.

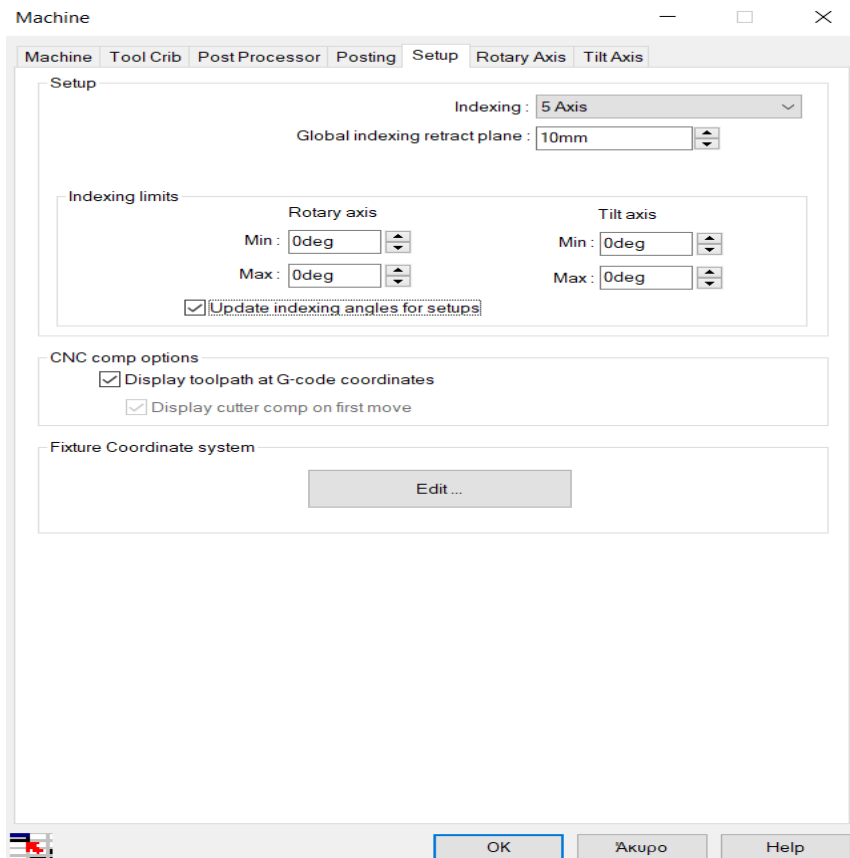
Το τρίτο στάδιο αποτελεί την αποπεράτωση του δοκιμίου που θα γίνει από ένα κοπτικό τύπου Ball End με διάμετρο 6mm , μήκος 80 mm και καμπυλότητα 3mm, το οποίο ονομάζεται εργαλείο 4 και εισάγεται στη θέση 4 του μύλου. Σε αυτό το στάδιο η λογική που ακολουθείτε κατά την παραμετροποίηση του path είναι διαφορετική σε σχέση με τα δύο προηγούμενα μιας και τώρα θα επιλεχθούν μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής του κοπτικού και αρκετά μεγαλύτερη πρόωση ενώ το βάθος κοπής θα μειωθεί (Εικόνα 2.17). Επιπλέον θα υπάρξει μείωση στο sterover δηλαδή στην απόσταση ανάμεσα σε δύο διαδοχικά περάσματα. Κατά την αποπεράτωση του οδοντωτού τροχού θα επιλεχθούν διαφορετικά sterover για να επιτευχθεί η επιθυμητή επιφάνεια στον μικρότερο δυνατό χρόνο.



Εικόνα 2.17 Προσομοίωση του οδοντωτού τροχού με τριαξονική κατεργασία.

#### 2.4.2 Προγραμματισμός τριαξονικής κατεργασίας με τη χρήση πολυαξονικού προγράμματος Cam

Στη δεύτερη φάση του πειράματος ο οδοντωτός τροχός θα δημιουργηθεί από τριαξονική κατεργασία με τη χρήση πενταξονικού προγράμματος Cam για να γίνει σύγκριση στους χρόνους κατεργασίας. Για να επιτευχθεί αυτό το πείραμα ακολουθείτε η διαδικασία της πενταξονικής κατεργασίας με μόνη διαφορά ότι ο τέταρτος και ο πέμπτος άξονας θα είναι ακινητοποιημένοι. Όπως στην πρώτη φάση επιλέγονται όλοι οι παράμετροι σχετικά με το μηχάνημα από το Define Machine. Στην καρτέλα machine επιλέγετε το είδος του μηχανήματος, που στην περίπτωση μας είναι ένα κέντρο κατεργασίας 5 αξόνων ενώ οι άλλες επιλογές παραμένουν ίδιες. Ύστερα στο Tool Crib και Posting δε χρειάζεται καμία αλλαγή μιας και τα κοπτικά είναι έτοιμα από την πρώτη φάση του πειράματος. Στην καρτέλα Post Processor γίνεται η επιλογή του post processor που δημιουργήθηκε από την εταιρεία που παρέχει το λογισμικό Cam και αντιστοιχεί σε κέντρο κατεργασίας πέντε αξόνων. Στην καρτέλα Setup στο indexing επιλέγετε η επιλογή 5 Axis καθώς και στο indexing limits εισάγονται τα όρια περιστροφής του κάθε πρόσθετου άξονα (Εικόνα 2.15) Για να γίνει τριαξονική κοπή όλες οι τιμές στα όρια των αξόνων ορίζονται στις 0°. Στις καρτέλες "Rotary Axis" και "Tilt Axis" επιλέγεται ο προσανατολισμός των δύο πρόσθετων αξόνων A και B καθώς και η θετική φορά περιστροφής για να μπορεί να γίνεται η περιστροφή κατά 51,429°.



Εικόνα 2.15 Καρτέλα επιλογής πρόσθετων αξόνων και ορίων περιστροφής τους.

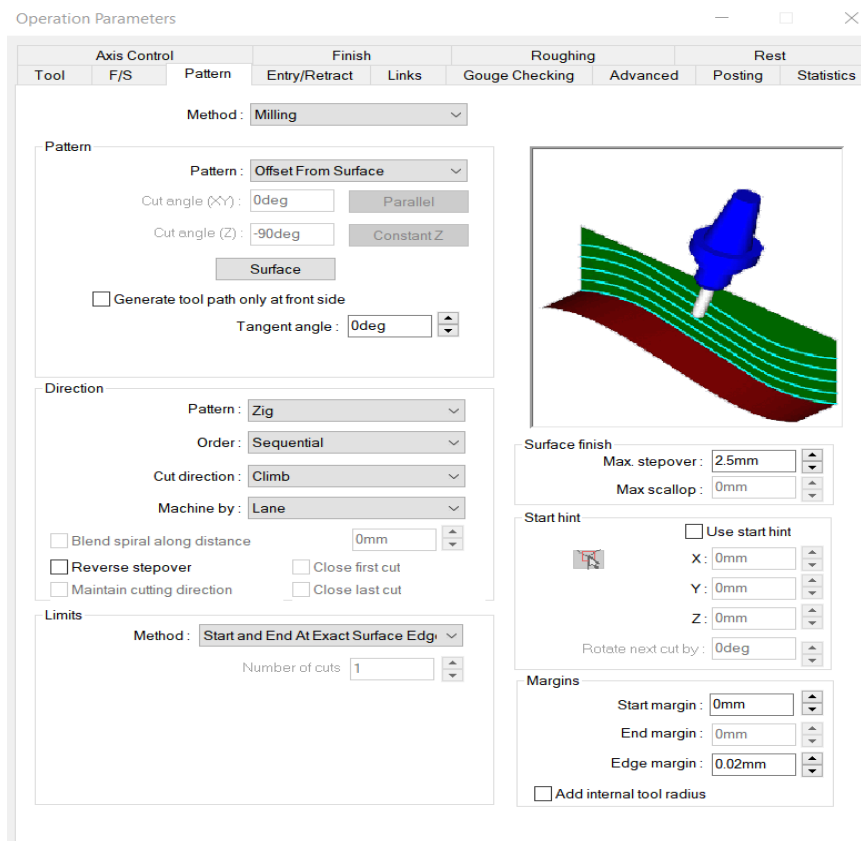
Το σύστημα συντεταγμένων ορίζεται όπως στην πρώτη φάση του πειράματος. Πρόβλημα σε αυτές τις περιπτώσεις είναι να αντιστοιχηθούν σωστά οι άξονες του μηχανήματος με τους άξονες του δοκιμίου και ειδικά ο τέταρτος και ο πέμπτος. Το επόμενο βήμα είναι να οριστεί stock το οποίο θα παραμένει ίδιο με την προηγούμενη φάση του πειράματος εκτός από το υλικό το οποίο είναι το ST-37.

Αφού γίνουν όλες οι παραπάνω ενέργειες τότε δημιουργείτε το Mill Part Setup και πλέον μένει η δημιουργία του Toolpath, το οποίο αποτελείτε από τρία στάδια, δύο για την εκχόνδριση και ένα για την αποπεράτωση. Η διαδικασία της εκχόνδρισης πραγματοποιείτε από δύο διαφορετικά κοπτικά ενώ η αποπεράτωση από ένα.

Για τη δημιουργία του πρώτου Toolpath δημιουργείται ένα path από την κατηγορία Multiaxis του CAMWorks NC Manager το οποίο χρειάζεται ένα πλήθος παραμετροποιήσεων για να έχει το απαιτούμενο αποτέλεσμα. Η διαφορά ανάμεσα σε toolpaths πενταξονικά και τριαξονικά είναι ότι στα πρώτα δίνεται η δυνατότητα στον χειριστή του προγράμματος να παραμετροποιήσει πάρα πολλές λεπτομέρειες ενώ στα τριαξονικά κάτι τέτοιο δεν είναι εφικτό. Το πρόβλημα με αυτό το γεγονός είναι ότι οι παράμετροι πρέπει να οριστούν όλες από το χρήστη και πολλές είναι αρκετά παρόμοιες, έτσι εκτός από τον παρατεταμένο χρόνο που χρειάζεται για την δημιουργία του path είναι δύσκολο να εντοπιστεί η παράμετρος η οποία έχει οριστεί λάθος σε τυχόν λάθος πορεία του κοπτικού. Στο Operation Parameters υπάρχουν όλες οι καρτέλες οι οποίες καθορίζουν τους παράγοντες για το κοπτικό και το τραπέζι του μηχανήματος.

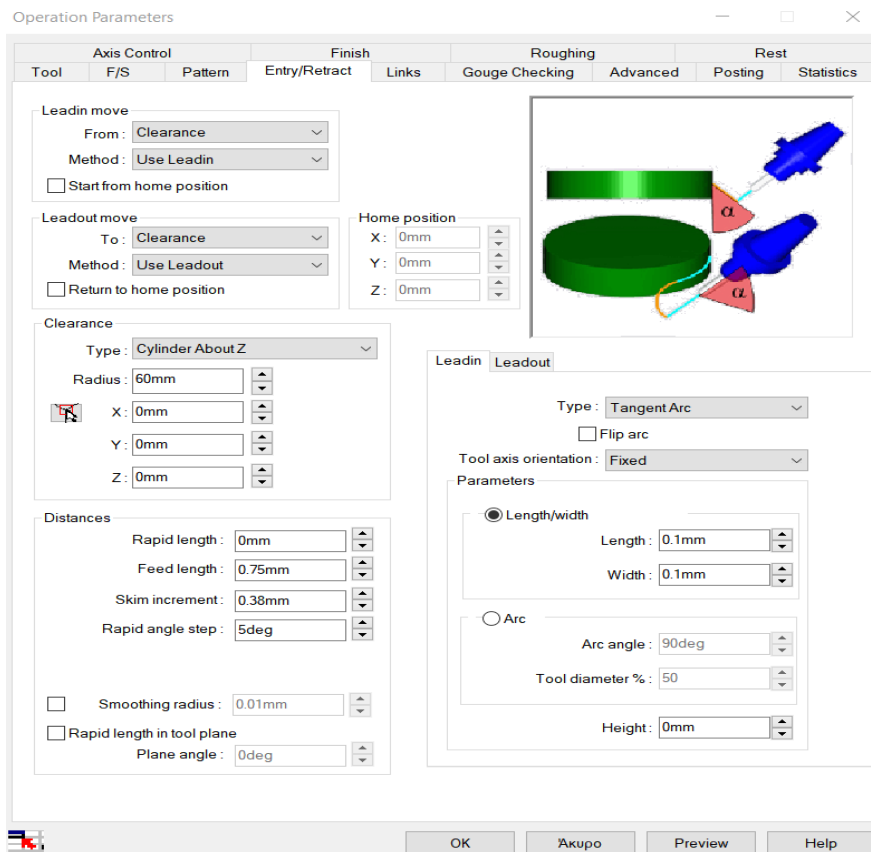
Στην καρτέλα Tool επιλέγεται το κοπτικό νούμερο 2 το οποίο έχει οριστεί από την πρώτη φάση του πειράματος. Πρόκειται για το κοπτικό τύπου Flat End με διάμετρο 10 mm και μήκος 110 mm. Η καρτέλα F/S παραμετροποιείται με τον ίδιο τρόπο όπως στην πρώτη φάση του πειράματος αφού οι επιλογές της έχουν να κάνουν με την πρόωση και τις στροφές περιστροφής του κοπτικού.

Στην καρτέλα Pattern επιλέγεται ο τρόπος με τον οποίο κινείται το κοπτικό κατά τη διάρκεια της κατεργασίας. Από το πεδίο Pattern επιλέγετε το είδος της κατεργασίας που είναι Offset From Surface. Έπειτα πρέπει να οριστεί το κατώτερο όριο της κατεργασίας από το Surface, όπου επιλέγοντας το ανοίγει ένα νέο παράθυρο στο οποίο πρέπει να δημιουργηθεί ένα νέο Feature. Στη συνέχεια γίνονται παραμετροποιήσεις στα πεδία Direction και Limits με σκοπό τη μείωση του χρόνου κατεργασίας.



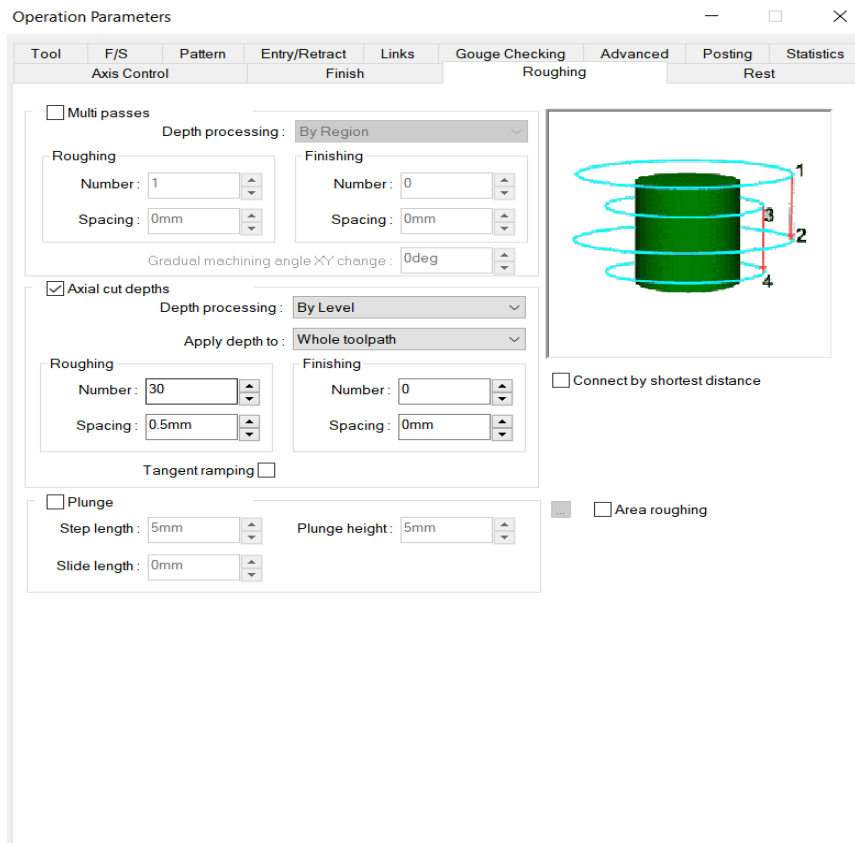
Εικόνα 2.16 Καρτέλα επιλογής χαρακτηριστικών για τα κοπτικά εργαλεία.

Ύστερα στην καρτέλα Entry/Retract επιλέγεται ο τρόπος με τον οποίο εισέρχεται και εξέρχεται το κοπτικό στο τεμάχιο κατά την κοπή. Επιπλέον στο πεδίο Clearance ορίζεται το σημείο μηδέν που θα έχει το κοπτικό ως προς το τεμάχιο. Αυτή η παράμετρος είναι αρκετά σημαντική γιατί το πρόγραμμα αυτοματοποιημένα ορίζει ως σημείο μηδέν του κοπτικού το σημείο μηδέν του τεμαχίου (stock) και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα ο Z άξονας του μηχανήματος να χτυπήσει πάνω στο τεμάχιο με ανυπολόγιστες συνέπειες. Για αυτό το λόγο ως σημείο μηδέν του κοπτικού ορίζεται ένα σύνολο σημείων τα οποία αποτελούν ένα κύκλο γύρω από τον άξονα Z και σε απόσταση 60 mm από το σημείο μηδέν του stock. Ο λόγος που επιλέγεται ως σημείο 0 ένας δακτύλιος είναι για να μην υπάρχει θέμα κατά την περιστροφή του τεμαχίου όταν θα κατεργάζεται. Επιπλέον αλλαγές γίνονται στο Leadin και στο Leadout γιατί με τις αυτοματοποιημένες επιλογές που είχε αφαιρούσε υλικό από τις οδοντώσεις του τροχού.



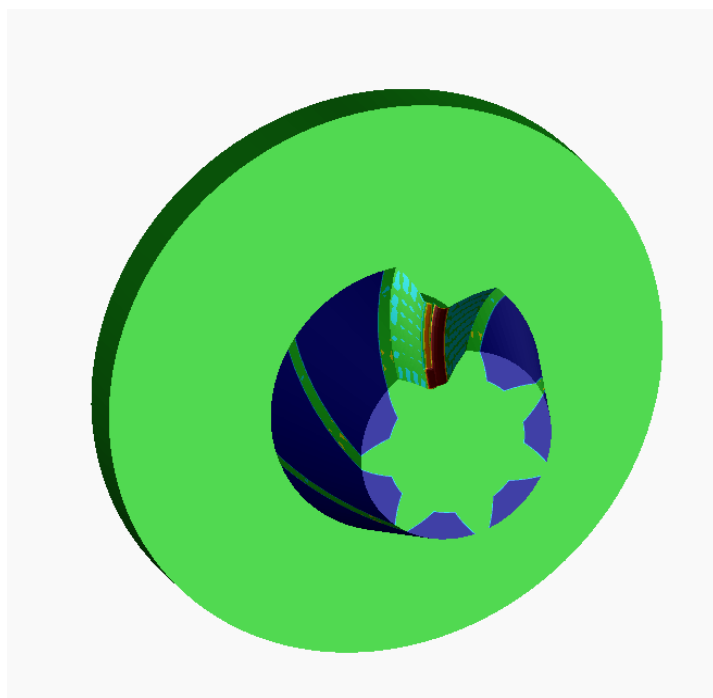
Εικόνα 2.17 Καρτέλα ορισμού του σημείου μηδέν.

Στην καρτέλα Roughing επιλέγεται το βάθος κοπής και ο τρόπος με τον οποίο το κοπτικό θα πηγαίνει από το ένα βάθος κοπής στο επόμενο. Επιλέγεται το πεδίο Axial cut depths και στο depth processing η επιλογή By Level. Με αυτές τις επιλογές μειώνονται οι κραδασμοί του κοπτικού κατά την είσοδο του στο τεμάχιο και έτσι αποφεύγεται η βίαιη φθορά των ακμών του (Εικόνα 2.18).

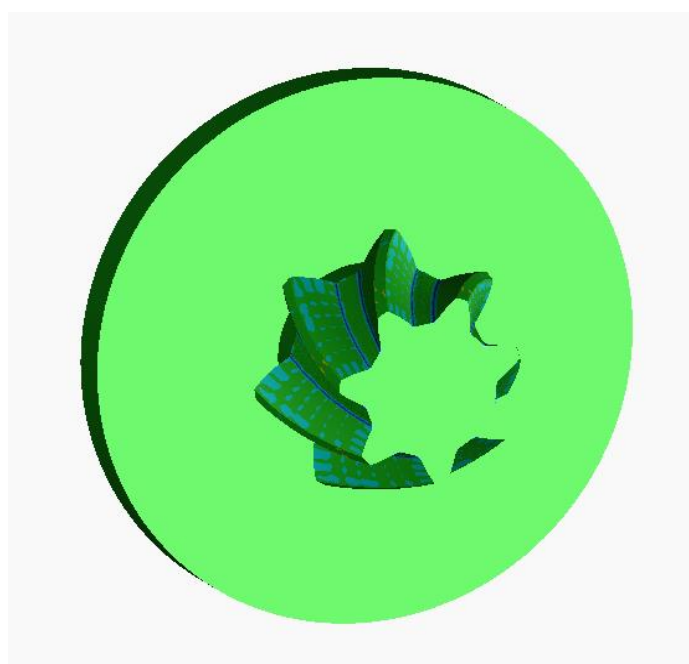


Εικόνα 2.18 Καρτέλα για το βάθος κοπής.

Στο τελευταίο στάδιο θα πραγματοποιηθεί η αποπεράτωση του οδοντωτού τροχού η οποία θα υλοποιηθεί με δύο Toolpaths. Από το Multiaxis operation δημιουργείται ένα Feature με τις δύο πλαϊνές πλευρές που έχει ο αύλακας και άλλο ένα για την κάτω πλευρά του. Αυτό γίνεται γιατί σε όλες τις προσπάθειες να γίνει η αποπεράτωση από ένα Toolpath το αποτέλεσμα ήταν η καταστροφή του οδοντωτού τροχού. Συγκεκριμένα στις δύο ακμές όταν ενώνονται οι πλαϊνές πλευρές με την κάτω υπάρχει υλικό το οποίο δε μπορεί να αφαιρεθεί γιατί το κοπτικό έχει καμπυλότητα μεγαλύτερη από αυτή του τροχού. Έτσι όταν υπάρχει ένα Toolpath για να μην αφήσει υλικό το οποίο είναι περιττό φτάνει σε τέτοιο βάθος κοπής που καταστρέφει τον οδοντωτό τροχό (Εικόνα 2.19 , 2.20).



Εικόνα 2.19 Αποπεράτωση οδοντωτού τροχού με τη χρήση ενός Toolpath.



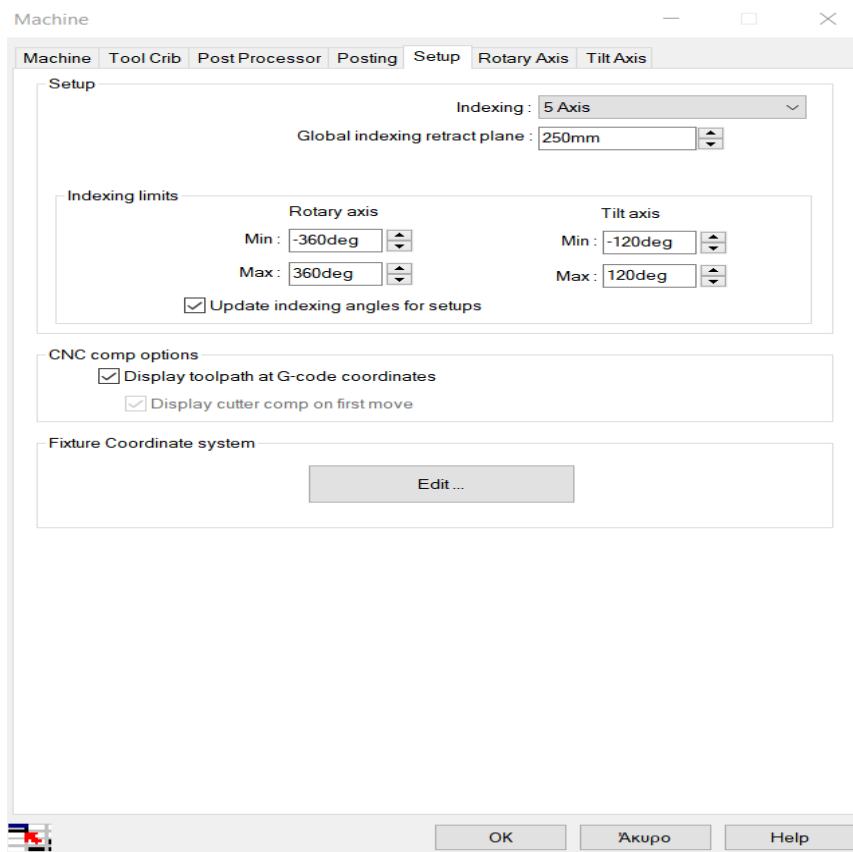
Εικόνα 2.20 Αποπεράτωση οδοντωτού τροχού με τη χρήση δύο Toolpath..

### 2.4.3 Προγραμματισμός πενταξονικής κατεργασίας

Στην τρίτη φάση του πειράματος ο οδοντωτός τροχός θα δημιουργηθεί από πενταξονική κατεργασία για να γίνει σύγκριση στους χρόνους κατεργασίας. Όπως στις άλλες δύο φάσεις επιλέγονται όλοι οι παράμετροι σχετικά με το μηχάνημα από το Define Machine. Στην καρτέλα

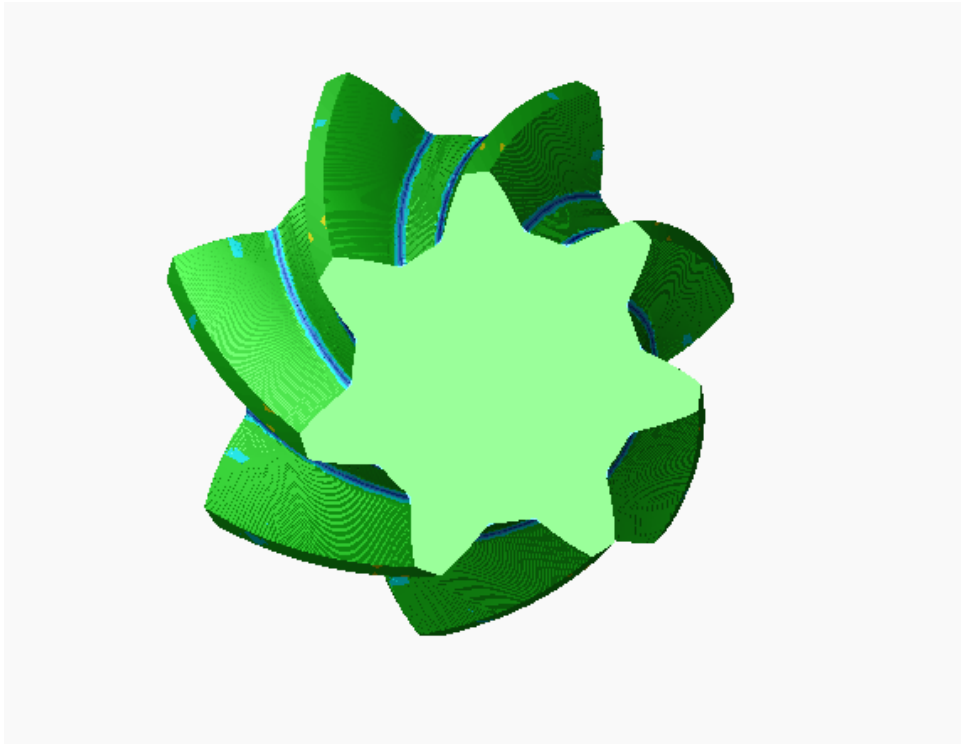


machine επιλέγετε το είδος του μηχανήματος, που στην περίπτωση μας είναι ένα κέντρο κατεργασίας 5 αξόνων ενώ οι άλλες επιλογές παραμένουν ίδιες. Ύστερα στο Tool Crib και Posting δε χρειάζεται καμία αλλαγή μιας και τα κοπτικά είναι έτοιμα από την πρώτη φάση του πειράματος. Στην καρτέλα Post Processor γίνεται η επιλογή του post processor που δημιουργήθηκε από την εταιρεία που παρέχει το λογισμικό Cam και αντιστοιχεί σε κέντρο κατεργασίας πέντε αξόνων. Στην καρτέλα Setup στο indexing επιλέγετε η επιλογή 5 Axis καθώς και στο indexing limits εισάγονται τα όρια περιστροφής του κάθε πρόσθετου άξονα (Εικόνα 2.15). Στις καρτέλες "Rotary Axis" και "Tilt Axis" επιλέγεται ο προσανατολισμός των δύο πρόσθετων αξόνων A και B καθώς και η θετική φορά περιστροφής τους.



Εικόνα 2.21 Καρτέλα επιλογής πρόσθετων αξόνων και ορίων περιστροφής τους.

Για τον προγραμματισμό της πενταξονικής κατεργασίας γίνεται χρήση των προηγούμενων παραμετροποιήσεων με τη βασική διαφορά ότι οι πρόσθετοι άξονες θα είναι ελεύθεροι να κινηθούν. Ένα από τα πιο χρονοβόρα τμήματα της δημιουργίας του μονοπατιού είναι να εισαχθούν τα κατάλληλα όρια περιστροφής στον άξονα A αφού δε μπορεί να πραγματοποιήσει καμία κατεργασία μετά τις 90 μοίρες επειδή το κοπτικό θα συγκρουστεί στη βάση συγκράτησης.



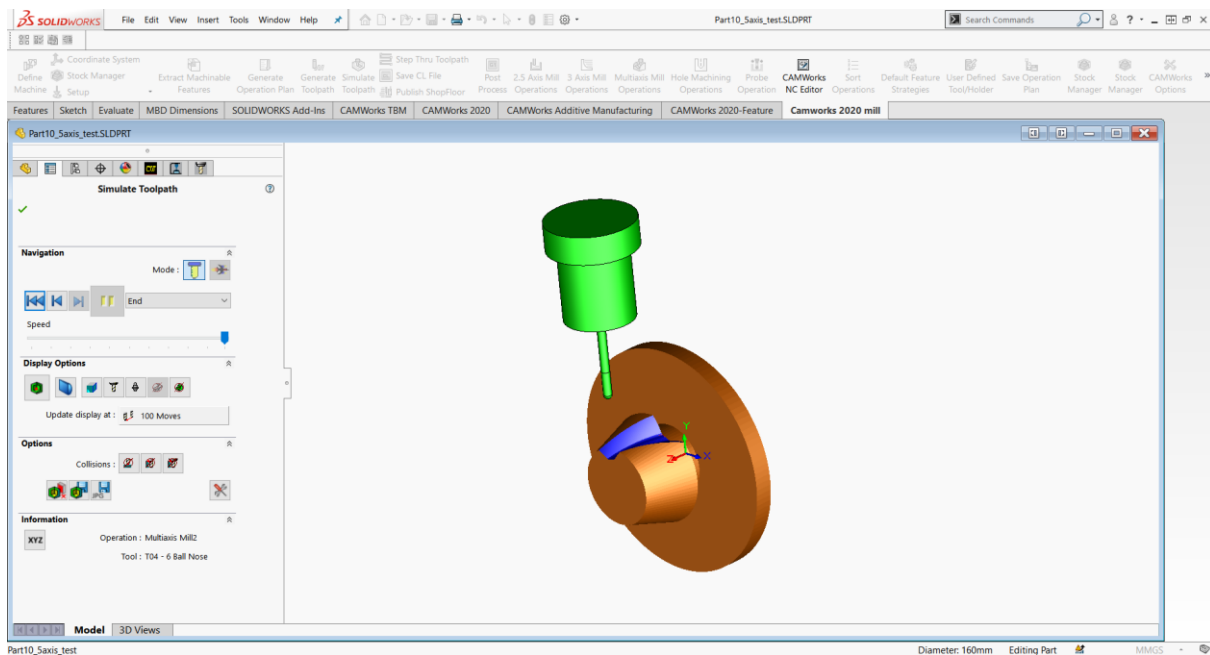
Εικόνα 2.22 Αποπεράτωση οδοντωτού τροχού με πενταξονική κατεργασία

## 2.5 Προσομοίωση κατεργασιών

Αφού ολοκληρωθούν οι απαιτούμενες παραμετροποιήσεις είναι εφικτή η προσομοίωση των κατεργασιών που έχουν δημιουργηθεί. Με αυτό τον τρόπο δίνεται η δυνατότητα στο χειριστή να δει την πορεία που θα ακολουθήσει το κοπτικό εργαλείο καθώς και τυχόν προβλήματα όπως συγκρούσεις με το τεμάχιο ή το μηχάνημα. Η χρήση της προσομοίωσης είναι απαραίτητη, για αυτό το λόγο γίνεται χρήση όλων των προγραμμάτων προσομοίωσης από το χρήστη για να είναι σίγουρος για τυχόν προβλήματα που μπορεί να μην τα έχει εντοπίσει. Στο συγκεκριμένο πρόγραμμα είναι διαθέσιμα τέσσερα προγράμματα προσομοιώσεων.

### Simulate Toolpath

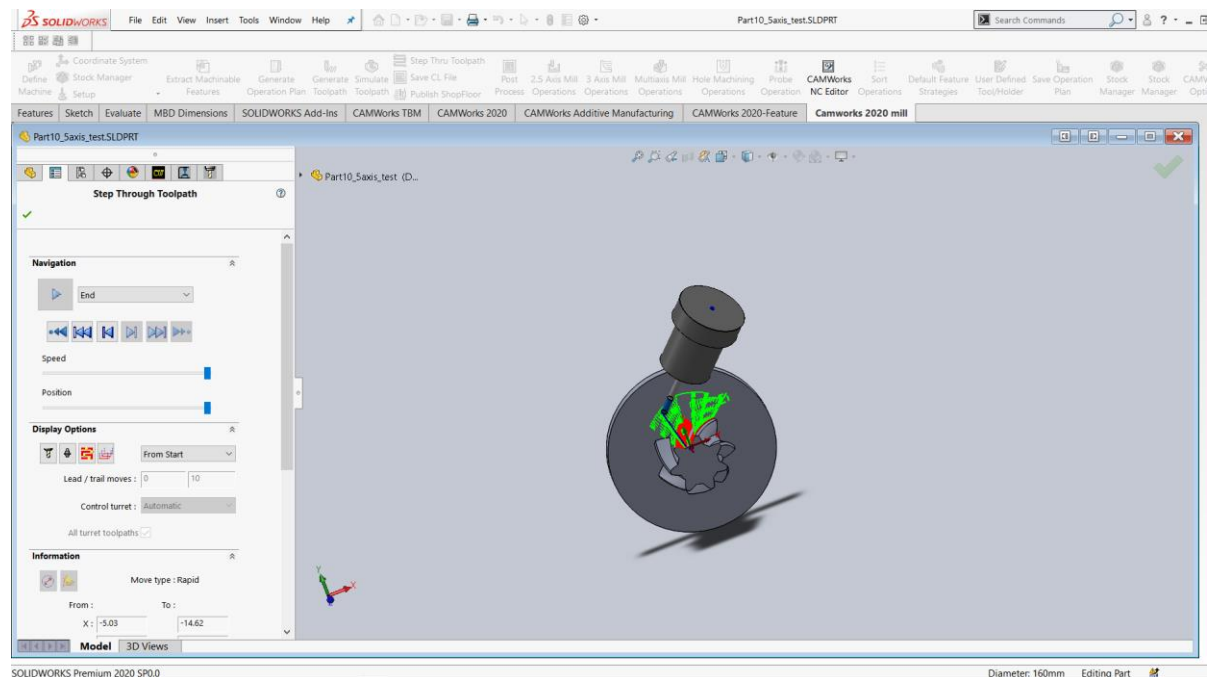
Η προσομοίωση διαδρομής του εργαλείου είναι η πιο διαδεδομένη προσομοίωση και χρησιμοποιείται κατά τη δημιουργία του path. Προσομοιώνεται ο κώνος συγκράτησης του κοπτικού μαζί με το κοπτικό και η βάση συγκράτησης του δοκιμίου μαζί με την πρώτη ύλη ενώ δίνει τη δυνατότητα να μη φαίνεται οποιοδήποτε εξάρτημα επιθυμεί ο χειριστής. Προσομοιώνει την κάθε κίνηση του κοπτικού και προειδοποιεί πριν από κάθε σύγκρουση. Επιπλέον όταν ολοκληρωθεί η προσομοίωση φαίνεται η τελική μορφή του τεμαχίου και είναι εφικτή η απεικόνιση του με διαφορετικά χρώματα ανάλογα με τις διακυμάνσεις στις διαστάσεις του (Εικόνα 2.23).



Εικόνα 2.23 Προσομοίωση διαδρομής του εργαλείου

## Step Through Toolpath

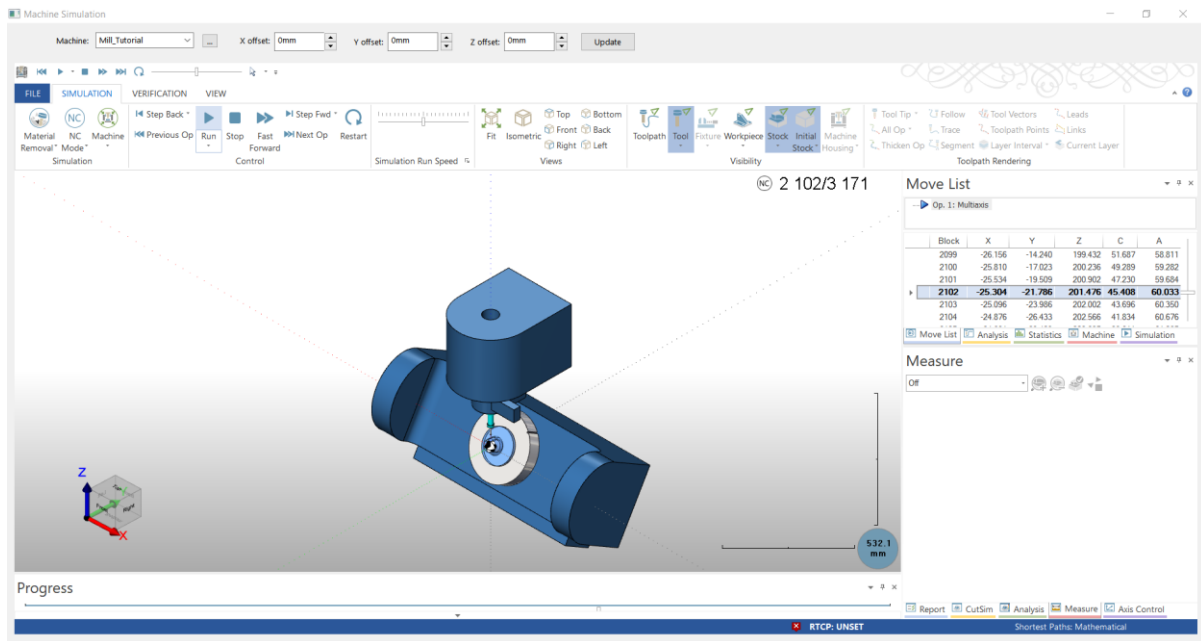
Στην προσομοίωση της διαδρομής του κοπτικού βήμα προς βήμα φαίνονται το κοπτικό με τον κώνο συγκράτησης του και το υλικό με τη βάση συγκράτησης του. Η διαφορά με την προηγούμενη προσομοίωση είναι ότι σαν υλικό φαίνεται ο οδοντωτός τροχός στην τελική του φάση όπως είναι στο Cad. Έτσι είναι πιο ξεκάθαρη η διαδρομή που ακολουθεί το κοπτικό αν και αυτή η προσομοίωση δε χρησιμοποιείται όσο η προηγούμενη (Εικόνα 2.24).



Εικόνα 2.24 Προσομοίωση βήμα προς βήμα της διαδρομής εργαλείου

## Machine Simulation Legacy

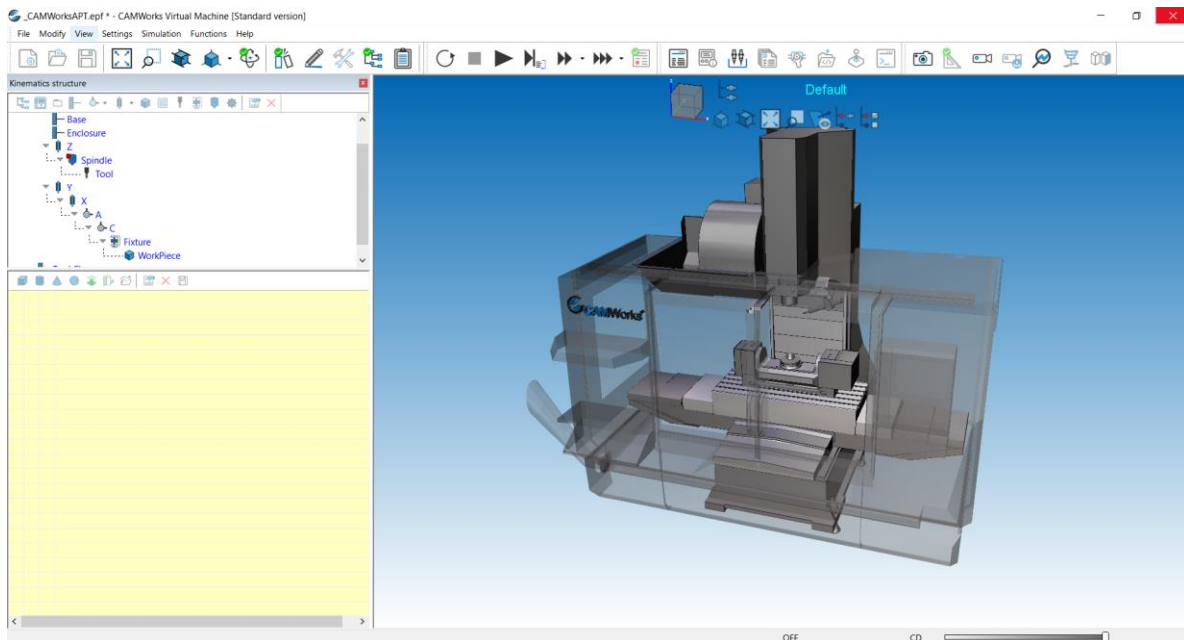
Η προσομοίωση αυτή απεικονίζει την άτρακτο με το κοπτικό και το τραπέζι της εργαλειομηχανής. Έχει ένα πίνακα που παρέχει πληροφορίες με τις συντεταγμένες τις μηχανής για κάθε σειρά του κώδικα και δείχνει την κάθε σειρά στην οποία υπάρχει σύγκρουση του κοπτικού με το δοκίμιο ή το μηχάνημα. Επιπλέον χρησιμοποιείται κατά τη διάρκεια των κατεργασιών γιατί είναι εύκολη η πρόβλεψη της κίνησης του κοπτικού και έτσι η αποφυγή ενδεχόμενης σύγκρουσης. Αυτό συμβαίνει γιατί παρουσιάζει σε ένα πίνακα τις τιμές για κάθε άξονα για κάθε σημείο (Εικόνα 2.25).



Εικόνα 2.25 Προσομοίωση της κατεργασίας στο περιβάλλον της εργαλειομηχανής

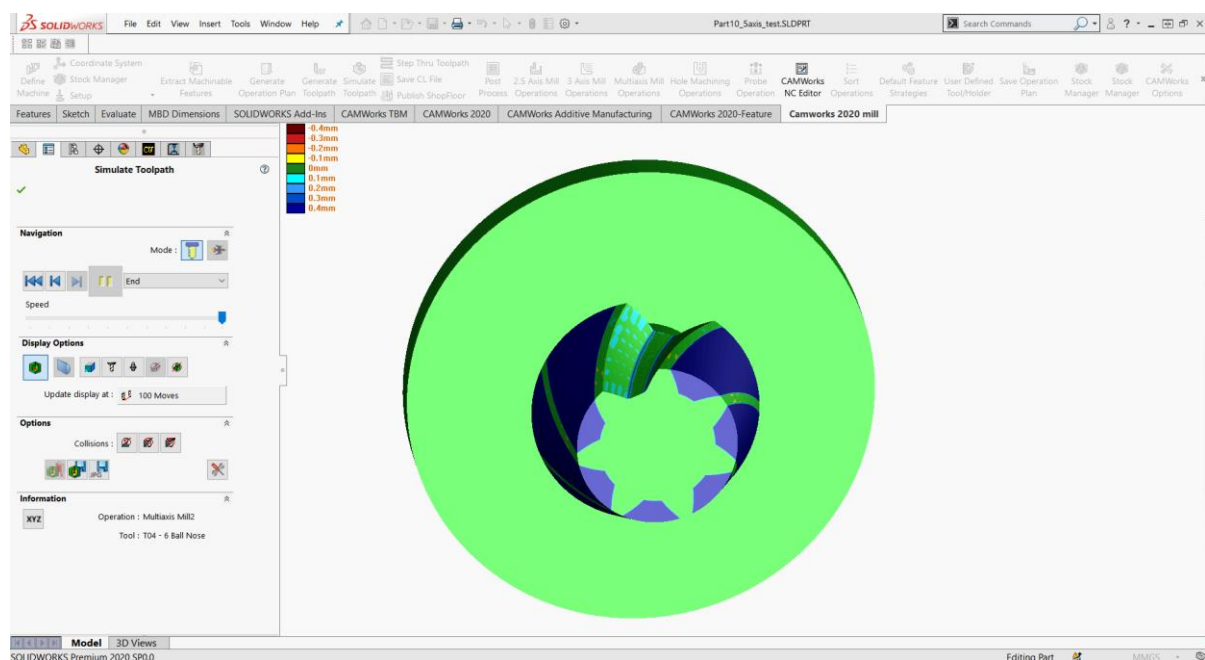
## Machine Simulation Standard- APT CL

Τέλος σε αυτή τη προσομοίωση παρουσιάζεται ολόκληρη η εργαλειομηχανή με το κοπτικό και το δοκίμιο. Για να μπορέσει να γίνει αυτή η προσομοίωση όπως και η προηγούμενη είναι απαραίτητο να δοθούν στην εταιρεία του λογισμικού Cam τα στοιχεία του μηχανήματος έτσι ώστε να δημιουργήσουν το αντίστοιχο post processor που θα απεικονίζει το μηχάνημα και τους πρόσθετους άξονες αν έχει. Το αρνητικό με αυτή την προσομοίωση είναι ότι αργεί αρκετά σε σχέση με τις άλλες γιατί έχει αρκετά στοιχεία που πρέπει να προσομοιάσει (Εικόνα 2.26).



Εικόνα 2.26 Προσομοίωση της κατεργασίας στο περιβάλλον της εργαλειομηχανής

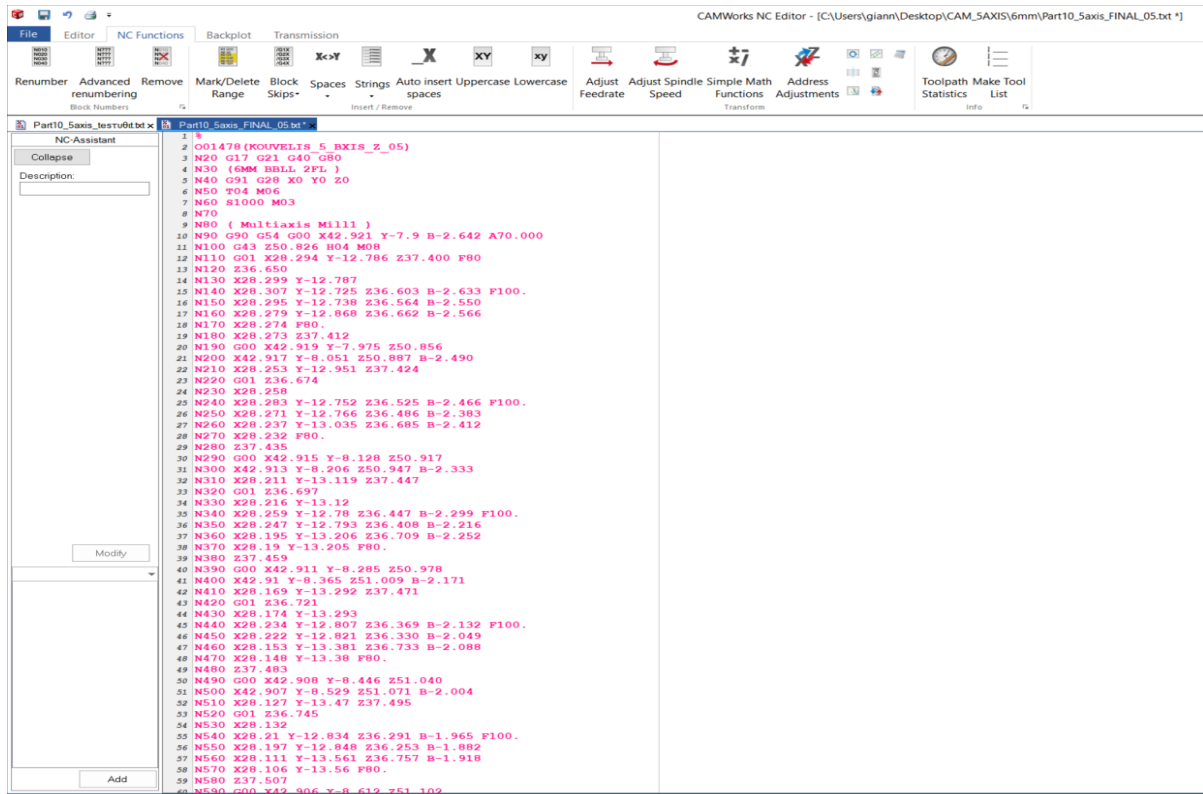
Κατά τη διάρκεια των προσομοιώσεων είναι εφικτό να απεικονίζεται το κάθε path με διαφορετικό χρώμα. Έτσι εάν υπάρξει μεγαλύτερη αφαίρεση υλικού από κάποιο path στο τελικό αποτέλεσμα είναι εύκολο να αναγνωριστεί το path που δημιουργεί το πρόβλημα. Επιπλέον οι επιφάνειες του δοκιμίου απεικονίζεται με διαφορετικά χρώματα ανάλογα με τη διαστατική απόκλιση με το επιθυμητό αποτέλεσμα. Με πράσινο χρώμα απεικονίζονται οι επιφάνειες που έχουν σωστή διάσταση με κίτρινο, πορτοκαλί και κόκκινο οι επιφάνειες στις οποίες έχει αφαιρεθεί περισσότερο υλικό από όσο έπρεπε και με γαλάζιο και μπλε οι επιφάνειες οι οποίες πρέπει να αφαιρεθεί υλικό (Εικόνα 2.27).



Εικόνα 2.27 Προσομοίωση της κατεργασίας για διαστατικό έλεγχο

## 2.6 Εξαγωγή G κώδικα

Αφού ολοκληρωθούν όλες οι προσομοιώσεις των κατεργασιών, σειρά έχει η εξαγωγή του G κώδικα από το Post Process. Ύστερα στο CAMWorks NC Editor γίνονται όσες διορθώσεις χρειάζεται ο κώδικας και δίνεται μεγάλη προσοχή κατά τη διάρκεια αλλαγής του κοπτικού το μηχάνημα να είναι στο σημείο 0 της μηχανής για την αποφυγή ατυχήματος. Όταν ο κώδικας είναι έτοιμος εισάγεται στο μηχάνημα για να ξεκινήσουν οι κατεργασίες (Εικόνα 2.26).



Εικόνα 2.26 Τμήμα από τον G κώδικα αποπεράτωσης

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. Πειραματική διαδικασία

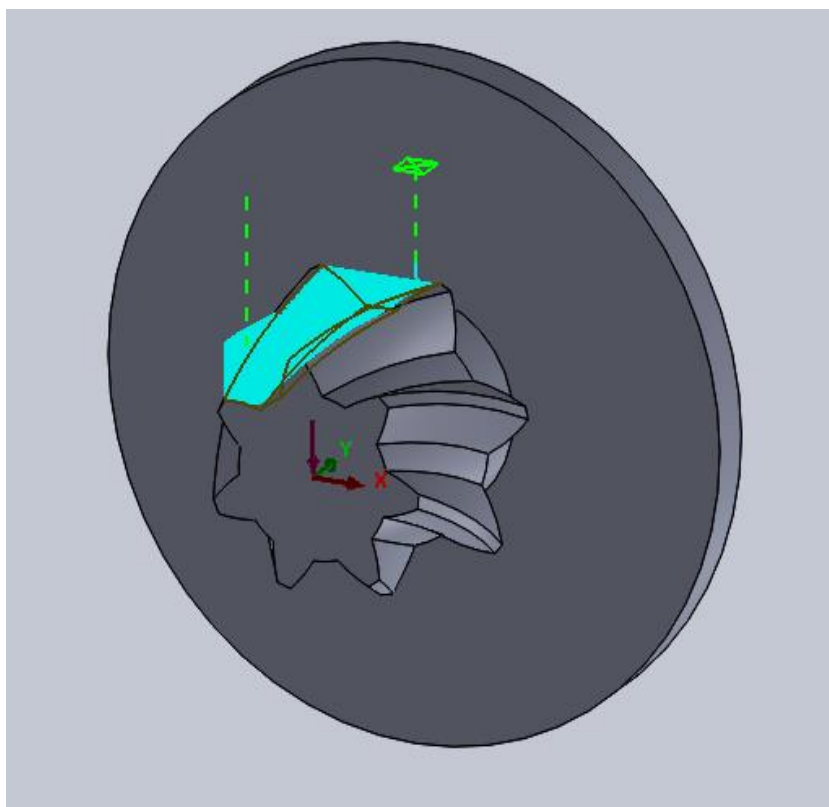
### 3.1 Καθορισμός συνθηκών κοπής

Αρχικά μετρήθηκε το βήμα που έχει ο οδοντωτός τροχός στην περιφέρεια ποδός και έγινε αντιληπτό ότι το κοπτικό που θα χρησιμοποιηθεί κατά το φινίρισμα δε θα πρέπει να έχει διάμετρο μεγαλύτερη από 6 mm. Ύστερα σημαντικός παράγοντας ήταν να βρεθεί η απόσταση που θα πρέπει να έχει η άκρη του κοπτικού από το μέσο συγκράτησης του για την αποφυγή σύγκρουσης με την πλάκα συγκράτησης του δοκιμίου. Η ελάχιστη απόσταση είναι 57 mm για αυτό το λόγο η απόσταση από το κοπτικό μέχρι το μέσο συγκράτησης είναι 60mm για να υπάρχει ένα κενό ασφαλείας. Λόγω της απόστασης των 60 mm και της μικρής διαμέτρου των κοπτικών αναμένονται κραδασμοί κατά τη διάρκεια των κατεργασιών για αυτό είναι πιθανό να γίνει μείωση των στροφών περιστροφής του κοπτικού και της πρόωσης ειδικά στο κοπτικό με διάμετρο 6mm.

Σύμφωνα με τους Rafal Golebski και Piotr Boral [1] έχει παρατηρηθεί ότι κατά την κατασκευή οδοντωτών τροχών ενδείκνυται η χρήση κοπτικών τύπου End Mill και Ball End με διάμετρο 6mm και 3mm αντίστοιχα.

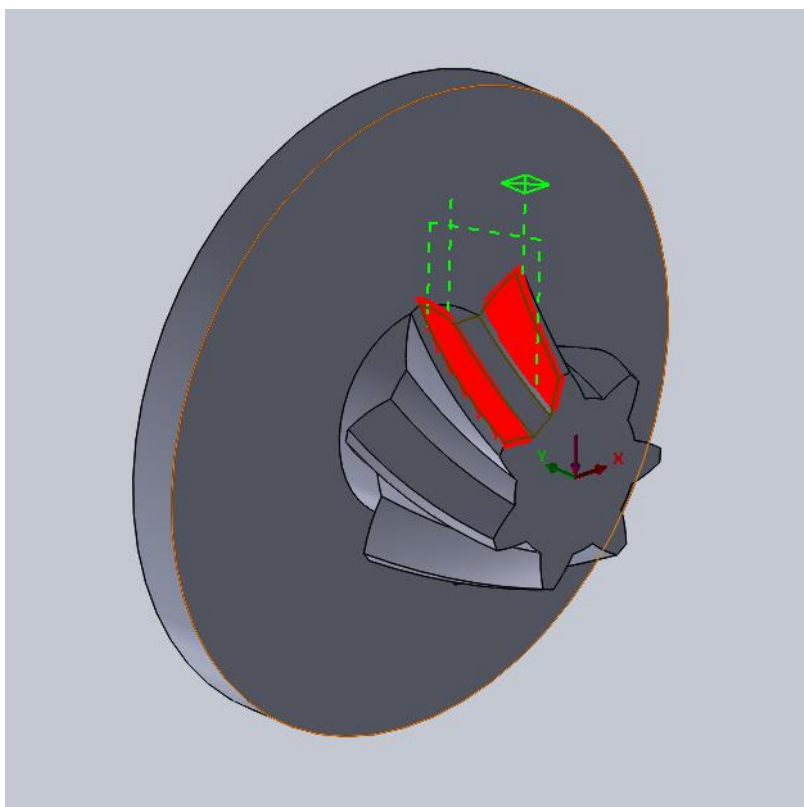
Στο πρώτο δοκίμιο το οποίο είναι CK-45 πραγματοποιήθηκε κατεργασία 3 αξόνων. Ο άξονας A έμεινε σταθερός στις 90 μοίρες καθ' όλη τη διάρκεια των κατεργασιών ενώ ο Β άξονας έκανε περιστροφή κατά 51,429 μοίρες χειροκίνητα από τον χειριστή στη μονάδα ελέγχου της εργαλειομηχανής. Η διαφορά ανάμεσα στην δημιουργία κάθε όδοντα ήταν στο φινίρισμα η οποία όμως άλλαζε σε μεγάλο βαθμό το χρόνο κατεργασιών. Έγιναν τρία διαφορετικά path με σκοπό την επίτευξη καλύτερης τελικής επιφάνειας στο συντομότερο χρονικό διάστημα. Στην πρώτη περίπτωση το Scallop ορίστηκε στα 0,01mm όμως η τελική επιφάνεια δεν ήταν η επιθυμητή για αυτό το λόγο στον επόμενο όδοντα το Scallop ορίστηκε στα 0,001m. Η τελική επιφάνεια βελτιώθηκε αισθητά ειδικά στην περιφέρεια ποδός κατά μήκος όλου του αύλακα. Στην τρίτη επανάληψη το scallop ορίστηκε στα 0,005mm το οποίο είχε παρόμοια επιφάνεια με τη δεύτερη επανάληψη αλλά χρειαζόταν το μισό χρόνο περίπου. Το πρόβλημα το οποίο παρατηρείται στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι ότι μεγάλο ποσοστό της κατεργασίας είναι νεκρός χρόνος. Η μέθοδος που έχει το 3αξονικό λογισμικό Cam είναι η κυκλική περιστροφή του κοπτικού η οποία σταδιακά αποκτά όλο και μεγαλύτερο βάθος. Έτσι από τις τέσσερις επιφάνειες από τις οποίες περνάει το κοπτικό κατεργάζεται μόνο στις δύο (Εικόνα 3.1).





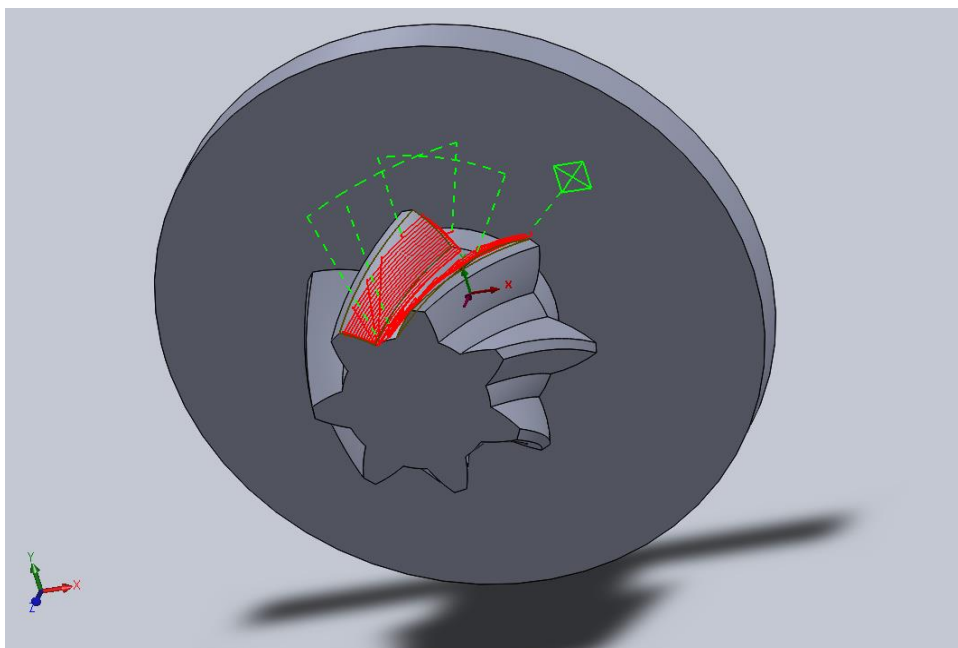
Εικόνα 3.1 Προσομοίωση του Toolpath της αποπεράτωσης με χρήση τριών αξόνων

Στο δεύτερο πείραμα χρησιμοποιήθηκε υλικό ST-37 και πραγματοποιήθηκαν κατεργασίες τριών και πέντε αξόνων ενώ το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε ήταν η πολυαξονική έκδοση. Στις πρώτες τρεις επαναλήψεις γίνονται κατεργασίες τριών αξόνων με τη χρήση πενταξονικού Cam το οποίο έχει περισσότερες επιλογές στη διαδικασία κατεργασίας. Στο προηγούμενο πείραμα παρατηρήθηκε ότι η επιφάνεια ήταν καλύτερη όταν το κοπτικό ακολουθούσε πορεία παράλληλη με τον όδοντα για αυτό το λόγο επιλέχθηκε το κοπτικό να ακολουθεί τη συγκεκριμένη πορεία (Εικόνα 3.2). Επιπλέον με αυτή τη μέθοδο ο νεκρός χρόνος είναι σχεδόν μηδενικός. Όλες οι επαναλήψεις αποτελούνταν από τρία στάδια κατεργασιών. Στο πρώτο και στο δεύτερο στάδιο γίνεται η εκχόνδριση του δοκιμίου ενώ στο τρίτο γίνεται η αποπεράτωση του. Τα πρώτα δύο στάδια παραμένουν ίδια σε όλες τις επαναλήψεις ενώ στο τρίτο στάδιο γίνονται όλες οι αλλαγές γιατί αυτό είναι το πιο χρονοβόρο και αυτό που καθορίζει την τελική επιφάνεια.



Εικόνα 3.2 Προσομοίωση του Toolpath της αποπεράτωσης με χρήση τριών αξόνων και πρόγραμμα Cam πολυαξονικό

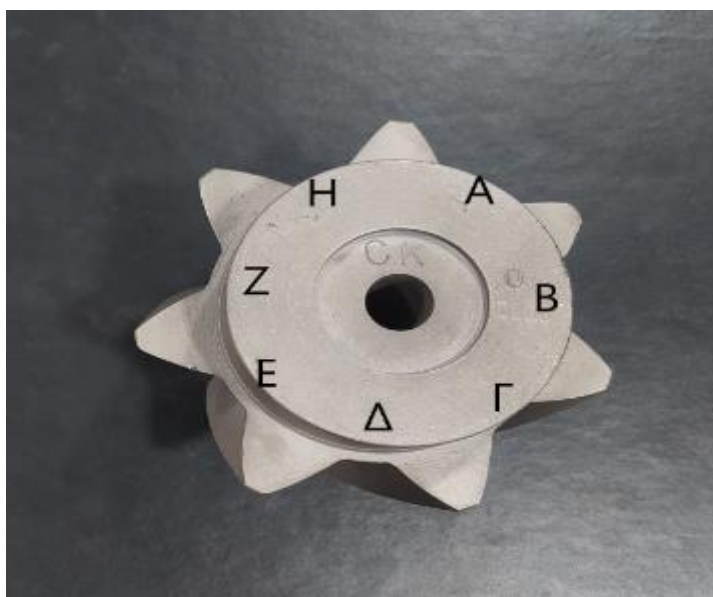
Οι επόμενοι όδοντες δημιουργήθηκαν από πενταξονικές κατεργασίες σε τρία στάδια από τα οποία τα δύο ήταν για την εκχόνδριση του τροχού και το τελευταίο για την αποπεράτωση του (Εικόνα 3.3). Η πορεία του κοπτικού επιλέχθηκε να είναι παράλληλα με τον όδοντα και έγιναν δύο αλλαγές για την επιλογή του κατάλληλου Scallop.



Εικόνα 3.3 Προσομοίωση του Toolpath της αποπεράτωσης με χρήση τριών αξόνων

### 3.2 Σχεδιασμός πειραμάτων

Κατά την εκχόνδριση του δοκιμίου σημασία έχει κυρίως ο χρόνος κατεργασιών και όχι η τελική επιφάνεια για αυτό το λόγο έγιναν κάποια πειράματα στα οποία μεταβαλλόταν η πρόωση και τα βάθη κοπής. Στα πρώτα τρία δόντια επιλέχθηκε το βάθος κοπής να είναι μεγάλο και η πρόωση να είναι μικρή ενώ στα επόμενα τέσσερα δόντια επιλέχθηκε το βάθος να είναι το μισό ενώ η πρόωση διπλάσια. Η διαφορά στο χρόνο κατεργασιών είναι μεγάλη οπότε θεωρείται καλύτερη λύση ο συνδυασμός μικρού βάθους κοπής με μεγάλη πρόωση που έχει το Rough 2. Σε όλες τις περιπτώσεις το X,Y και Z allowance ορίζεται στα 0,5 mm και έτσι θα αποφευχθεί τυχόν καταστροφή του τροχού.



Εικόνα 3.4 Θέσεις κατεργασίας στον οδοντωτό τροχό

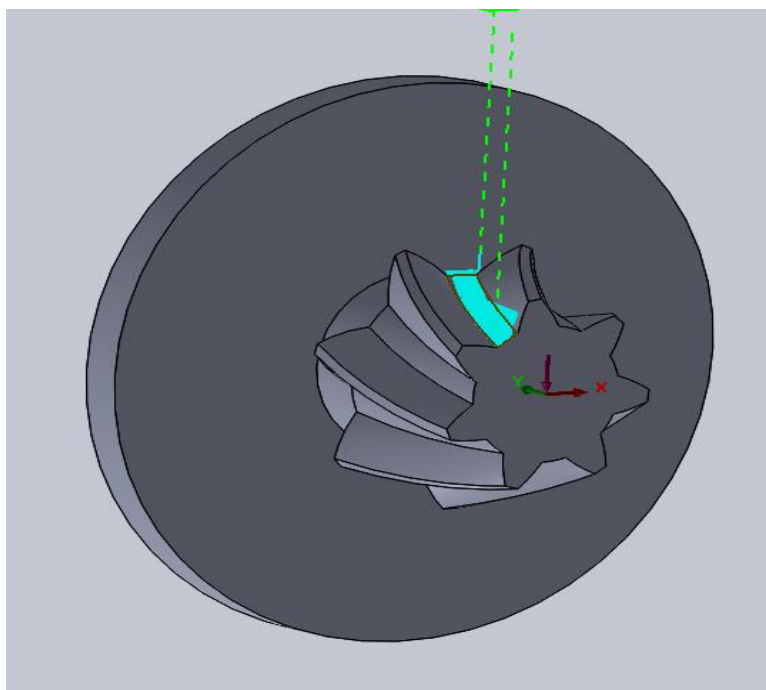
Πίνακας 3.1 Συνθήκες κοπής προσομοίωσης των κατεργασιών εκχόνδρισης με κοπτικό End Mill των 10mm		
ΘΕΣΕΙΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΤΟΝ ΟΔΟΝΤΩΤΟ ΤΡΟΧΟ	ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΟΠΗΣ	ΧΡΟΝΟΙ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ
Α, Β, Γ, Rough 1	Βάθος Κοπής: 1,5mm Πρόωση: 50mm/min Ταχύτητα περιστροφής: 2000 rpm	44:29 min
Δ,Ε, Ζ, Η Rough 2	Βάθος Κοπής: 0,75mm Πρόωση: 100mm/min Ταχύτητα περιστροφής: 2000 rpm	31:30 min

Κατά τη φάση της εκχόνδρισης με το κοπτικό των 8 mm υπάρχουν δύο πειράματα που προσομοιάζονται. Στο πρώτο η εκχόνδριση θα πραγματοποιηθεί ύστερα από τη χρήση δύο Toolpaths, τα Rough 1 και Rough 2, με μεγάλη πρόωση αλλά μικρή αφαίρεση υλικού. Στο δεύτερο πείραμα η εκχόνδριση θα πραγματοποιηθεί από ένα Toolpath, το Rough 3, με μικρότερη πρόωση αλλά μεγαλύτερη αφαίρεση υλικού. Έτσι ο χρόνος κατεργασιών στο Rough 3 είναι μικρότερος και αυτό το

καθιστά καλύτερο. Σε όλες τις περιπτώσεις το X,Y και Z η ανοχή ορίζεται στα 0,2 mm και έτσι θα αποφευχθεί τυχόν καταστροφή του τροχού.

Πίνακας 3.2 Συνθήκες κοπής προσομοίωσης των κατεργασιών εκχόνδρισης με κοπτικό Ball Mill των 8mm		
ΘΕΣΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΤΟΝ ΟΔΟΝΤΩΤΟ ΤΡΟΧΟ	ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΟΠΗΣ	ΧΡΟΝΟΙ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ
A, B, Γ, Δ, E,  Rough 1	Βάθος Κοπής: 0,6 mm Πρόωση: 125mm/min Ταχύτητα περιστροφής: 2000 rpm Allowance: 0,7mm	15:41 min
A, B, Γ, Δ, E,  Rough 2	Βάθος Κοπής: 0,4mm Πρόωση: 125mm/min Ταχύτητα περιστροφής: 2000 rpm Allowance: 0,4mm	22:48 min
Z, H  Rough 3	Βάθος Κοπής: 0,4mm Πρόωση: 100mm/min Ταχύτητα περιστροφής: 2000 rpm Allowance: 0,4mm	28:24 min

Κατά την αποπεράτωση του δοκιμίου έγινε χρήση δύο Toolpaths για τη δημιουργία σωστής τελικής επιφάνειας. Επειδή η τελική εκχόνδριση έγινε από κοπτικό των 8 mm στο πόδι κάθε όδοντα έχει μείνει αρκετό υλικό προς αφαίρεση κάτι που θα δημιουργήσει πρόβλημα κατά την αποπεράτωση . Για αυτό το λόγο το Toolpath στο Rough 1 θα κατεργαστεί την περιφέρεια ποδός για να αφαιρέσει το περιττό υλικό με ανοχή στα 0,2 mm ( Εικόνα 3.5 ).



Εικόνα 3.5 Προσομοίωση του Toolpath της εκχόνδρισης με κοπτικό των 6mm.

Τέλος στη φάση της αποπεράτωσης έγιναν τρία διαφορετικά Toolpaths στα οποία αλλάζει το scallop με στόχο την καλύτερη επιφάνεια στο μικρότερο δυνατό χρόνο. Στην αρχή ορίστηκε ένα

μεγάλο Scallop με κανονική πρόωση και στις επόμενες προσομοιώσεις το Scallop ήταν μικρότερο και οι προώσεις μεγαλύτερες. Το πιο σύντομο Toolpath είναι το πρώτο που έχει το μεγαλύτερο Scallop όμως είναι πιθανό να μην έχει καλή τελική επιφάνεια.

Πίνακας 3.3 Συνθήκες κοπής προσομοίωσης τριαξονικών κατεργασιών αποπεράτωσης με κοπτικό Ball Mill των 6 mm.		
ΘΕΣΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΤΟΝ ΟΔΟΝΤΩΤΟ ΤΡΟΧΟ	ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΟΠΗΣ	ΧΡΟΝΟΙ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ
A,B,Γ,Δ,E,Z,H Rough 1	Βάθος Κοπής: 0,4mm Πρόωση: 125mm/min Ταχύτητα περιστροφής: 2000 rpm	7:54 min
A,B Finish 1	Scallop: 0,01mm Πρόωση: 200mm/min Ταχύτητα περιστροφής: 2000 rpm	41:11 min
Γ Finish 2	Scallop: 0,001mm Πρόωση: 300mm/min Ταχύτητα περιστροφής: 2000 rpm	85:07 min
Δ,E,Z,H Finish 3	Scallop: 0,005mm Πρόωση: 250mm/min Ταχύτητα περιστροφής: 2000 rpm	46:25 min

Αφού ολοκληρώθηκαν οι προσομοιώσεις για την τριαξονική κοπή σειρά έχει η προσομοίωση της τριαξονικής κοπής με τη χρήση πολυαξονικού προγράμματος. Κατά την προσομοίωση του πειράματος για τα κοπτικά των 10 mm και 8mm γίνεται χρήση των προηγούμενων συνθηκών κοπής μιας και είναι οι κατεργασίες με την καλύτερη και πιο σύντομη διαδρομή. Κατά την προσομοίωση της αποπεράτωσης ύστερα από αρκετές δοκιμές έγινε χρήση των προηγούμενων δεδομένων.

Πίνακας 3.4 Συνθήκες κοπής προσομοίωσης τριαξονικών κατεργασιών αποπεράτωσης με χρήση πολυαξονικού προγράμματος Cam.		
ΘΕΣΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΤΟΝ ΟΔΟΝΤΩΤΟ ΤΡΟΧΟ	ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΟΠΗΣ	ΧΡΟΝΟΙ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ
A,B,Γ,Δ,E,Z,H Rough 1	Βάθος Κοπής: 0,4mm Πρόωση: 125mm/min Ταχύτητα περιστροφής: 2000 rpm	7:16 min
A,B Finish 1	Scallop: 0,01mm Max Stepover: 0,49mm Πρόωση: 200mm/min Ταχύτητα περιστροφής: 2000 rpm	28:42 min
Γ Finish 2	Scallop: 0,001mm Max Stepover: 0,15mm Πρόωση: 300mm/min Ταχύτητα περιστροφής: 2000 rpm	59:56 min
Δ,E,Z,H Finish 3	Scallop: 0,005mm Max Stepover: 0,35mm Πρόωση: 250mm/min Ταχύτητα περιστροφής: 2000 rpm	31:28 min

Κατά την προσομοίωση για την τρίτη φάση του πειράματος που θα γίνει χρήση και των πέντε αξόνων της μηχανής, γίνεται χρήση των προηγούμενων δεδομένων για τα κοπτικά των 10 mm και 8mm μιας και είναι οι κατεργασίες με την καλύτερη και πιο σύντομη διαδρομή. Κατά την προσομοίωση της αποπεράτωσης πραγματοποιήθηκαν αρκετές αλλαγές γιατί άλλαξε η μέθοδος με την οποία γίνονται οι κατεργασίες στο δοκίμιο.

Όπως και με το προηγούμενο δοκίμιο στο πόδι κάθε όδοντα έχει μείνει αρκετό υλικό προς αφαίρεση κάτι που θα δημιουργήσει πρόβλημα κατά την αποπεράτωση . Για αυτό το λόγο το Toolpath του Rough 1 θα κατεργαστεί την περιφέρεια ποδός για να αφαιρέσει το περιττό υλικό με ανοχή στα 0,2 mm.

Πρώτα έγιναν οι κατεργασίες στις επιφάνειες που ορίζει η καμπύλη της εξελιγμένης σε όλους τους όδοντες με τα Finish 1, Finish 2 και Finish 3 και ύστερα οι κατεργασίες στο πόδι του κάθε όδοντα με τα Finish 4, Finish 5 και Finish 6.

Πίνακας 3.5 Συνθήκες κοπής προσομοίωσης πενταγωνικών κατεργασιών αποπεράτωσης με κοπτικό Mill end των 6mm		
ΘΕΣΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΤΟΝ ΟΔΟΝΤΩΤΟ ΤΡΟΧΟ	ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΟΠΗΣ	ΧΡΟΝΟΙ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ
A,B,Γ,Δ,E,Z,H  Rough 1	Max Scallop: 0,6mm Max Stepover: 0,02mm Πρώωση: 100mm/min Ταχύτητα περιστροφής: 1500rpm	4:18 min
A  Finish 1	Max Scallop: 0,01mm Max Stepover: 0,49mm Πρώωση: 200mm/min Ταχύτητα περιστροφής: 3000rpm	10:22 min
B  Finish 2	Max Scallop: 0,001mm Max Stepover: 0,15mm Πρώωση: 300mm/min Ταχύτητα περιστροφής: 3000rpm	22:04 min
Γ,Δ,E,Z,H  Finish 3	Max Scallop: 0,005mm Max Stepover: 0,35mm Πρώωση: 250mm/min Ταχύτητα περιστροφής: 3000rpm	11:51 min
A  Finish 4	Max Scallop: 0,01mm Max Stepover: 0,49mm Πρώωση: 200mm/min Ταχύτητα περιστροφής: 3000rpm	3:12 min
B  Finish 5	Max Scallop: 0,001mm Max Stepover: 0,15mm Πρώωση: 200mm/min Ταχύτητα περιστροφής: 3000rpm	6:24 min
Γ,Δ,E,Z,H  Finish 6	Max Scallop: 0,001mm Max Stepover: 0,35mm Πρώωση: 200mm/min Ταχύτητα περιστροφής: 3000rpm	3:34 min

Πίνακας 3.6 Βέλτιστοι χρόνοι προσομοίωσης κατεργασιών.				
Κοπτικό/ Είδος κατεργασίας	Συνθήκες κοπής	Τριαξονική Κατεργασία	Τριαξονική κατεργασία με πολυαξονικό Cam	Πενταξονική κατεργασία
Κοπτικό 10mm	Rough 2	31:30 min	31:30 min	31:30 min
Κοπτικό 8mm	Rough 3	28:24 min	28:24 min	28:24 min
Κοπτικό 6mm	Rough 1	7:54 min	7:16 min	4:18 min
Κοπτικό 6mm	Finish 1	41:11 min	28:42 min	10:22 min
Κοπτικό 6mm	Finish 6			3:12 min
<b>Σύνολο</b>		<b>109:59 min</b>	<b>95:52 min</b>	<b>77:46 min</b>
<b>Ποσοστιαίο σύνολο</b>		<b>100%</b>	<b>87,27%</b>	<b>70,45%</b>

Από τον παραπάνω πίνακα παρατηρείται ότι η βέλτιστη λύση είναι η κατασκευή οδοντωτού τροχού με πενταξονική κατεργασία όμως είναι πιθανό στις πραγματικές συνθήκες να μην είναι η βέλτιστη. Επιπλέον θα υπάρξουν μεταβολές στους χρόνους κατεργασίας γιατί είναι πιθανό η τελική επιφάνεια να μην είναι η επιθυμητή.



## Κεφάλαιο 4. Συνθήκες και χρόνοι κατεργασιών σε πραγματικές συνθήκες

Κατά τη φάση της εκχόνδρισης οι παράγοντες που έχουν σημασία είναι ο χρόνος κατεργασιών και η φθορά του κοπτικού όμως λόγω της κατασκευής μόνο δύο οδοντωτών τροχών δεν αναμένεται φθορά στο κοπτικό γι' αυτό το λόγο δίνεται σημασία κυρίως στο χρόνο κατεργασίας. Λόγω της μεγάλης απόστασης που έχουν οι ακμές του κοπτικού από το μέσο συγκράτησης του παρατηρούνται κραδασμοί όπως αναμενόταν για αυτό το λόγο έγινε μείωση των στροφών του κοπτικού. Το Toolpath του Rough 2 είναι πιο σύντομο για αυτό επιλέγεται η χρήση του. Έτσι απορρέει το συμπέρασμα ότι είναι προτιμότερο η κατεργασία να αποτελείται από πολλές επαναλήψεις με μικρά βάθη κοπής όπως έχει το Rough 2 παρά από λίγες με μεγάλα βάθη όπως έχει το Rough 1.

Πίνακας 4.1 Πραγματικοί χρόνοι των κατεργασιών εκχόνδρισης με κοπτικό τύπου End Mill των 10mm		
ΘΕΣΕΙΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΤΟΝ ΟΔΟΝΤΩΤΟ ΤΡΟΧΟ	ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΟΠΗΣ	ΧΡΟΝΟΙ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ
A, B, Γ, Rough 1	Βάθος Κοπής: 1,5mm Πρόωση: 40mm/min Ταχύτητα περιστροφής: 700 rpm	56:49 min
Δ,Ε, Ζ, Η Rough 2	Βάθος Κοπής: 0,75mm Πρόωση: 75mm/min Ταχύτητα περιστροφής: 800 rpm	35:19 min



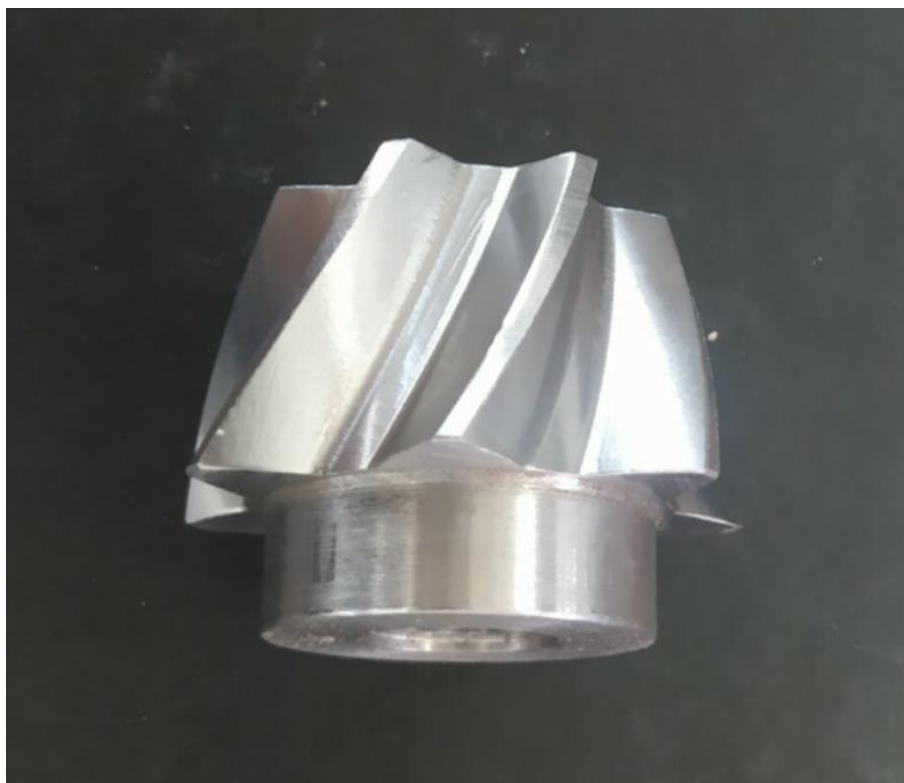
Εικόνα 4.1 Ολοκλήρωση της εκχόνδρισης του δοκιμίου με κοπτικό End Mill

Κατά τη δεύτερη φάση της εκχόνδρισης έγινε μείωση των στροφών περιστροφής του κοπτικού και αύξηση της πρόωσης. Τελικά επιλέγεται η κατεργασία του Rough 3 που αποτελείται από πολλές επαναλήψεις με μικρά βάθη κοπής γιατί ολοκληρώνεται σε συντομότερο χρονικό διάστημα.

Πίνακας 4.2 Πραγματικοί χρόνοι των κατεργασιών εκχόνδρισης με κοπτικό τύπου Ball Mill των 8mm		
ΘΕΣΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΤΟΝ ΟΔΟΝΤΩΤΟ ΤΡΟΧΟ	ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΟΠΗΣ	ΧΡΟΝΟΙ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ
A, B, Γ, Δ, E,  Rough 1	Βάθος Κοπής: 0,6 mm Πρόωση: 140mm/min Ταχύτητα περιστροφής: 1000 rpm Allowance: 0,7mm	13:08 min
A, B, Γ, Δ, E,  Rough 2	Βάθος Κοπής: 0,4mm Πρόωση: 140mm/min Ταχύτητα περιστροφής: 1000 rpm Allowance: 0,4mm	19:38 min
Z, H  Rough 3	Βάθος Κοπής: 0,4mm Πρόωση: 100mm/min Ταχύτητα περιστροφής: 900 rpm Allowance: 0,4mm	36:57 min

Κατά τη φάση της αποπεράτωσης έγινε μεγάλη μείωση των στροφών περιστροφής του κοπτικού στο Rough 1 λόγω των κραδασμών όταν υπήρχε μεγάλη αφαίρεση υλικού. Όμως σε αυτή τη φάση ο σημαντικότερος παράγοντας είναι η τελική επιφάνεια και όχι ο χρόνος. Για αυτό το λόγο το καλύτερο Toolpath είναι το Finish 3 που δημιουργεί καλή τελική επιφάνεια κι ας διαρκεί περισσότερο χρόνο.

Πίνακας 4.3 Πραγματικοί χρόνοι των τριαξονικών κατεργασιών αποπεράτωσης με κοπτικό Ball Mill των 6mm		
ΘΕΣΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΤΟΝ ΟΔΟΝΤΩΤΟ ΤΡΟΧΟ	ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΟΠΗΣ	ΧΡΟΝΟΙ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ
A,B,Γ,Δ,E,Z,H Rough 1	Βάθος Κοπής: 0,4mm Πρόωση: 100mm/min Ταχύτητα περιστροφής: 600 rpm	10:37 min
A Finish 1	Scallop: 0,01mm Πρόωση: 220mm/min Ταχύτητα περιστροφής: 900 rpm	41:11 min
B Finish 2	Scallop: 0,001mm Πρόωση: 330mm/min Ταχύτητα περιστροφής: 1000 rpm	77:20 min
Γ,Δ,E,Z,H Finish 3	Scallop: 0,005mm Πρόωση: 275mm/min Ταχύτητα περιστροφής: 900 rpm	42:12 min



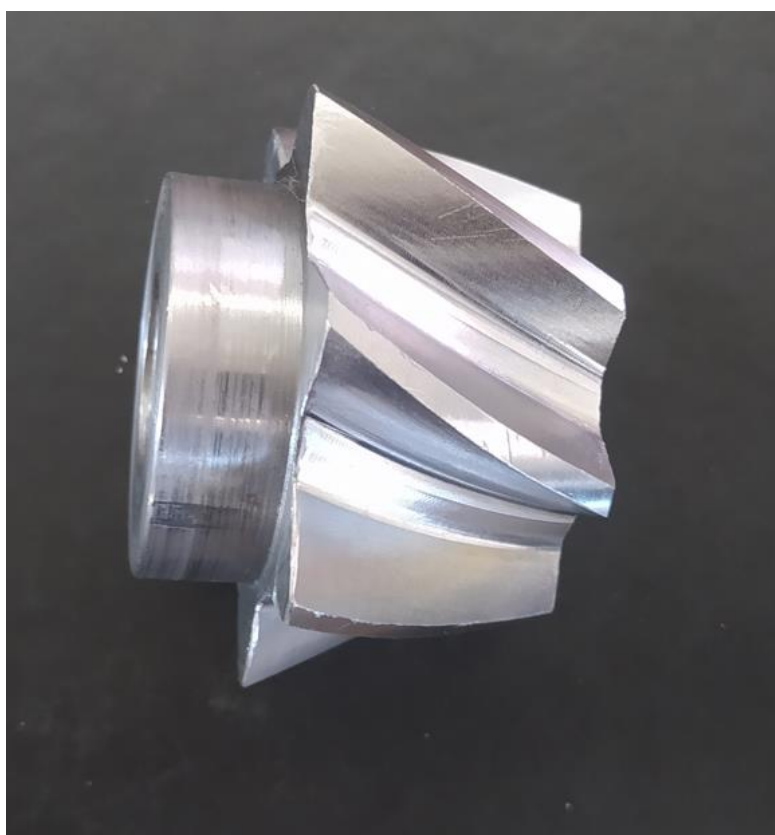
Εικόνα 4.2 Ολοκλήρωση αποπεράτωσης με τριαξονική κοπή

Πίνακας 4.4 Πραγματικοί χρόνοι τριαξονικών κατεργασιών αποπεράτωσης με χρήση πολυαξονικού προγράμματος Cam με κοπτικό Ball Mill των 6mm		
ΘΕΣΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΤΟΝ ΟΔΟΝΤΩΤΟ ΤΡΟΧΟ	ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΟΠΗΣ	ΧΡΟΝΟΙ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ
A,B,Γ,Δ,E,Z,H Rough 1	Βάθος Κοπής: 0,4mm Πρόωση: 100mm/min Ταχύτητα περιστροφής: 700 rpm	9:54 min
A Finish 1	Scallop: 0,01mm Πρόωση: 200mm/min Ταχύτητα περιστροφής: 900 rpm	22:48 min
B Finish 2	Scallop: 0,001mm Πρόωση: 330mm/min Ταχύτητα περιστροφής: 1000 rpm	50:17 min
Γ,Δ,E,Z,H Finish 3	Scallop: 0,005mm Πρόωση: 275mm/min Ταχύτητα περιστροφής: 1000 rpm	23:34 min

Κατά τη φάση της αποπεράτωσης του δοκιμίου με πενταξονική κοπή έγιναν μεγάλες αλλαγές στην πρόωση και στις στροφές. Το κοπτικό δεν παρουσίαζε τόσους κραδασμούς όσο στην τριαξονική κοπή για αυτό οι στροφές είναι από 1300 έως 1500. Η πρόωση είναι σχεδόν διπλάσια σε σχέση με την τριαξονική κοπή και έτσι οι χρόνοι είναι αρκετά μικρότεροι. Ο συνδυασμός των Toolpath του Finish 3 και Finish 6 δημιουργεί την επιθυμητή τελική επιφάνεια στον μικρότερο χρόνο για αυτό επιλέχθηκε ως η καταλληλότερη.

Πίνακας 4.5 Πραγματικοί χρόνοι πενταξονικών κατεργασιών αποπεράτωσης με κοπτικό Ball Mill των 6mm		
ΘΕΣΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΤΟΝ ΟΔΟΝΤΩΤΟ ΤΡΟΧΟ	ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΟΠΗΣ	ΧΡΟΝΟΙ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ
A,B,Γ,Δ,E,Z,H Rough 1	Max Scallop: 0,6mm Max Steperover: 0,02mm Πρόωση: 100mm/min Ταχύτητα περιστροφής: 900rpm	4:18 min
A Finish 1	Max Scallop: 0,01mm Max Steperover: 0,49mm Πρόωση: 340mm/min Ταχύτητα περιστροφής: 1300rpm	7:26 min
B Finish 2	Max Scallop: 0,001mm Max Steperover: 0,15mm Πρόωση: 510mm/min Ταχύτητα περιστροφής: 1300rpm	12:53min
Γ,Δ,E,Z,H Finish 3	Max Scallop: 0,005mm Max Steperover: 0,35mm Πρόωση: 450mm/min Ταχύτητα περιστροφής: 1300rpm	7:54 min

A	Max Scallop: 0,01mm Max Steperover: 0,49mm Πρόωση: 360mm/min Ταχύτητα περιστροφής: 1500rpm	1:46 min
Finish 4		
B	Max Scallop: 0,001mm Max Steperover: 0,15mm Πρόωση: 560mm/min Ταχύτητα περιστροφής: 1500rpm	3:38 min
Finish 5		
Γ,Δ,Ε,Ζ,Η	Max Scallop: 0,001mm Max Steperover: 0,35mm Πρόωση: 600mm/min Ταχύτητα περιστροφής: 1500rpm	1:51 min
Finish 6		



Εικόνα 4.3 Ολοκλήρωση αποπεράτωσης με πενταξονική κοπή

Πίνακας 4.6 Βέλτιστοι πραγματικοί χρόνοι κατεργασιών.				
Κοπτικό/ Είδος κατεργασίας	Συνθήκες κοπής	Τριαξονική Κατεργασία	Τριαξονική κατεργασία με πολυαξονικό Cam	Πενταξονική κατεργασία
Κοπτικό 10mm	Rough 2	35:19 min	35:19 min	35:19 min
Κοπτικό 8mm	Rough 1	13:08 min	13:08 min	13:08 min
Κοπτικό 8mm	Rough 2	19:38 min	19:38 min	19:38 min

Κοπτικό 6mm	Rough 1	10:37 min	9:54 min	4:18 min
Κοπτικό 6mm	Finish 3	42:12 min	23:34 min	7:54 min
Κοπτικό 6mm	Finish 3			1:51 min
<b>Συνολικά για ένα όδοντα</b>		<b>120:54 min</b>	<b>101:33 min</b>	<b>82:08 min</b>
<b>Συνολικά για ένα τροχό</b>		<b>846:18 min</b>	<b>710:51 min</b>	<b>574:56 min</b>
<b>Ποσοστιαίο σύνολο</b>		<b>100%</b>	<b>83,92%</b>	<b>67,85</b>

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. Θερμική επεξεργασία και έλεγχος ποιότητας

### 5.1 Θερμική επεξεργασία οδοντωτών τροχών

Κατά την κατασκευή ενός οδοντωτού τροχού αρκετές φορές κρίνεται απαραίτητη η θερμική επεξεργασία του για να έχει μεγαλύτερη αντοχή και να αποφευχθεί η άμεση φθορά της οδόντωσης του. Το είδος της σκλήρυνσης του κάθε τροχού εξαρτάται από την περιεκτικότητα του μετάλλου σε άνθρακα και από το βάθος της σκλήρυνσης που απαιτείται. Στην περίπτωση του Ck-45 το μέταλλο περιέχει άνθρακα, για αυτό επιλέγεται η εναζώτωση η οποία δεν προκαλεί μεγάλες παραμορφώσεις στα δοκίμια. Αντίθετα στην περίπτωση του οδοντωτού τροχού από St-37 το μέταλλο δεν περιέχει άνθρακα με αποτέλεσμα να μη μπορεί να πραγματοποιηθεί σκλήρυνση του τροχού. Για αυτό το λόγο η θέρμανση του πραγματοποιείται σε περιβάλλον με ενανθρακωτικό μέσο και αφού φτάσει σε αρκετά μεγάλη θερμοκρασία ψύχεται βίαια.

Η παραμόρφωση του δοκιμίου εξαρτάται από τη διάμετρο του τροχού και από το πάχος της στεφάνης επίστεψης. Όσο μεγαλύτερη είναι η διάμετρος και όσο μικρότερο το πάχος της στεφάνης τόσο περισσότερο διαστέλλετε ο τροχός. Για αυτό το λόγο σε τροχούς μεγάλης διαμέτρου δεν επιλέγεται υλικό που θα χρειαστεί ενανθράκωση

### 5.2 Έλεγχος ποιότητας

Κατά την κατασκευή ενός δοκιμίου απαραίτητος είναι ο έλεγχος της κατασκευαστικής ποιότητας του. Στους οδοντωτούς τροχούς η ακρίβεια στις διαστάσεις, στη μορφή και στην ποιότητα της τελικής επιφάνειας έχει σημαντική επίδραση διότι πρόκειται για συνεργαζόμενα μέρη. Οι ακρίβεια στις διαστάσεις μπορεί να ελεγχθεί από όργανα μέτρησης όπως είναι το παχύμετρο και το μικρόμετρο αν και πλέον γίνεται χρήση μηχανών μέτρησης συντεταγμένων (CMM) και μηχανημάτων τρισδιάστατης σάρωσης (Εικόνα 5.1).

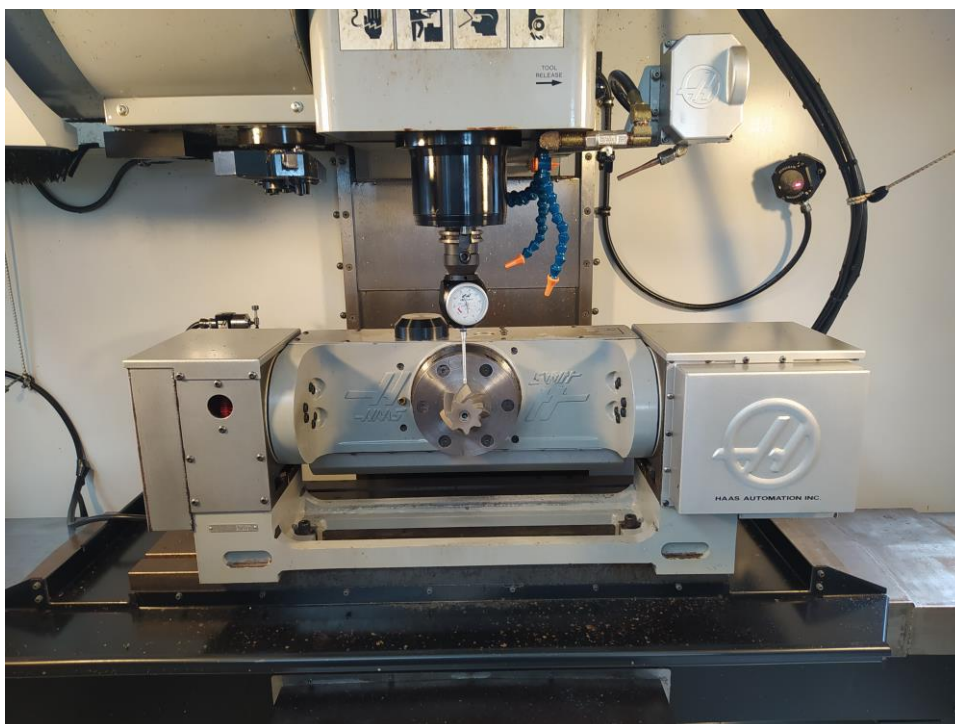




Εικόνα 5.1 Μετρητική μηχανή συντεταγμένων CMM

Στην περίπτωση που εξετάζεται οι μετρήσεις έπρεπε να πραγματοποιηθούν σε μηχάνημα CMM για να αποδοθεί και η μορφή που έχει ο κάθε όδοντας. Όμως επειδή δεν υπάρχει τέτοιο μηχάνημα στο διατμηματικό εργαστήριο οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο κέντρο κατεργασίας με τη βοήθεια του ωρολογιακού τρισδιάστατου προβόλου. Με αυτό τον τρόπο πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε τέσσερα χαρακτηριστικά μεγέθη καθώς δεν είναι εφικτή η μέτρηση όλων των παραμέτρων του τροχού.

Από την οθόνη της εργαλειομηχανής ο χειριστής βλέπει τις συντεταγμένες του σημείου στο οποίο βρίσκεται ο πρόβολος και σε συνάρτηση με το σημείο μηδέν που αποτελεί την αρχή των αξόνων υπολογίζεται η απόσταση του κάθε σημείου από το 0. Έτσι είναι εφικτός ο υπολογισμός του ύψους του δοντιού και της διαμέτρου κάθε περιφέρειας. Επειδή η επιφάνεια είναι κωνική οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε συγκεκριμένα σημεία (X,Y ) (Εικόνα 5.2).



Εικόνα 5.2 Μετρήσεις οδοντωτού τροχού με τη χρήση τρισδιάστατου ωρολογιακού προβόλου

Πίνακας 5.1 Διαστάσεις οδοντωτού τροχού πριν και μετά τη σκλήρυνση			
St-37	Πριν τη σκλήρυνση	Μετά τη σκλήρυνση	Διαφορά
Ύψος όδοντα στην εξωτερική διάμετρο	10,890 mm	11,288 mm	0,398 mm
Ύψος όδοντα στην εσωτερική διάμετρο	8,300 mm	8,577 mm	0.277 mm
Εξωτερική διάμετρος	77,883 mm	78,680 mm	0.797 mm
Εσωτερική διάμετρος	54,921 mm	55,475 mm	0,554mm

Πίνακας 5.2 Διαστάσεις οδοντωτού τροχού πριν και μετά τη σκλήρυνση			
Ck-45	Πριν τη σκλήρυνση	Μετά τη σκλήρυνση	Διαφορά
Ύψος όδοντα στην εξωτερική διάμετρο	10,990 mm	11,068 mm	0,078 mm
Ύψος όδοντα στην εσωτερική διάμετρο	8,151 mm	8,158 mm	0.007 mm
Εξωτερική διάμετρος	77,962 mm	78,118 mm	0.156 mm
Εσωτερική διάμετρος	55,017 mm	55,032 mm	0,015mm

Από τους παραπάνω πίνακες παρατηρείται ότι η παραμόρφωση του οδοντωτού τροχού από Ck-45 είναι σχετικά μικρή και για αυτό το λόγο θα μπορούσε ο οδοντωτός τροχός να δουλέψει έτσι όπως είναι. Ο άλλος οδοντωτός τροχός έχει παραμορφωθεί αρκετά και για αυτό κρίνεται απαραίτητη η λείανση του για να μπορεί να συνεργαστεί με την κορώνα του.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. Συμπεράσματα

Σκοπός της εργασίας ήταν η ανάπτυξη ενός κωνικού οδοντωτού τροχού με σπειροειδή οδόντωση με χρήση CNC εργαλειομηχανών στον μικρότερο δυνατό χρόνο. Έγινε σύγκριση ανάμεσα στους χρόνους τριαξονικής και πενταξονικής κατεργασίας και τέλος μετρήθηκε η παραμόρφωση που είχαν οι τροχοί από την θερμική επεξεργασία.

Αρχικά σε λογισμικό Cad πραγματοποιήθηκε η σχεδίαση ενός κωνικού οδοντωτού τροχού με σπειροειδή οδόντωση. Ύστερα σε λογισμικό Cam δημιουργήθηκαν τα Toolpaths για την κατασκευή των τροχών. Πραγματοποιήθηκε μελέτη και μετά από αρκετά πειράματα δημιουργήθηκε ένα σύνολο κατεργασιών το οποίο εκτελέστηκε από τριαξονική εργαλειομηχανή. Μέσα από τις προσπάθειες που έγιναν κατά τη δημιουργία των Toolpaths παρατηρήθηκε ότι είναι καλύτερο η αφαίρεση του υλικού να γίνεται από πολλές επαναλήψεις με μικρά βάθη κοπής γιατί έτσι επιτυγχάνεται μείωση του χρόνου κατεργασιών. Κατά τη διάρκεια της αποπεράτωσης λόγω των κραδασμών έγινε μείωση των στροφών του κοπτικού και μείωση της πρόωσης. Επιπλέον παρατηρήθηκε ότι η τελική επιφάνεια είναι καλύτερη όταν η πορεία που ακολουθεί το κοπτικό είναι παράλληλη με την πορεία του όδοντα.

Ύστερα δημιουργήθηκε ένα σύνολο κατεργασιών για τριαξονική κοπή αλλά σε πολυαξονικό λογισμικό Cam. Αυτό έγινε επειδή στο πολυαξονικό Cam δίνονται περισσότερες μέθοδοι κατεργασίας και μία από αυτές είναι η παράλληλη κίνηση του κοπτικού με τον όδοντα που είναι η βέλτιστη. Με αυτή τη μέθοδο κατεργασίας η τελική επιφάνεια που δημιουργήθηκε ήταν αρκετά καλή και κατά την κοπή οι κραδασμοί ήταν λιγότεροι σε σχέση με τις κατεργασίες του τριαξονικού προγράμματος γι' αυτό δε χρειάστηκε τόσο μεγάλη μείωση της πρόωσης. Αφού ολοκληρώθηκαν οι κατεργασίες έγινε μελέτη για την ανάπτυξη κώδικα για πενταξονική κατεργασία. Εξαιτίας της κλίσης που είχε το κοπτικό ως προς την επιφάνεια κατεργασίας οι κραδασμοί μειώθηκαν ακόμα περισσότερο με αποτέλεσμα να αυξηθεί η πρόωση και να μειωθεί ο χρόνος κατεργασίας.

Τέλος πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε τέσσερα χαρακτηριστικά μεγέθη των οδοντωτών τροχών με τη χρήση του τρισδιάστατου ωρολογιακού προβόλου. Στην αρχή έγιναν μετρήσεις στους τροχούς μόλις ολοκληρώθηκε η κατασκευή τους. Ύστερα οι τροχοί στάλθηκαν για θερμική επεξεργασία όπου στον ένα τροχό έγινε ενανθράκωση ενώ στο δεύτερο τροχό έγινε εναζώτωση. Οι μετρήσεις έγιναν πριν και μετά τη θερμική επεξεργασία των τροχών για να γίνει σύγκριση των τιμών και να βρεθούν οι παραμορφώσεις τους. Η βαφή που έγινε ήταν ενανθράκωση στον τροχό από St-37 και εναζώτωση στον τροχό από Ck-45. Τελικά παρατηρήθηκε ότι ο τροχός στον οποίο έγινε εναζώτωση παραμορφώθηκε σε τέτοιο βαθμό όπου η λείανση δεν είναι απαραίτητη. Αντίθετα ο τροχός στον οποίο έγινε ενανθράκωση παραμορφώθηκε τόσο που είναι ακατάλληλος για άμεση χρήση και κρίνεται απαραίτητη η λείανση του. Αυτό οφείλεται στην υψηλή θερμοκρασία που απαιτείται στη διαδικασία της ενανθράκωσης με αποτέλεσμα κατά τη βίαιη ψύξη του ο τροχός να παραμορφώνεται.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7. Βιβλιογραφία

- [1] Rafal Golebski and Piotr Boral , Study of Machining of Gears with Regular and Modified Outline Using CNC Machine Tools 2021
- [2] Dr Fritz, Dr. Markus Brumm and Julian Staudt , Quality and Surface of Gears Manufactured by Free-Form Milling with Standard Tools 2015
- [3] Guangwen Yan, Houjun Chen, Xiaoping Zhang, Chang Qu & Zhilan Ju , A dimension-driven adaptive programming for tool-path planning and post-processing in 5-axis form milling of hyperboloidal-type normal circular-arc gears
- [4] Ming Luo, Dongqing Yan, BaohaiWu & Dinghua Zhang, Barrel cutter design and toolpath planning for high-efficiency machining of freeform surface 2015
- [5] Gaizka Gomez Escudero, Pengbo Bo, Haizea Gonzalez-Barrio, Amaia Calleja-Ochoa, Michael Barto & Luis Norberto Lopez , 5-axis double-flank CNC machining of spiral bevel gears via custom -shaped tools—Part II: physical validations and experiments 2021
- [6] S.H. Suh, W.S. Jih, H.D. Hong & D.H. Chung , Sculptured surface machining of spiral bevel gears with CNC milling 2001
- [7] Τσουρβελούδης, Χ.Ν. & Νικολός, Ι.Κ , Τεχνολογίες Παραγωγής, Χανιά , Εκδόσεις Πολυτεχνείου Κρήτης 2014
- [8] Κούβελης Χρήστος, Μελέτη κατασκευής ακτινικής πτερωτής αεροσυμπιεστή με φρεζάρισμα σε πέντε άξονες, Διπλωματική Εργασία , Χανιά: Πολυτεχνείο κρήτης , Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, 2017
- [9] Ευφροσύνη Κοσμοπούλου, Είδη Οδοντώσεων Οδοντωτοί τροχοί (παράλληλοι ή κωνικοί) 2018, pp 2-18
- [10] Στεργίου Ιωάννης και Στεργίου Κωνσταντίνος, Στοιχεία Μηχανών 2 2020
- [11] Α.Δ. Τσολάκης , Στοιχεία Μηχανών ΙΙ 2015, pp 52-86
- [12] Νικολαΐδης Φίλιππος, Γεωμετρικές καμπύλες 2015, pp 36-46
- [13] Πάπαρης Άγγελος, Κατεργασίες κοπής οδόντωσης, Πτυχιακή εργασία, Καβάλα: Τεχνολογικό ίδρυμα Καβάλας, Σχολή τεχνολογικών εφαρμογών 2016,
- [14] Μ. Γρηγοριάδου, Μηχανολογικό σχέδιο 1 ΑΠΘ 2016, pp 11-40
- [15] Μανιάτη Μαρί- Μισέλ, Πειραματική διερεύνηση της επίδρασης της μετατόπισης των οδοντώσεων στην ακρίβεια των τροχών, Διπλωματική εργασία, Αθήνα ΕΜΠ Σχολή Μηχανολόγων μηχανικών, 2007, pp 29-42
- [16] OmnindexCN SITE
- [17] Καρκάνης Μανούσος, Μελέτη, σχεδιασμός και ανάπτυξη προϊόντος με έμφαση στην επιλογή υλικού και στις τεχνολογίες παραγωγής, περίπτωση οδοντωτού τροχού, Ξάνθη: Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Τμήμα Μηχανικών παραγωγής και Διοίκησης , 2012

[18] Μαλιάγκας Βασίλειος, Επισκόπηση θεωρίας οδοντώσεων, Διπλωματική εργασία, Χανιά Πολυτεχνείο κρήτης , Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, 2014 , 17-22

[19] Harald Naunheimer, Bernd Bertsche, Joachim Ryborz & Wolfgang Novak, Automotive Transmissions , 1994 , pp 20-21